Thèse de l'Université de Reims Champagne-Ardenne

présentée par

Gilles FRONTEAU

en vue d'obtenir le titre de

Docteur de l'Université de Reims Champagne-Ardenne

Spécialité Sciences de la Terre

COMPORTEMENTS TELOGENETIQUES DES PRINCIPAUX CALCAIRES DE CHAMPAGNE-ARDENNE,

EN RELATION AVEC LEUR FACIES DE DEPOT ET LEUR SEQUENÇAGE DIAGENETIQUE

Soutenue publiquement le 21 Janvier 2000

devant la commission d'examen composée de :

M. V. BARBIN	Maître de conférence à l'Université de Reims	Codirecteur de thèse
M. M. BAZIN	Professeur à l'Université de Reims	Examinateur
M. M. CAMPY	Professeur à l'Université de Bourgogne	Examinateur
M. B. HAGUENAUER	Professeur à l'Université de Nancy I	Rapporteur
M. A. PASCAL	Professeur à l'Université de Reims	Directeur de thèse
M. M. RAUTUREAU	Maître de conférence à l'Université d'Orléans	Rapporteur
M^{me} V. VERGES-BELMIN	Ingénieur de recherche au LRMH (Champs-sur-Marne)	Examinateur

Groupe de Formation Doctorale Pal & Sed (GEE)

Avant-propos

A mon père, Lucien Fronteau (1926-1997)

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux directeurs de thèse, André PASCAL et Vincent BARBIN de l'Université de Reims pour m'avoir proposé ce sujet de recherche, dont la problématique était très différente des thèmes habituels de la sédimentologie. Car les années passées à leurs côtés furent pour moi des plus enrichissantes, tant sur le plan scientifique qu'au niveau culturel et humain.

En effet, ce projet et les quatre années d'études qui ont été nécessaires à l'élaboration du présent ouvrage, m'offrirent l'occasion de découvrir d'autres aspects de la géologie, en relation avec l'environnement et le patrimoine historique. Mais surtout de me pénétrer de la richesse d'une région que je ne connaissais pas : la Champagne-Ardenne.

Il me fut ainsi donné la chance de parcourir des paysages contrastés, arpentant les plateaux viticoles qui bordent Reims ou les vallées boisées des bords de la Meuse et de la Marne. L'étude de l'altération des pierres à bâtir locales fut donc un excellent mode d'approche pour comprendre une région, ou plutôt des régions au pluriel, car la Champagne-Ardenne et l'Est du Bassin de Paris sont multiples et complexes.

Cette thèse fut aussi un moyen de rencontres et je tiens à remercier ici toutes les personnes qui ont, d'une façon ou d'une autre, contribué à sa réalisation. Et tout d'abord, je remercie Michel Roux, directeur du laboratoire pour son accueil et mon intégration à l'équipe des Sciences de la Terre de l'Université de Reims. Je remercie d'ailleurs tous les membres du département de Géologie pour leur chaleur et leur amabilité.

Je tiens à remercier plus particulièrement les différentes personnes qui, par leur remarques et leur connaissance de la région, m'ont sorti de mon ignorance :

- Michel Laurain, pour son efficacité à m'indiquer les affleurements de Tertiaire et pour sa connaissance des différents terrains de la région rémoise.
- Michel Coulon, pour son enthousiasme et sa compétence sur les questions de porosimétrie. Je le remercie tout spécialement pour avoir accepté de conduire deux programmes d'études à l'IUT sur la Pierre de Courville et la Pierre de Dom et espère continuer cette fructueuse collaboration.
- Jean-Claude Foucher et Hubert Guérin pour leur savoir et les divers documents qu'ils m'ont fourni sur la géologie champenoise, mais aussi pour m'avoir encadré lors des enseignements de travaux pratiques de paléontologie ou de pétrologie.
- Jean Claude Paicheler pour ses remarques sur les différents faciès de calcaires Lutétien utilisés dans les sites archéologiques de Reims et son accueil pour l'enseignement de la sédimentologie des carbonates.

De même, je remercie les personnes qui ont accepté de participer au jury :

- Messieurs Bernard Haguenauer et Michel Rautureau respectivement Professeur à l'université de Nancy I et Maître de conférence en physique à l'université d'Orléans.
- Monsieur le Professeur Michel Campy de l'Université de Bourgogne à qui je dois mes premières notions sur l'altération d'une roche en œuvre et sur les phénomènes d'altération à la surface.
- Monsieur le Professeur Marcel Bazin de l'Université Champagne-Ardenne.

C'est aussi avec plaisir que je remercie les différentes personnes extérieures au milieu universitaire, qui, au fil des discussions et des rencontres, m'ont aidé à prendre conscience des problèmes rencontrées par une roche en œuvre ou de la difficulté à retrouver la provenance d'origine d'une pierre à bâtir, notamment :

- Les membres de la section Pierre du *Laboratoire de Recherches de Monuments Historiques* de Champs-sur-Marne et plus particulièrement :
  - Annie Blanc pour sa disponibilité à faire partager son savoir et son expérience unique des pierres à bâtir du Bassin de Paris.
  - Véronique Vergès-Belmin, directrice de la Section Pierre et spécialiste des altérations en œuvre, qui a d'ailleurs accepté d'être dans le jury.
  - Mme Pallot-Frossard, directrice du *LRMH* ainsi que les différents membres du Cercle des Partenaires du Patrimoine auxquels je souhaite une réussite dans le programme « Pierre de Champagne-Ardenne ».
- Mr Tourtebatte et Mr Vallière du *CREFOP patrimoine* de Châlons-en-Champagne et Mr Lécaille de l'entreprise de restauration *Léon Noël* qui m'ont permis de confronter mes connaissances théoriques avec leur savoir faire et leur connaissance des techniques de mise en œuvre des pierres calcaires.

Merci aussi à toutes les personnes qui participé à la mise en forme et à l'aboutissement de ce travail et plus particulièrement le personnel technique du laboratoire :

- Didier Delor qui à travers la confection de près de 600 lames minces plus ou moins facilement réalisables a largement contribué à l'avancée de la thèse.

- Xavier Drothière dont la compétence compense largement ma maladresse manuelle et à qui je dois nombre de collages pour la réalisation de posters ou de planches photographiques.

- Chantal Radet dont la riante bonne volonté me fait presque apprécier certaines démarches administratives.

Enfin, je ne saurai oublier toutes les personnes qui de près ou de loin, m'ont soutenu durant ces dernières années :

- mes collègues thèsards de l'université de Reims (Agnès, Jérome et Corinne)

- mes camarades étudiants, géologues, rôlistes ou simplement amis, rencontrés au fil d'une scolarité mobile. Et qui, je l'espère assisteront à la soutenance de cette thèse : Patrice Bouteiller, Fabrice Crochet, Gérald Vincent, Philippe Bailly, Anthony Tort, Greg Plezziez, Karelle Devallez, Amélie Prévot, Barbara Lefevre et tout ceux que je ne peux citer ici, mais qui se reconnaîtront.

- ma famille, proche par le cœur et principalement ma mère Marie-Thérèse ainsi que ma sœur Marie-Line et toute sa petite famille. Mais aussi tous les oncles, tantes et cousins dont l'éternelle question « alors Gilles, les études ?… » facilite l'écoulement des années.

- et Chong, qui a partagé toutes les étapes de la rédaction de cette thèse ainsi que les autres moments de ma vie de tous les jours (et ce, à mon plus grand bonheur).

SOMMAIRE

Introduction

Présentation et méthodes de travail 12
Inventaire des calcaires utilisés en Champagne 16
Méthodes d'étude et appareillage 17
Caractérisation des calcaires (faciès et microfaciès) 19
Altération de la pierre en œuvre 30

Chapitre 1 : caractérisation des calcaires étudiés 35

Les principaux calcaires utilisés en Champagne-Ardenne 37
1/ Le Calcaire à débris : Pierre de Dom-Le-Mesnil et assimilées 45
2/ L'Oolithe vacuolaire : Pierre de Savonnières et assimilées 69
3/ Le Calcaire Grossier : Pierre de Courville, Calcaire à Ditrupa et autres pierres 97
4/ Autres Calcaires :
- Pierre d'Euville et assimilées 133
- autres calcaires (cités à titre de comparaison) 140

Planches A et B (microfaciès des principaux calcaires étudiés)

Chapitre 2 : modes d'altération des calcaires étudiés 145

1/ Altération du Calcaire à débris 147
2/ Altération de l'Oolithe vacuolaire 161
3/ Altération du Calcaire Grossier 179
4/ Altération de l'Entroquite de Meuse 191
5/ Altération d'autres calcaires (cités à tire de comparaison) 201

Planches C à G (exemples d'altérations en œuvre)

Chapitre 3 : comportements télogénétiques des Pierres à bâtir 207

1/ Altérabilité des calcaires utilisés en Champagne-Ardenne 209
2/ Notion d'altération préférentielle 217
3/ Notion de comportements télogénétiques 221
4/ Comportements télogénétiques des principales pierres à bâtir de Champagne-Ardenne 225

Conclusions 233

Références bibliographiques 239
Table de matières, listes des figures et des tableaux 261

Annexes

1/ Méthodes d'analyse d'images 273
2/ Les altérations des calcaires en œuvre 287

INTRODUCTION

Présentation et Méthodes

- Point sur les études de l'altération des pierres à bâtir calcaires
- Problématique et objectifs de la thèse
- Mode d'approche
- Présentation de la Champagne-Ardenne
- Inventaire des calcaires utilisés dans la région
- Méthodes d'étude et appareillage
- Caractérisation des calcaires : faciès et microfaciès
- Porosité : caractérisation et quantification
- Altération de la pierre en œuvre

Introduction :

Point sur les études de l'altération des pierres à bâtir calcaires :

Les matériaux mis en œuvre dans une construction : un monument ou une simple habitation seront obligatoirement conduits à se dégrader et à s'altérer (plus ou moins rapidement). Les circulations d'eaux, les cycles gel - dégel et la pollution sont autant de facteurs accélérateurs des processus de dégradation qui conduisent à la destruction des éléments de la construction. La durabilité des matériaux utilisés sera proportionnelle à leur capacité à résister aux conditions de mise en œuvre. Dans le cas de l'utilisation pour la construction de géomatériaux carbonatés comme les roches calcaires, la durabilité peut s'avérer très variable suivant la composition de la roche, la position de mise en œuvre et les conditions environnementales.

Les études sur l'altérabilité des calcaires utilisés en construction sont axées sur l'analyse des facteurs agressifs externes, le plus souvent liés à la pollution atmosphérique (Fritz et Jeannette, 1981 ; Camuffo et Bernardini, 1990 ; Ausset *et al.*, 1991 ; Biscontin *et al.*, 1991a ; Vleugels *et al.*, 1993 ; Gobbi *et al.*, 1995). La caractérisation fine du microfaciès des pierres à bâtir est parfois effectuée pour déterminer la provenance des éléments d'une construction (Blanc, 1972a à 1998 ; Montenat, 1998) ; mais sans véritablement relier les microfaciès caractérisés aux différentes altérations en œuvre détectées (May, 1994 ; Vendrell-Saz *et al.*, 1996, Vouve *et al.* ; 1996). Certains auteurs affirment que « toute intervention dans le domaine de la restauration ou de la conservation passe par une étude minéralogique et pétrographique » (Philippon *et al.*, 1992). Pourtant, il apparaît souvent que ces études se limitent à la détermination du type de roche : grès, calcaire, marbre… (Coote *et al.*, 1988 ; Bell, 1993 ; O'Brien *et al.*, 1995) ou qu'elles indiquent la nature du microfaciès de la roche étudiée, mais sans en tirer de conclusions (Moraiti et Chistaras, 1991 ; Goudie, 1999, Rodriguez-Navarro *et al.*, 1999). Dans d'autres cas enfin, l'analyse du microfaciès est relativement délaissée au profit de la mesure des propriétés pétrophysiques (Mamillan, 1990 ; Biscontin *et al.*, 1991b ; Dessandier, 1995).

Les analyses microfaciologiques approfondies restent de rares études de cas (Jeannette, 1981 ; Martinet et Macaire, 1990, May, 1994) ou des avis d'experts sur la nature de la roche et ses transformations. Citons par exemple : Dragovich (1991), Gauri *et al.*, (1992), Fritz et Jeannette (1981) et Paradise (1995 et 1998) pour l'étude de l'altération des marbres, des dolomites ou des grès. Enfin, certaine de ces études analysent un composant précis du microfaciès afin de démontrer son influence dans le développement d'une altération : présence de pyrite, de gypse, de stylolithes (Quénée, 1990, Rautureau *et al.*, 1994) mais sans extension les résultats.

L'influence de la nature de la roche sur son altération est donc admise (Jeannette, 1992a ; Auger, 1996 ; Vérague, 1998…) et la durabilité en œuvre d'un calcaire est parfois directement corrélée à sa composition

(Gauri, 1978 ; Galan, 1989 ; Rémy, 1993 ; Dessandier, 1995…). Mais les auteurs considèrent souvent que la relation roche - altération ne s'exprime qu'en termes de gélivité, durabilité, résistance à la compression ou à la dissolution. Pourtant pour les calcaires, la corrélation entre nature de la roche et l'altération en œuvre est assurément plus élevée (Schiavon, 1992, Alarcon-Parra *et al.*, 1994) et le microfaciès du calcaire influence directement la nature et la morphologie des altérations développées.

Les différents types d'altérations en œuvre sont décris (Jeannette *in* Philippon *et al.*, 1992 ; Campy et Macaire, 1984), les mécanismes de développement ou de croissance globalement connus (Arnold et Kueng, 1985 ; Arnold et Zehnder, 1985 ; Samsom-Gombert, 1993 ; Fassina, 1995 ; Pauly, 1996) et les vitesses d'altérations mesurées (Del Monte, 1992). Depuis quelques années, les recherches s'orientent donc vers des études multidisciplinaires dans le but d'établir des relations entre la pollution de l'environnement et la durabilité des pierres à bâtir (Zezza *et al.*, 1992). D'autres études analysent et critiquent le comportement et le vieillissement naturel des roches et des produits de restauration (Vergès-Belmin *et al.*, 1991 ; Vleugels et al., 1994 ; Nion, 1997 ; Cercle des Partenaires du Patrimoine 1996-1999). Mais, dans le cas des roches calcaires, la grande diversité des microfaciès rend difficile les généralisations. Elle oblige à faire les études au cas par cas (en limitant le nombre de variables), avant d'en proposer des synthèses.

Problématique et objectifs de la thèse :

Dans la région Champagne-Ardenne, le patrimoine historique bâti en pierre calcaire est très important. Cette richesse architecturale et les dommages causés par le temps en général et par la première guerre mondiale en particulier, ont généré de nombreuses campagnes de restauration (Dolfini, 1920, Exemples de restauration *in* Philippon *et al.*, 1992 ; Noël, 1999). Les roches extraites pour la construction et la restauration dans les 4 départements de la région sont variées (Noël, 1970 ; BRGM, 1980) avec souvent des calcaires très typés. De plus, la proximité de la Lorraine et de la Bourgogne (autres régions riches en pierres de construction calcaires) augmente encore la diversité des roches observées en œuvre.

Ces deux points : nombreuses restaurations de monument en calcaires et grande diversité des roches observées dans les constructions, ont justifié le choix de la région de Champagne-Ardenne pour ce travail de synthèse qui vise à compléter la connaissance du comportement en œuvre des roches calcaires.

L'objectif de ce travail est d'abord d'estimer **l'importance relative des paramètres externes et du microfaciès d'un calcaire lors de son altération en œuvre afin de définir des comportements d'évolution.** Nous avons donc distingué les facteurs d'altérabilité liés à la roche de ceux induits par le microclimat d'exposition ainsi que par les conditions de mise en œuvre. Et démontré l'importance du microfaciès du calcaire sur sa durabilité dans un bâtiment mais aussi sur la nature des altérations développées.

Nous avons alors **hiérarchisé les influences des différents composants sédimentaires ou diagénétiques des calcaires**. Pour cela, l'étude a été élargi à d'autres pierres à bâtir extraites en marge de la région : Pierre de Dijon, Entroquite de la Meuse, calcaires lutétiens du centre du bassin de Paris… Cette augmentation du nombre et de la variété des microfaciès analysés nous a permis de **reconnaître les paramètres qui influencent le développement des différents types de dégradations et d'entamer leur caractérisation sédimento-diagénétique.** Nous avons ainsi reconnu et estimé l'importance de la texture, des différents types de ciments ou de matrices, des structures sédimentaires, de la minéralogie…

Organisation des résultats :

Les résultats sont organisés en suivant trois grandes étapes. Dans un premier temps, nous définirons et caractériserons les différents calcaires étudiés, mais sans nous attacher à leurs dégradations en œuvre. Dans un deuxième temps nous traiterons séparément l'altération de chacune de ces pierres utilisées comme pierre à bâtir. Et enfin, nous comparerons ces résultats et en tirerons des conclusions générales.

Mode d'approche :

Notre étude concerne des calcaires de microfaciès judicieusement choisi parmi un inventaire exhaustif initial (voir pages 35 à 41). Afin de correspondre à notre problématique et répondre à nos objectifs, nous avons sélectionné des calcaires aux microfaciès très différents : oolithiques ou bioclastiques, sparitiques ou à matrice micritique. De plus, les roches retenues devaient avoir des sites d'exploitation encore observables pour nous permettre un échantillonnage de la roche in-situ et une reconstitution de ses conditions de dépôt. Mais elles devaient aussi être utilisées à un degré suffisamment vaste pour nous permettre de les observer dans de nombreuses constructions et dans des expositions variées. Certains calcaires ont donc été éliminés de l'étude comme la Pierre de Faloise (51), la Pierre de Romery (08), La pierre d'Arc-en-Barrois (52), etc…

L'analyse de l'altération en œuvre s'est déroulée en deux temps :

- Nous avons observé et analysé les différentes morphologies macroscopiques d'altérations et tenté de comprendre leurs mécanismes de développement (desquamations, encroûtements, désagrégations…). Ces observations à grande échelle ont été réalisées pour chacun des calcaires étudiés, sans se limiter à un monument particulier. Ainsi, pour les sites urbains avec leur pollution habituelle, nous avons largement parcourus les localités où les roches étudiées étaient intensivement utilisées : Charleville-Mézières (Pierre de Dom), Reims (Calcaire Grossier), Troyes, Dijon… Mais, pour comprendre l'altération en milieu rural, nous avons

aussi travaillé dans les petites communes des différents bassins carriers d'origine (Savonnières-en-Perthois près de St-Dizier, Euville près de Commercy…).

Cette partie de l'étude a principalement permis d'établir une liste de correspondances entre les altérations développées en œuvre et les types de calcaires.

- Ensuite, sur des sites précis, nous avons comparé le comportement des différentes roches utilisées dans un même bâtiment en essayant de tenir compte de leur date de mise en œuvre (Eglise St André à Reims par exemple). Les altérations observées ont été rapportées aux paramètres conditionnant l'évolution des blocs : microclimat d'exposition, techniques de mise en œuvre, position architecturale et nature de la roche. Nous avons ainsi précisé les éventuelles relations entre les altérations développées et les microfaciès et nous avons estimé l'importance relative des différents paramètres sur les processus de dégradation.

Liste des Pierres à bâtir retenues :

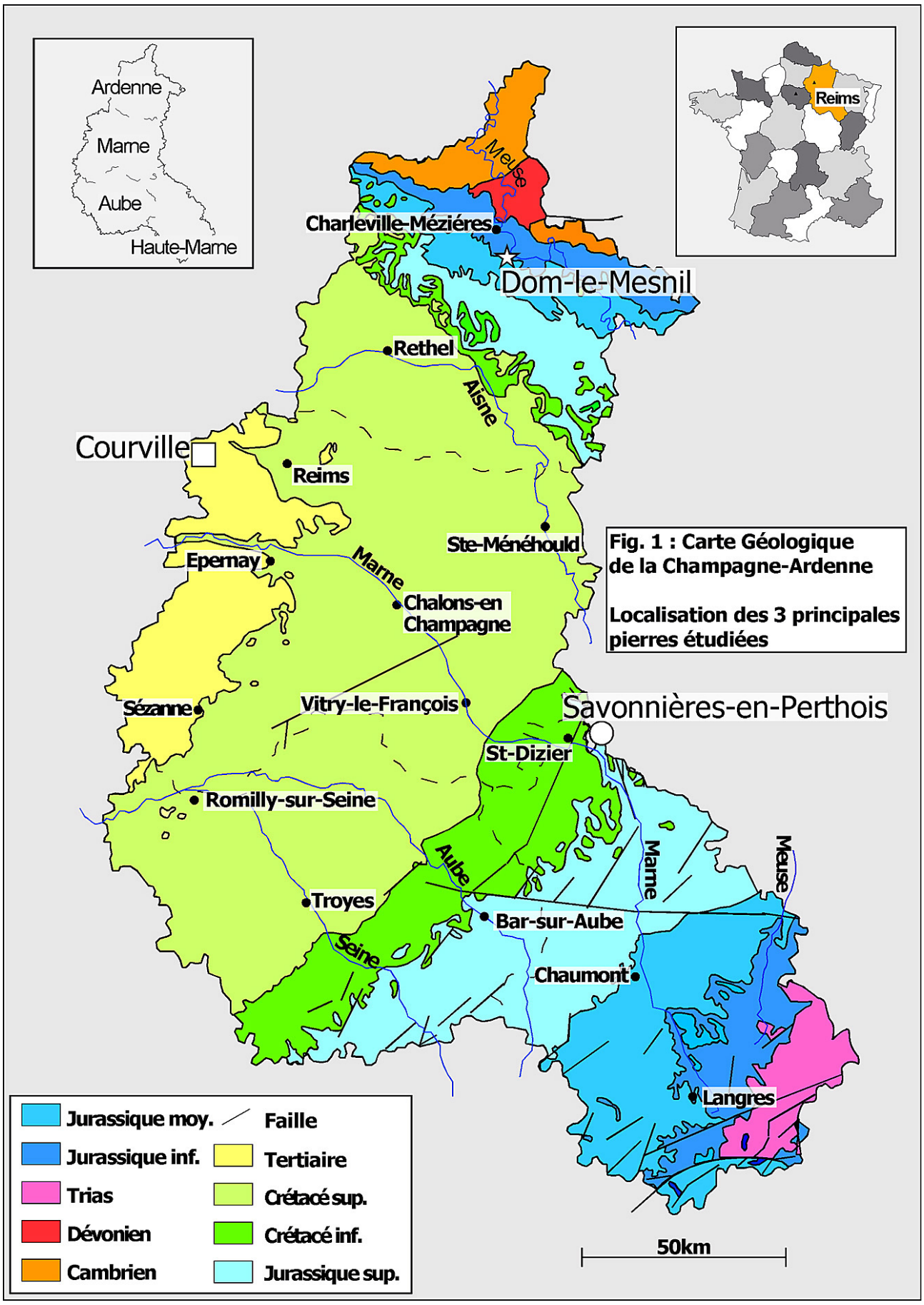
Parmi les calcaires étudiés, 3 font l'objet d'une étude approfondie : le Calcaire à débris (Pierre de Dom), l'Oolithe vacuolaire (Pierre de Savonnières) et le Calcaire grossier (Pierre de Courville). Pour comparer les évolutions en œuvre , 4 calcaires ont été choisis : les Entroquites de la Meuse, la Pierre de Dijon, la Pierre de Givet et les calcaires micritiques du Barrois.

Présentation et méthodes de travail :

La Champagne-Ardenne :

Cadre géographique sommaire :

La Champagne-Ardenne (Fig. 1) se situe dans le Nord-Est de la France, en bordure Est du Bassin de Paris. Elle est limitée au Nord par la Belgique, à l'Ouest par la Picardie (département de l'Aisne), au Sud par la Bourgogne (départements de la Côte d'Or et de l'Yonne) et à l'Est par la Lorraine (département de la Meuse). La région Champagne-Ardenne, composée de 4 départements (du Nord au Sud : Ardenne, Marne, Aube et Haute-Marne), est relativement étirée dans la direction Nord - Sud : près de 300 km contre 100 km au maximum dans la direction Est - Ouest.


Ardenne
Marne
Aube
Haute-Marne
Reims
Meuse
Charleville-Mézières
Dom-le-Mesnil
Rethel
Aisne
Courville
Reims
Ste-Ménéhould
Epernay
Marne
Chalons-en Champagne
Sézanne
Vitry-le-François
Savonnières-en-Perthois
St-Dizier
Romilly-sur-Seine
Aube
Marne
Meuse
Troyes
Bar-sur-Aube
Seine
Chaumont
Langres
Fig. 1 : Carte Géologique de la Champagne-Ardenne
Localisation des 3 principales pierres étudiées
Jurassique moy.
Jurassique inf.
Trias
Dévonien
Cambrien
Faille
Tertiaire
Crétacé sup.
Crétacé inf.
Jurassique sup.
50km

Le climat est de type tempéré Séquanien, les températures sont relativement modérées et seules des villes particulièrement exposées comme Rocroi ou Langres ont un climat nettement plus rude (données de météorologie : ARSQA, Météo-France). Ainsi dans des données transmises par le Cercle de Partenaires du Patrimoine, Charleville-Mézières et Reims sont considérées comme des villes à gel modéré (le nombre de jours où la température est inférieure à –10°C est inférieur à 10, mais elles comptent plus de 2 jours avec une température inférieure à –5°C). Alors que Langres est classée comme une ville à gel sévère car la moyenne des températures minimales est inférieure à 0°C durant trois mois. Dans les secteurs plus ruraux, d'autres banques de données confirment ces tendances climatiques (Banque de données INRA : Centre de Recherches Agronomiques, Reims).

Cadre géologique sommaire :

Le bassin de Paris, qui comprend la région Champagne-Ardenne, est une cuvette sédimentaire d'environ 500 km de long et occupe le quart du territoire métropolitain français. Ce bassin sédimentaire fut comblé au cours du Secondaire (Mésozoïque) et du Tertiaire (Cénozoïque) par des sédiments de nature très diverse : sables, calcaires, argiles…. Le socle du bassin sédimentaire d'âge primaire (Paléozoïque) est affecté de grandes fractures, dont l'activité au cours du temps a influencé directement le taux de subsidence du bassin et donc l'épaisseur des différents sédiments et des calcaires qui nous intéressent. Après la tectonique tertiaire, l'érosion a mis à l'affleurement des auréoles sédimentaires concentriques d'âge et de lithologie différentes. Dans celles-ci, les séries calcaires très développées datent principalement du Secondaire (Jurassique et Crétacé). Les sédiments du Trias sont majoritairement gréseux alors que les faciès du Tertiaire sont plutôt sableux (BRGM, 1980).

La région Champagne-Ardenne à la bordure Est et Nord-Est de ce bassin recoupe les auréoles sédimentaires au Nord et au Sud (voir Fig. 1). En partant du centre vers le Nord et vers l'Ardenne se rencontrent les terrains du Tertiaire (région de Reims), puis la craie crétacée et les terrains jurassiques (entre Rethel et Charleville-Mézières). Le Massif ardennais n'appartient pas au bassin de Paris, les roches rencontrées y sont d'âge paléozoïque, principalement du Dévonien et du Cambrien (pointe de Givet). En allant vers le Sud-Est, on rencontre la même succession, avec des terrains du Tertiaire (région de Sézannes), puis du Crétacé (Craie de Champagne du secteur de Châlons-en-Champagne), du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur (Bar-sur-Aube, St-Dizier). Enfin, en bordure Sud de la région, les terrains datent du Jurassique moyen (Bathonien à Chaumont, Bajocien à Langres) et du Jurassique inférieur voire du Trias à l'extrême Sud-Est. Dans les départements voisins (non représenté sur les Figures 1 et 2), les terrains sédimentaires obéissent au même schéma d'organisation, les terrains de l'Aisne datent du tertiaire et du Crétacée, ceux de la Côte d'or et de la Meuse sont plutôt du Jurassique. Enfin, les roches de Wallonie

sont légèrement métamorphisées : calcaires bioclastiques compact dit « petits-granits », ou véritablement métamorphiques : schistes, gneiss… (DRGN, 1995).

Cette organisation centrifuge des terrains par rapport au centre du bassin implique donc une régionalisation des différents calcaires. De plus, il faut tenir compte de la possibilité de variations latérales de faciès. En effet, si certaines roches, comme la craie, paraissent en première approximation homogènes sur de grandes distances, d'autres peuvent varier et présenter des lithologies très différentes (Figure 2).

On peut ainsi remarquer que :

- Les calcaires bajociens se rencontrent dans la côte sud de la Meuse entre Charleville-Mézières et Sedan, mais aussi dans le secteur de Langres. Dans les Ardennes, leur faciès est un calcaire finement biodétritique (Pierre de Dom-le-Mesnil), tandis qu'à Langres, il présente sous la forme d'un calcaire à entroques et à gros éléments, partiellement dolomitisé (Pierre de Rolampont ou Pierre de Langres).

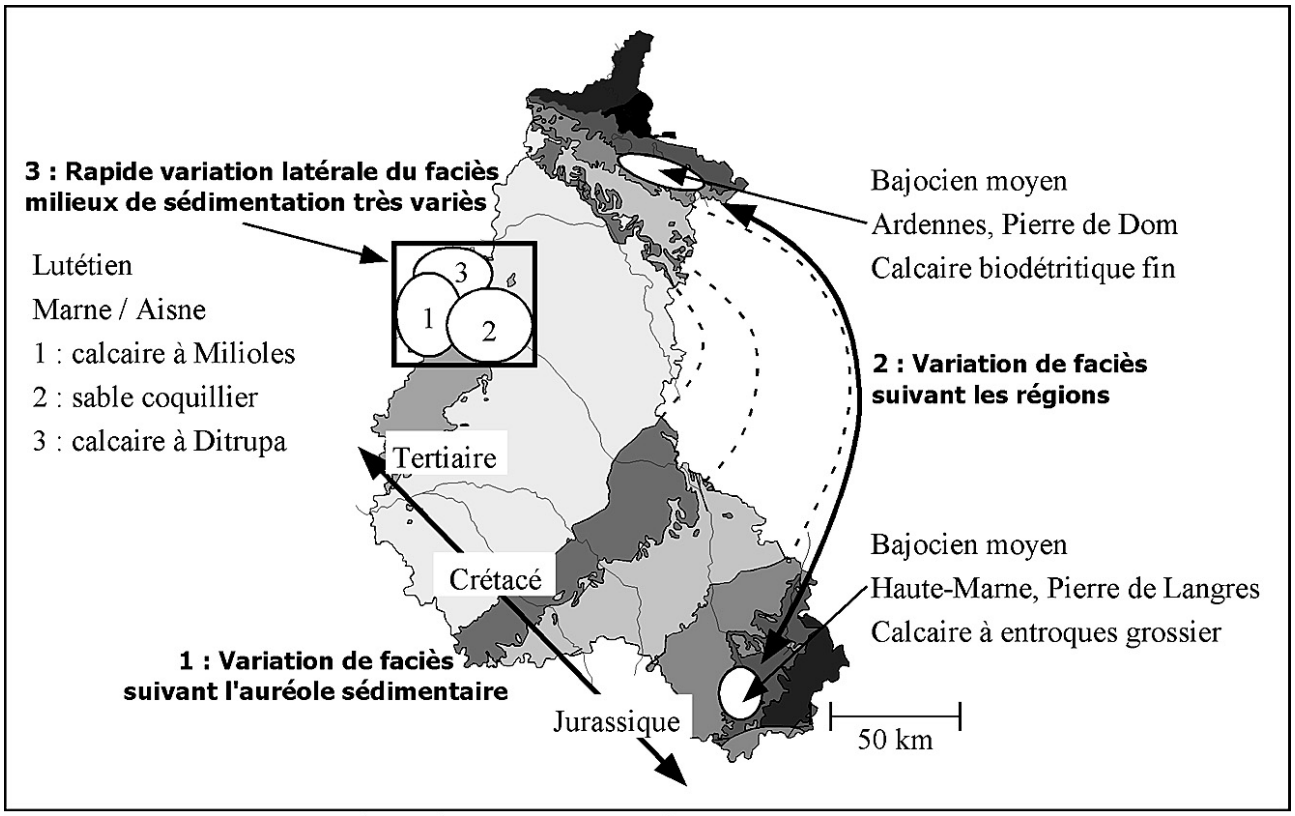


Fig. 2 : Auréoles sédimentaires recoupées en Champagne -Ardenne
Variations de faciès selon 1 : position stratigraphique
2 : variation du faciès à l'échelle régionale
3 : variation locale du faciès

- Le Lutétien se rencontre dans les auréoles sédimentaires internes du bassin de Paris, à l'Ouest de Reims. Il présente des faciès sableux, argileux ou calcaires qui varient très rapidement : soit verticalement, soit latéralement. La série contient aussi un calcaire compact ou un sable fossilifère inapte à l'utilisation en

construction. Le passage latéral faciès entre ces différents types de sédiments peut se produire en quelques kilomètres seulement.

Cette description rapide de l'organisation géologique de la Champagne-Ardenne montre bien la diversité des roches rencontrées dans la région. Cette disposition en auréoles est à l'origine de la richesse et de la variété des pierres calcaires utilisées pour la construction : roches que nous décrirons plus précisément dans le chapitre suivant.

Inventaire des calcaires utilisés en Champagne-Ardenne :

Recherche bibliographique :

L'inventaire des calcaires utilisés pour la construction a été réalisé avec l'aide de Mme Annie Blanc des Monuments Historiques (*LRMH,* Champs-sur-Marne), Mr Michel Laurain du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et M. Vallière et M. Tourtebatte du *CREFOP Patrimoine* de Châlons-en-Champagne.

De plus, la localisation précise des anciens sites d'extraction a été réalisée à partir des cartes géologiques éditées par le B.R.G.M. : diverses éditions des cartes géologiques au 1/50000ème et 1/80000ème. Mais cette prospection fut largement guidée par le Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889 (Anonyme, 1890).

Recherche sur le terrain : sites d'extraction, sites d'utilisation.

Sur les lieux d'affleurement des différents calcaires, l'échantillonnage et les relevés de coupes ont été effectués prioritairement dans les carrières encore en exploitation : (Courville pour le « Calcaire grossier », Savonnières et Brauvilliers pour « l'Oolithe vacuolaire » etc.…). Mais en complément ou pour les calcaires dont les carrières sont désormais à l'abandon, nous avons aussi tenté de retrouver des fronts de taille anciens encore observables. Nous avons donc obtenu, pour chaque type de calcaire, un échantillonnage in-situ des différents bancs et des différentes appellations extraites. Echantillons qui nous ont permis d'estimer la variabilité de la roche exploitée pour la pierre de taille ainsi que celle des bancs délaissés.

Afin étudier l'évolution en œuvre des calcaires sélectionnés, les grandes villes de Champagne-Ardenne ont été parcourues. Tout comme les principaux villages des différents bassins carriers puisqu'ils sont des sites privilégiés d'utilisation des calcaires exploités dans leurs environs. Parfois, ces villages permettent d'observer la mise en œuvre de niveaux particuliers (impropres à la commercialisation) ou présentent des utilisations atypiques de la roche : les bâtiment sont entièrement construits avec la pierre

locale. Enfin, la consultation d'entreprises de restauration de monuments historiques (entreprise Léon Noël, St Brice-Courcelles) et de Mr Berthelot de l'AFAN ont permis d'observer des bâtiments où les calcaires initiaux ont été substitués plus ou moins récemment par d'autres calcaires et de comparer les évolutions en œuvre.

Méthodes d'étude et appareillage :

Microscopie optique en lumière naturelle, polarisée, en épifluorescence ou en cathodoluminescence.

L'étude au microscope s'est effectuée après induration préalable des échantillons par de la résine polyester (type araldite). Les quelques 600 lames minces analysées dans le cadre de ce travail ont été réalisées au Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Les blocs de calcaire en œuvre et les blocs fragiles ont été indurés à plusieurs reprises afin de limiter les arrachements de particules et les effets de microfacturation lors de la prise de la résine, mais aussi pour préserver au mieux les encroûtements, les sels de calcium et les organismes microbiologiques. Certains échantillons ont été indurés avec des résines colorées (pâte colorante bleue, Escil© Type C, n°10). Parmi les diverses couleurs testées, la coloration bleue est la plus adéquate, car elle souligne au mieux la porosité (la roche étant surtout composée de teintes jaunes, rouges et parfois vertes).

Le matériel optique utilisé pour les études microscopiques est très complet et performant. Il se compose de microscopes polarisants classiques (type Olympus BX50 et BX60) associés à des appareillages de luminescence et d'acquisition d'images (avec vidéo ou photographie).

- la **cathodoluminescence** met en évidence des **zonations de luminescence, principalement induites par la présence de Mn^{2+}** (et inhibées par Fe^{2+}), mais qui peuvent être aussi provoquées par du plomb (Pb^{2+}) ou des terres rares (Machel *et al*, 1991, Barbin et Schvoerer, 1997, Götze, 1998). La microscopie sous cathodoluminescence est un outil particulièrement précieux pour **affiner certains séquençages diagénétiques** et pour souligner la présence d'autres minéraux que la calcite (dolomite, aragonite, quartz…). L'appareil utilisé (cathode froide type OPEA, fonctionnant sous microvide avec micro-fuite d'argon) autorise l'observation microscopique qualitative et « quantitative » de la cathodoluminescence.

- la **fluorescence** sous lumière ultraviolette (longueurs d'onde entre 330 et 385 nm) a été observée à l'aide d'un autre microscope spécialement équipé (microscope Olympus BX 60, cube d'excitation UV). Cette luminescence (aussi nommée épifluorescence) souligne la présence des liaisons triples des atomes de carbone et donc **la présence de matière organique à différents stades de maturation** (Bertrand *et al.*, 1986, Cuif *et al.*, 1990, Bezouska *et al.*, 1998). Son utilisation, peu répandue en géologie, permet pourtant d'affiner la caractérisation des phases diagénétiques et de la porosité (Dravis et Yukewicz, 1985 ; Van Vliet-Lanoe, 1985 ; Cercone et Pedone, 1987, Soeder, 1990, Wendte *et al*., 1998).

Ces modes d'observations sous luminescence complètent l'analyse des microfaciès sous lumière naturelle ou polarisée analysée. La cathodoluminescence est particulièrement adaptée à la mise en évidence des phases diagénétiques (Frank *et al*. 1995 ; Durlet *et al*, 1996 et 1997 ; Götze *et al*., 1999) et à la caractérisation des roches fortement recristallisées (Barbin *et al.*, 1992). La fluorescence met plutôt en évidence la matière organique (Arroyo et al., 1995 ; Baker *et al.*, 1999), son apport s'avère essentiel lors de l'étude de géomatériaux altérés car la présence des éléments biologiques dans les dégradations en œuvre est fréquemment mentionnée (Jaton *et al*., 1985 ; Guillitte, 1995 ; Blasquez *et al.*, 1997).

Numérisation et analyse d'images :

Dans cette étude, la quantification ou la semi-quantification des microfaciès par analyse d'images a été utilisée comme un outil à part entière avec un grand nombre d'images numérisées et enregistrées, mais il a été également possible d'effectuer de très nombreux traitements sans enregistrement d'images.

Le matériel utilisé pour obtenir les données vidéo se compose d'une caméra Tri CCD de type professionnel (Sony 930P) avec boîtier de réglage des paramètres d'acquisition vidéo : gain, luminosité, temps d'acquisition, balance des couleurs… De plus, cette caméra est reliée à un empileur d'images (empileur MSP 930P) permettant de superposer des images à faible luminosité et donc d'améliorer les observations. Cette superposition d'images correspondrait en photographie à l'augmentation du temps de pause pour des sujets sous exposés et se révèle très utile pour l'étude des faibles luminescences. Pour refroidir la caméra et éviter les parasites qui apparaissent après de longues périodes d'utilisation ou des empilements d'images de plus de 30 secondes, un refroidisseur à air (SP – 713A) est relié à la caméra Tri CCD. Les images et les données sont analysées et sauvegardées sur un ordinateur PC à carte image spécialement configurée (format .TIF ou .JPEG, Ying et Cheung. 1999), avec un important espace disque pour les sauvegardes et un lecteur Ioméga Zip pour les transferts de données. Les données importantes nécessitant une sauvegarde définitive sont stockées sur bandes magnétiques ou sur CD-Rom (plus de 1000 images par support).

Le traitement des images a été effectué principalement avec la suite logicielle de Microvisions Instruments™. Cette série de softwares est composée de 2 logiciels principaux et d'autres annexes, tous compatibles entre eux :

- **Saisam** : acquisition simple d'images et mesure d'éléments ou de surfaces.

- **Aréas** : seuillage d'une image à partir de son profil de niveaux de gris et multi-seuillage (jusqu'à 6 phases) avec calcul du pourcentage représenté par chaque phase

- Granix et Ellix : mesure automatique de formes simples comme la taille des grains ou des pores.

- Candela : calcul de l'indice optique moyen ou du niveau de gris moyen d'une surface.

De plus, le logiciel Optimas 6.0 (Optima Corporation™) a été utilisé au Laboratoire des Sciences de la Terre de l'Université de Bourgogne afin d'analyser plus profondément certaines images : application de matrices de transformation : ouverture, fermeture, fonction Sobel, squelettisation… Ces transformations de l'image permettent d'améliorer la quantification d'une phase en diminuant les artefacts d'acquisition et les irrégularités dans le périmètre des éléments (Serra, 1982 : Coster et Chermant , 1989 ; Voiron, 1995). Les traitements graphiques ou statistiques ont été réalisés à partir des données obtenues par les logiciels de la suite Microvisions Instruments™ en utilisant des logiciels de traitement de banques de données : Deltagraph pro© 3.5 (Deltapoint™), Statlab© (Slp Infoware™) ou Statistica 6.0 (Statsoft™).

Les méthodes d'analyse d'images utilisées peuvent se regrouper en trois catégories :

-❶ Les quantifications de surfaces : par tracés manuels (logiciels Saisam) ou par seuillage d'histogramme de niveaux de gris puis calcul automatique des pourcentages de phases (logiciel Aréas). Dans cette catégorie d'analyses, les résultats chiffrés ont une valeur quantitative.

-❷ Les discriminations de microfaciès par multi-seuillages et détermination de la signature ternaire de l'échantillon (logiciel Aréas). Les valeurs obtenues composent des nuages de points dans un diagramme triangulaire et elles n'ont qu'une valeur semi-quantitative.

-❸ Les profils de niveaux de gris (Candela ou Aréas) avec la quantification de deux phases et la construction d'une courbe de variation d'une des deux phases. Suivant les phénomènes mesurés, les valeurs ont une signification quantitative ou semi-quantitative, voire même indicative.

Ces trois techniques d'analyse d'images ont des méthodologies de mise en œuvre très différentes et les résultats obtenus sont complémentaires. Elles seront appliquées dans des objectifs précis : quantification d'un paramètre ou d'une phase, caractérisation objective de la roche dans sa globalité (à des fins de comparaison avec un autre échantillon) ou mise en évidence d'une évolution de couleur suivant une direction. Pour plus de détails sur ces trois méthodes se reporter à l'Annexe 1 : méthodes d'analyses d'images.

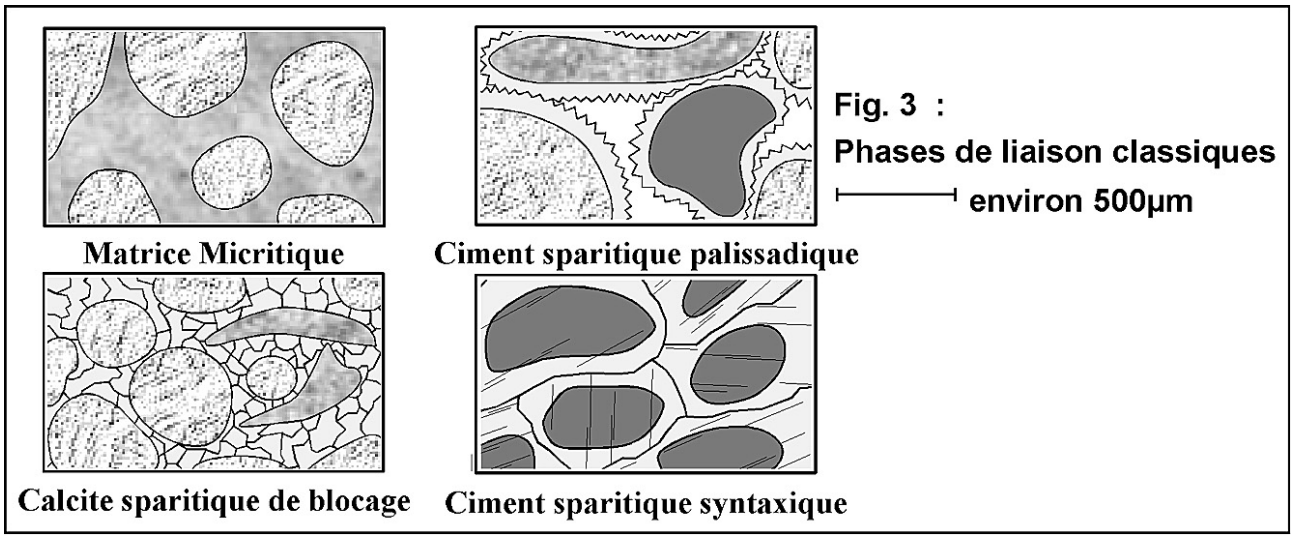
Caractérisation des calcaires : faciès et microfaciès.

Principes de base :

Les différentes roches ont été finement caractérisées du point de vue sédimento-diagénétique. Cette analyse macroscopique puis microscopique de la composition du calcaire et de leurs processus de constitution permet la détermination du milieu de dépôt du sédiment initial et la caractérisation des différentes phases diagénétiques.

- L'étude du milieu de dépôt et de la sédimentation s'attache surtout à distinguer la composition du sédiment (nature des éléments et de la phase de liaison), sa texture et sa structuration à plus grande échelle (en particulier la morphologie des bancs : litages plans ou obliques, par exemple).

- L'étude de la diagenèse répertorie et caractérise les phases de transformations qui ont affecté le calcaire lors de son évolution depuis le sédiment meuble initial riche en eau jusqu'à la roche actuelle (indurée avec une porosité réduite et principalement composée de calcite). La succession des étapes diagénétiques identifiées (concept de stratigraphie diagénétique : Meyers, 1991 ; Durlet *et al*., 1994, Durlet, 1996) permet alors de comprendre l'évolution de la porosité au cours du temps et de reconstituer les phases de poronécrose ou de porogenèse (Choquette et Pray, 1970 ; Bathurst, 1995).



Cette démarche d'observations et d'analyses appliquées aux relevés des fronts de taille des carrières ou des affleurements permet de définir la succession stratigraphique et lithologique des bancs. Mais elle permet aussi de déterminer la nature du faciès et du microfaciès des différents bancs exploités pour la pierre de taille. Elle s'appuie sur des phases de travail sur le terrain (dans les carrières) et au laboratoire (observations au microscope avec quantification par analyse d'images, mise en ordre des observations de terrain). La complémentarité des ces deux types d'études est à double sens car un échantillon peut justifier

un retour sur le terrain, le comblement de carrières indiquées dans d'anciens documents peut impliquer un retour aux données bibliographiques…

Composition d'un calcaire : éléments et phases de liaisons (Fig. 3)

Les roches sédimentaires sont constituées de deux fractions très différentes : les éléments (bioclastes, oolithes…) et la phase qui lie ces particules entre elles. Cette phase de liaison peut-être une matrice qui supporte les éléments ou des ciments qui lient les grains. Il faut donc différencier les calcaires à matrice (micrite : ancienne boue recristallisée en petits grains d'une taille inférieure à 4 µm), des calcaires dont les éléments sont liés par un ou plusieurs ciments (ciments sparitiques en cristaux d'une taille variant de 10 µm à plus de 4 mm pour la sparite la plus grossière). Le terme de microsparite sera réservé à des cristaux d'une taille variant entre 4 et 10 µm, souvent issus de la recristallisation de la micrite. La matrice micritique est généralement de couleur gris sombre, elle peut être d'origine purement chimique ou en partie due à l'action biologique (bactéries par exemple). Il s'agit d'une boue carbonatée qui a très finement cristallisé en formant des nanograins ovoïdes à rhomboédriques (Loreau, 1972 ; Fronteau 1995). Par contre, les ciments sparitiques cristallisent dans les pores entre les éléments et assurent la cohésion du calcaire. Les cristaux de calcite peuvent atteindre de grandes tailles et occlure totalement la porosité de la roche.

L'utilisation du microscope optique polarisant permet de distinguer divers types de ciments, dont les plus courants sont représentés sur la Figure 3 :

- Les ciments palissadiques (prismatic or fibrous spar) se forment très précocement et assurent une première induration du sédiment, limitant sa compaction. Ils peuvent se développer autour de tous les types d'éléments et généralement n'obturent que partiellement la macroporosité intergranulaire.

- Les ciments syntaxiaux croissent préférentiellement à partir des fragments d'échinodermes et peuvent former de très grandes plages de sparite. Ils peuvent obturer toute la macroporosité intra et intergranulaire ou selon leur taux de développement laisser des pores résiduels. Dans le cas des calcaires à entroques, ces ciments syntaxiaux constituent la principale phase de cimentation.

- La calcite en mosaïque (drusy or equicrystalline mosaic spar, Tucker et Wright, 1990) aussi dite calcite de blocage qui se forme généralement plus tardivement, doit son nom (blocky-calcite) au fait qu'elle obture totalement la macroporosité entre les grains et rend le calcaire très compact. Elle est souvent attribuée à des phases secondaires de diagenèse : diagenèse d'enfouissement ou mésogenèse.

Les éléments constitutifs d'un calcaire peuvent être de natures très diverses (Folk, 1959 ; Flügel, 1982 ; Tucker et Wright, 1990), on peut différencier 4 grand types de particules :

- biophysico-chimiques : ces éléments sont issus de la précipitation directe de calcite (avec intervention de micro-organismes : bactéries ou algues bleues) et forment des corps à laminations concentriques (oolithes, oncolithes…) ou des masses ovoïdes de calcite microcristalline non laminée (pelletoïdes).

- biologiques : la roche peut avoir été entièrement construite par des organismes (comme les coraux ou les cyanobactéries) et contenir des fractions de squelettes entiers : éponges, polypiers…

- détritiques : ces particules proviennent de la sédimentation d'éléments d'une roche préexistante qui a subi une érosion et un transport, par exemple les grains de quartz ou de glauconie.

- biodétritiques : ces éléments sont des débris d'organismes (bioclastes) dont l'accumulation passive peut constituer la totalité des éléments figurants dans un calcaire : entroques, lamellibranches, gastéropodes… Les foraminifères, même entiers, feront partie de cette catégorie.

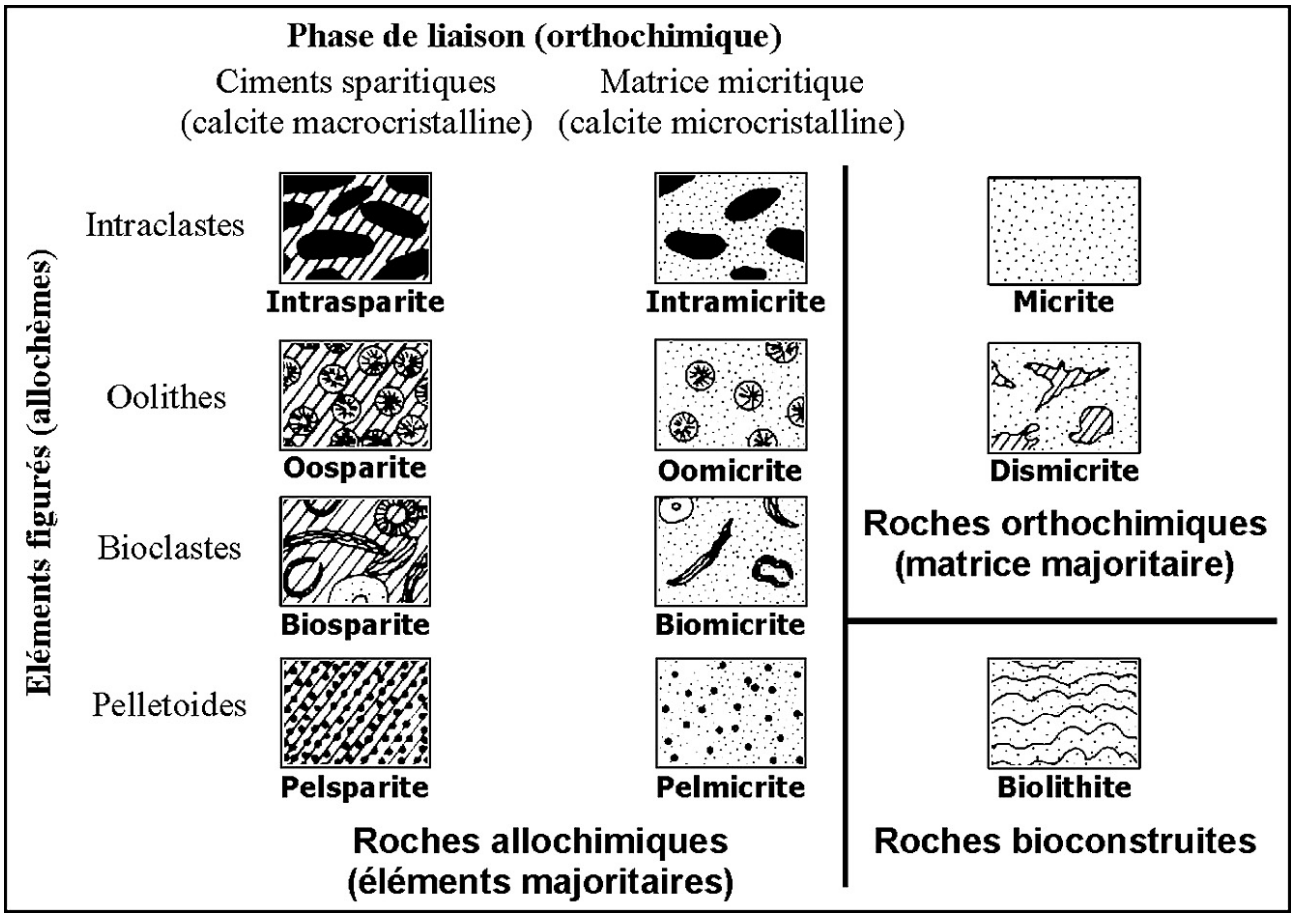


Fig. 4 : classification de Folk (1959) in Flügel (1982) modifiée

Nous retrouverons, tout au long de cette étude, l'importance de cette différenciation entre éléments et phase de liaison ; ainsi que le caractère essentiel de la nature de celle-ci : matrice micritique ou ciments

sparitiques. Et, afin de caractériser en quelques mots ces différents composants, nous utiliserons diverses classifications.

Classifications des carbonates :

Les roches calcaires présentent de nombreux faciès et microfaciès, il existe pour les décrire de très nombreuses classifications (voir une récapitulation de celles-ci dans Flügel, 1982 ou Wright, 1992). Les classifications utilisées couramment sont celles de Folk (1959, 1962) cf. Fig. 4 et de Dunham (1962) cf. Fig. 5. La première privilégie la nature des éléments et de la phase de liaison alors que la seconde insiste sur la texture de la roche et de la proportion entre les éléments et la phase de liaison.

Pour compléter ces classifications : les termes de calcirudites serviront à désigner les roches dont les éléments ont globalement une taille supérieure à 2 mm, ce qui les différencie des calcarénites avec des éléments entre 2 mm et 62 µm et des calcilutites : calcaires fins dont les éléments sont inférieurs à 62 µm.

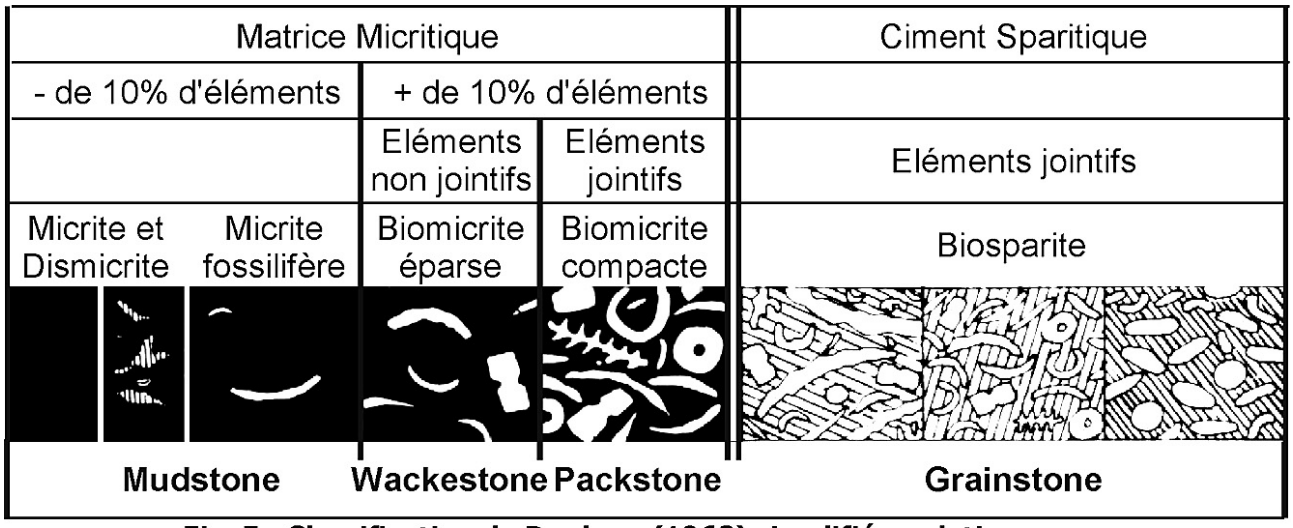


Fig. 5 : Classification de Dunham (1962) simplifiée, relations avec le spectre textural de Folk (1962) simplifié.

Porosité : caractérisation et quantification.

La porosité correspond au volume total occupé par les vides de la roche divisé par le volume total de la roche, elle s'exprime le plus souvent en pourcentage. La valeur de la porosité peut être extrêmement variable d'un calcaire à l'autre : de 0 à plus de 50%.

Premièrement, il faut distinguer deux grands ensembles : la porosité de fractures et celle de pores.

- Fractures : la porosité de fractures ou de fissures est considérée comme une porosité en deux dimensions (Bousquié, 1979), en effet, deux de ces dimensions sont très supérieures à la troisième. Les causes de la fissuration peuvent être diverses mais correspondent le plus souvent à des contraintes thermiques

ou mécaniques. Les microfissurations sont rarement observées dans les roches saines, la phase minéralogique (calcite) est homogène et les propriétés intrinsèques de ce minéral : clivages francs, dissolution aisée, provoqueront plutôt l'apparition de joints de pression - dissolution ou de stylolithes (Bathurst, 1995 ; Charpal et Purser, 1981). Par contre, nous constaterons que ces microfissures seront omniprésentes dans les altérations en œuvre : desquamations, désagrégations etc… La porosité de fractures est donc rarement initiale mais elle se développera au cours de l'altération de la roche, provoquant sa dégradation.

- Pores : les pores sont des vides en trois dimensions (avec parfois une dimension plus développée que les deux autres), les pores peuvent être de taille et de nature très variées depuis le nanomètre jusqu'à la dizaine de centimètres. La porosité de pores est plutôt initiale mais elle peut aussi se former lors d'une phase diagénétique secondaire (dissolution).

-1/ Classifications de la porosité en fonction de la taille des pores, Tab 1 :

Les classifications de la porosité en fonction de la taille des pores sont très nombreuses, généralement trois classes de pores sont distinguées : les nanopores (ou infrapores), les micropores et les macropores. Les seuils de coupures entres ces trois types varient selon les auteurs mais aussi selon les méthodes utilisées (Tab 1).

Auteur (année)	Méthode d'analyse	Seuils des classes de porosité
Goni et al. (1968) in Bousquié 1979	porosimétrie mercure	**Infra** 0.03µm **Micro** 7.5µm **Macro**
Pittman (1971) in Bousquié 1979	MEB	**Micro** 0.5µm **Macro**
Choquette et Pray (1970)	lames minces	**Micro** 62µm **Macro**
Bousquié (1979)	porosimétrie mercure	**Infra** 0.01µm **Micro** 1µm **Macro**
	lames minces	**Micro** 5µm **Macro**
Chrétien (1986)	lames minces	**Micro** 30µm **Macro**
Rémy (1993)	porosimétrie mercure	**Infra** 1µm **Micro**
Verrechia (1992)	loupe binoculaire	**Micro** 50µm **Macro**
	théorie	**Infra** 1µm **Micro**
Loisy (1997)	porosimétrie mercure	**Infra** 0.1µm **U-Micro** 1µm **Micro**
	lames minces	**Micro** 30µm **Macro**
Classes de porosité utilisées	porosimétrie mercure	**Infra** 1µm **Micro** 7.5µm
	lames minces	non observé **Micro** 10µm à *40 **Macro**

Tab. 1 : Classes de porosité selon différents auteurs et seuils retenus pour cette étude (U-Micro = Ultra-microporosité)

Dans le cas de la porosité mesurée par porosimétrie mercure, la notion de taille de pores est en fait à rapporter à la taille d'accès aux pores (Rémy, 1993). Dans le cas de la porosité observée au microscope optique, il faut surtout noter qu'il s'agit de porosité observée en coupe (deux dimensions) dans une roche initialement en trois dimensions. Une coupe dans un pore n'est pas forcément représentative de la véritable

dimension du pore dans l'espace, la mesure de la taille des pores à partir d'une lame mince doit donc être utilisée avec précautions (à moins d'utiliser des méthodes mathématiques pour passer artificiellement de la porosité 2D à la porosité 3D).

Dans cette étude, nous différencierons principalement la microporosité de la macroporosité. La microporosité correspond essentiellement aux pores entre les nanograins de la micrite alors que la macroporosité peut avoir de multiples origines (voir Fig. 6). Pour les résultats issus de la porosimétrie mercure**, la limite entre microporosité et macroporosité est fixée à 7,5 µm**, ce seuil différenciant les macropores inter ou intragrains des micropores : pores entre les nanocristaux de la micrite (la limite entre infraporosité et microporosité se situant à environ 1µm).

Au microscope optique , le seuil minimal d'observation est de 25µm et 50µm (pour les grossissements *12.5 ou *20), de 10 µm pour le grossissement *40 et de 5 µm pour les grossissement supérieurs. Les observations et les mesures de porosité par analyse d'images ont été effectuées au grossissement *40, nous considérerons donc qu'**au microscope optique, seule la macroporosité est véritablement observée**. La taille minimale des pores mesurés au microscope optique étant liée aux limites de l'appareillage : de 5 à 25 µm selon les grossissements (voir exemple Fig. 47a et 47b)

Pour quantifier la porosité totale, il faudra donc utiliser d'autres méthodes en plus de l'analyse d'images : porosité accessible à l'eau sous vide, immersion dans le mercure, porosimétrie mercure…

Remarque : dans un calcaire, la porosité est le plus souvent pluri-modale, les différentes tailles de porosité : infra, micro et macroporosité correspondant à des espaces poreux de nature, de signification et de comportement physique différents (Bousquié, 1979). Par exemple, une forte macroporosité dans un calcaire indiquera un faible degré de cohésion entre les éléments, une forte microporosité ou infraporosité accessible à l'eau correspondra à un fort potentiel capillaire et sera une cause de gélivité. Il serait donc intéressant d'envisager la définition des seuils de porosité en tenant compte du comportement physique du pore vis-à-vis des transferts de fluides (comme en pédologie) ou de la signification sédimento-diagénétique du pore : microporosité matricielle, macroporosité…

-2/ Classifications de la porosité en fonction de la nature sédimento-diagénétique de la roche :

A l'inverse des multiples classifications de la porosité en fonction de la dimension des pores, la classification de la porosité réalisée par Choquette et Pray en 1970 reste la référence (Fig. 6). Cette classifica-

tion, différencie les porosités liées à la nature du calcaire : morphologie des grains, croissance des ciments… des porosités indépendantes du sédiment initial : fractures, karsts…

a- Porosités liées à la structure du sédiment :

- Porosité intergranulaire : il s'agit de la porosité présente entre les éléments figurés de la roche, généralement, elle correspondra aux espaces poreux non occlus par la cimentation sparitique et les pores de ce type seront le plus souvent des macropores. Dans le cas d'un sédiment micritique, la microporosité matricielle pourrait être placée dans cette catégorie, puisqu'elle se trouve dans l'espace intergranulaire, mais nous préférons placer celle-ci dans les microporosités intercristallines.

- Porosité intragranulaire : cette porosité est contenue dans les éléments figurés du calcaire, elle peut être de l'infraporosité, de la microporosité (éléments micritiques) ou de la macroporosité s'il s'agit de vacuoles au sein d'éléments ou de vides de dissolution.

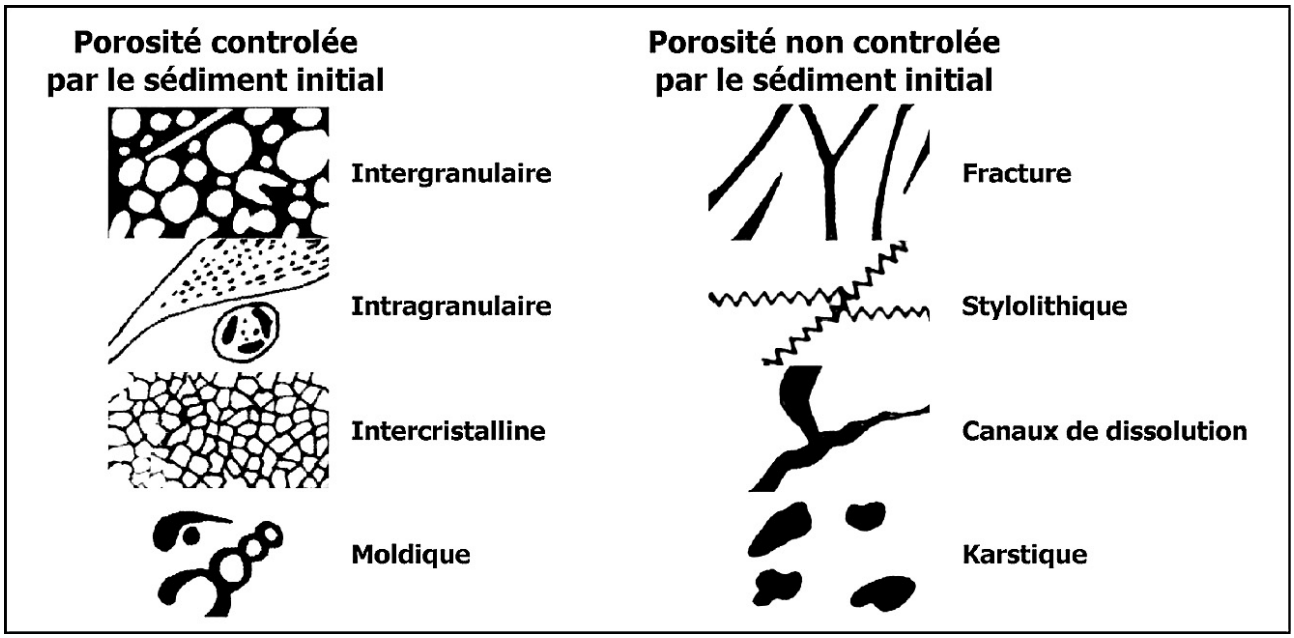


Fig. 6 : Types sédimento-diagénétiques de porosité (en noir) d'après Choquette et Pray (1970) modifié

- Porosité intercristalline : surtout employée dans le cas des calcaires dolomitiques, nous considérerons que la microporosité entre les nanocristaux des matrices micritiques est une porosité intercristalline, surtout quand celles-ci présentent des recristallisation cristallines de microsparite et de sparite. Mais nous classerons la microporosité des éléments micritiques (comme les pellets fécaux des nucléus oolithiques de la pierre de Savonnières) dans les microporosités intragranulaires.

- Porosité moldique : il s'agit le plus souvent de macroporosité obtenue par dissolution, la matière dissoute pouvant être de l'aragonite (comme les coquilles de gastéropodes), de la calcite hautement magnésienne ou de la dolomite… Généralement, la porosité moldique est comblée par la croissance de la calcite

de blocage ou par d'autres cimentations, mais parfois elle est partiellement ou totalement conservée. Dans certains calcaires étudiés ici, ce type de macroporosité est très important.

- Porosité fenestrée : cette macroporosité est le plus souvent totalement occluse par de la calcite sparitique, donnant ce que l'on appelle des *birds-eyes* ou structure fenestrée. Il s'agit de bulles d'air piégées lors de la sédimentation et qui forment des pores plus ou moins sphériques entre les éléments.

b- Porosités indépendantes de la structure du sédiment :

- Porosité de fracture : porosité secondaire ou tardive, les microfractures seront très importantes dans les altérations en œuvre. Dans certaines roches (calcaires du Paléozoïque ou ayant subis une tectonique intense), des macrofractures se sont formées, leur porosité est généralement obturée par de la calcite sparitique et forme des veines de calcite.

- Porosité stylolithique : les stylolithes sont des figures de compaction formées par pression dissolution, ils peuvent être d'origine sédimentaire ou tectonique. Ils contiennent parfois de l'argile résiduelle et forment des barrières de porosité néfastes à la durabilité de la roche (Rautureau *et al.*, 1994). Quand ils sont « ouverts » : i. e. sans argile, les stylolithes correspondent à une porosité de type 2D.

- Canaux de dissolution : les roches calcaires sont facilement dissoutes par des eaux sous saturées en calcite, le produit de cette dissolution forme généralement des pores cylindriques. Il sont localisés près des fractures, des karsts ou des horizons pédologiques. Dans cette étude, nous n'avons pas véritablement mis en évidence de canaux de dissolution, car ils sont masqués par les microfractures, pour les caractériser, il faudrait affiner l'analyse de la porosité par des observations au MEB.

- Porosité karstique : il s'agit de pores caverneux de grande taille pouvant atteindre plusieurs mètres de haut ; il peut s'agir de paléokarst, remplis par des argiles ou laissés vides. Dans notre étude la porosité karstique peut se rencontrer à l'échelle des carrières de pierre de taille, mais ces niveaux sont inaptes à l'utilisation en construction ou ne sont pas commercialisables. Ce type de porosité ne se rencontrera donc pas dans les blocs mis en œuvre.

Cette classification de la porosité montre bien que la taille, la nature et les propriétés des pores des calcaires sont fonctions de la nature sédimentologique de la roche : taille et nature des grains, présence de matrice ou de ciments. Elle met en évidence que la porosité d'un calcaire est nettement liée aux phases diagénétiques qu'il a enregistré : obturation de la porosité par des cristallisations ou des recristallisation, phases de dissolutions de la calcite ou de l'aragonite…

Donc, l'étude fine du microfaciès d'un calcaire et l'analyse des ses composants sédimentologiques et diagénétiques donnent de nombreuses indications qualitatives sur la porosité : facteurs qui la contrôlent, morphologie du réseau poreux. Afin de visualiser cette organisation des différents types de pores, nous utiliserons donc l'analyse sédimento-diagénétique pour compléter les mesures quantifiées de la porosité.

-3/ Autres termes descriptifs de la porosité :

- Porosité **occlue** : il s'agit d'espaces poreux totalement déconnectés du réseau poreux et non accessibles aux fluides mouillants (même au mercure sous pression). Dans les calcaires la porosité occlue est quasiment négligeable (Bousquié, 1979 ; Rémy, 1993). De plus, comme elle est totalement déconnectée du réseau poreux, son importance dans la dégradation de la roche est quasiment nulle. Nous considérerons donc ce type de porosité comme négligeable.

- Porosité **libre** et porosité **piégée** : ici encore, il s'agit de la caractérisation d'une fraction de la porosité en fonction de son comportement vis-à-vis des fluides mouillants. La porosité libre se sature en fluide mouillant et celui-ci sera totalement restitué lors de la désaturation du milieu. La porosité piégée a un comportement différent car soit elle ne se sature pas en fluide lors de l'imbibition du milieu, soit elle ne restitue pas les fluides lors du drainage. Les pores ayant une porosité piégée sont classiquement des pores à trois dimensions dont les tailles d'accès sont réduites sont réduites par rapport à la dimension totale du pore, ou des milieux où les circulations de fluides mouillant sont difficiles.

- Porosité **interconnectée** ou **non connectée** : les macropores pourront être connectés entre eux par de petits pores capillaires de forme globalement cylindrique (mauvais degré de connexion) ou alors ils se connecteront directement les uns avec les autres (fort degré de connexion). Un fort pourcentage de porosité piégée peut indiquer que les pores sont mal connectés, mais il faut surtout relier le taux de connexion de la porosité au degré de perméabilité aux fluides.

- Porosité **initiale** dite aussi porosité **primaire** / porosité **acquise** dite aussi porosité **secondaire.** La porosité primaire est une porosité que le sédiment possédait lors de son dépôt ou de sa formation, par exemple entre les grains ou à l'intérieur des organismes creux. Par contre, la porosité secondaire s'est formée au cours de l'histoire du calcaire soit par des phases de dissolution ou de fracturation. L'histoire d'un calcaire montre très souvent une alternance entre des phases de diminution de la porosité (poronécrose par compaction, cimentation…) et des phases de création de porosité (porogenèse par dissolution, fissuration…). Ainsi, la porosité primaire pourra être partiellement ou totalement obturée par des phases diagénétiques postérieures.

Remarque : Choquette et Pray (1970) différencient trois étapes diagénétiques qui se retrouvent dans l'évolution de la porosité après le dépôt du sédiment : l'éogenèse, la mésogenèse et la **télogenèse**. Mais cette différenciation est peu utilisée car il est en général difficile de dater les phases de diagenèse. La télogenèse comprend les étapes de diagenèse qui sont liées à des discontinuités sédimentaires principales, c'est à dire des modifications du calcaire qui ne sont aucunement liées au sédiment lui-même, mais à des événements indépendants qui se produisent postérieurement : comme une émersion, une mise à l'affleurement… Dans le cadre de cette étude, les phases diagénétiques observées lors de l'altération en

œuvre correspondent à des phases d'altérations très tardives voire actuelles. Elles entrent donc de fait dans la définition du stade télogénétique de ces auteurs.

-4/ Méthodes d'études de la porosité :

La porosité d'une roche peut-être mesurée par un très grand nombre de techniques, nous ne signalerons ici que les méthodes utilisées durant ce travail ou auxquelles il sera fait référence (pour plus de détails se reporter à Bousquié, 1979 et Rémy, 1993).

- L'immersion totale dans le mercure : ce procédé de mesure de la porosité est très simple et très rapide à mettre en œuvre. Un échantillon sec de masse Ms connue est immergé dans un godet rempli de mercure (ménisque débordant) et la mesure du volume de mercure récupéré lors de l'immersion de l'échantillon permet de connaître le volume de celui-ci. La mise en rapport du volume et de la masse mesurés avec la masse volumique de la matière qui compose l'échantillon (déterminée au picnomètre) permet de calculer sa porosité.

- La porosimétrie au mercure : cette méthode, relativement complexe à mettre en œuvre, consiste à faire pénétrer du mercure dans un échantillon en exerçant des pressions croissantes. Le poids et le volume de l'échantillon étant connus, la mesure de la quantité de mercure qui pénètre dans la roche permet de mesurer la taille d'accès aux pores envahis par le mercure en utilisant la loi de Laplace (qui dans ce cas équivaut globalement à : Pression capillaire = 75000 / Rayon d'accès du pore). Quand l'échantillon est saturé en mercure, une décompression par paliers fait ressortir une partie du mercure injecté et ce retrait de mercure permet de calculer la part de porosité piégée de l'échantillon (Rémy, 1993). Cette méthode permet donc de mesurer la porosité totale le la roche, mais en plus, elle caractérise finement le réseau poreux : taille d'accès aux pores , pourcentage de porosité piégée, mais doit être complétée par d'une caractérisation de la morphologie du réseau poreux (Bousquié, 1979 ; Rémy, 1993 ; Géraud *et al.,* 1993).

- La dynamique de prise d'eau par capillarité : l'imbibition progressive d'un échantillon par sa base permet de mesurer la vitesse d'ascension de l'eau au cours du temps. Le coefficient de perméabilité k de l'échantillon peut alors être calculé ainsi que sa dynamique de prise d'eau (matérialisée par la pente de la courbe du volume d'eau absorbée par centimètres carrés et unité de temps) et son coefficient de saturation au cours du temps.

- La vitesse des ondes acoustiques : la vitesse des ondes est un bon indicateur de la porosité des matériaux et de leur état de fissuration (Bousquié, 1979 ; Rémy, 1993). La continuité du milieu est définie par l'indice de continuité (IC = Vitesse mesurée / Vitesse théorique du solide) qui dépend des porosité de pores et de fissures. Le relation entre la vitesse des ondes acoustiques et la porosité permettant finalement de différencier la porosité de pores et la porosité de fissures.

- L'analyse d'images : la mesure de porosité à partir des images de lames-minces obtenues au microscope optique ne permet que la quantification de la macroporosité, l'utilisation de résines colorées ou de processus de transformation mathématiques : fermetures, watershed…, permettant d'améliorer la quantification de la porosité ou de la modélisation de l'espace poral (voir **Annexe 1**).

Microfaciès de référence (caractérisation et représentation graphique)

L'analyse de la composition sédimentologique et diagénétique d'un calcaire aboutit à la caractérisation des éléments figurés constitutifs de la roche ainsi que des différentes phases de liaison (matrices et ciments). De plus, ce type d'étude permet de caractériser le milieu poreux, en rapprochant la valeur et la nature de la porosité aux étapes de poronécrose ou de porogenèse (cimentation, dissolution, fracturation…) ou à la texture et la structure du calcaire (matrice micritique, éléments micro ou macroporeux…).

Dans une étude pétrographique dont le but est de préciser le cadre sédimentologique (nature de l'environnement de dépôt et des phases de diagenèse précoce), la caractérisation sera exhaustive et précise (utilisation de la microscopie sous luminescence, mesure des isotopes stables de l'oxygène et de l'azote…). Mais dans ce travail, nous avons insisté sur la relation entre les caractéristiques de la roche en tant que matériau et sa nature sédimento-diagénétique. Nous avons donc défini des microfaciès de référence, en déterminant le type d'élément figuré et les phases de diagenèse qui conditionnent la nature de la roche.

Ces microfaciès de référence sont définis par un cartouche composé de logo et des principales caractéristiques sédimentologiques et pétrophysiques du calcaire (Fig. 7) :

- Le nom de la formation sédimentaire d'origine ainsi que son âge stratigraphique.

- La nature du principal type d'élément figuré et de la principale phase de liaison (matrice ou ciment) ainsi que le nom de ce calcaire selon les classifications de Folk (1959) et Dunham (1962).

- La nature des différents types de pores selon la classification de Choquette et Pray (1975) ainsi que la valeur de la porosité totale en différenciant éventuellement la microporosité et la macroporosité.

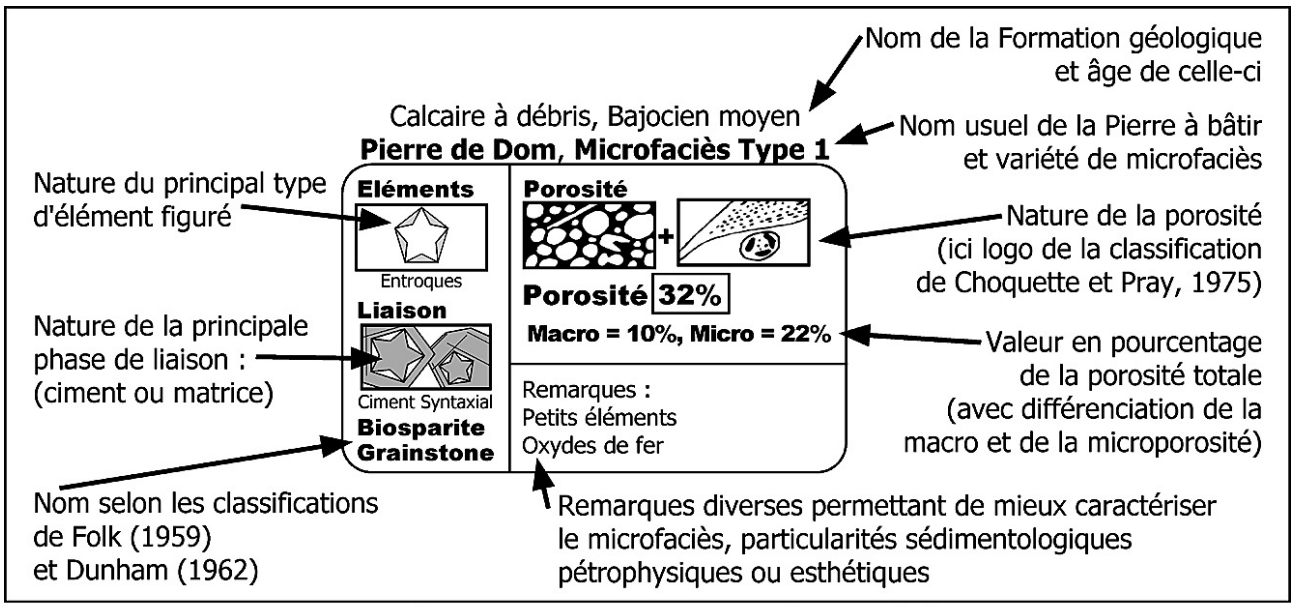


Fig. 7 : Définition d'un microfaciès de référence (matérialisé par un cartouche : logo + caractéristiques)

Altérations de la pierre en œuvre :

Nous décrirons ici brièvement les différentes dégradations qui affectent les calcaires en œuvre, pour plus de précision se reporter à l'Annexe 2 : altérations en œuvre.

Classifications des altérations en œuvre :

Les altérations en œuvre (« maladies de la pierre ») peuvent se classer selon deux approches : selon l'étude de la morphologie macroscopique des dégradations (desquamations, encroûtements, désagrégation…) ou selon les différents processus d'altération (chimiques, physiques, biologiques…).

- Classification selon les processus d'altérations : cette différenciation est complexe car les dégradations sont souvent le résultat de processus cumulés, contrôlés par de nombreux paramètres. Par exemple : les desquamations sont la formation de plaques ou de feuillets dus à la microfissuration laminaire de la roche. Ces microfractures sont principalement causées par la pression due à la cristallisation de sels de calcium (Arnold et Zehnder 1989) : processus chimique. Mais, selon leur état hydraté ou déshydraté, certains minéraux (comme le gypse) peuvent fortement se dilater, ils exercent eux aussi des pressions sur la roche et causent une fracturation alors liée à des processus physiques (Pauly 1996).

- Classification selon la morphologie macroscopique des dégradations : Dans un premier temps, nous ne rapporterons pas les altérations à un processus de dégradations particulier. Nous préférerons utiliser cette classification pour plusieurs raisons. Premièrement, elle s'intègre parfaitement dans une démarche rapide d'observation des altérations et ne demande pas une fine analyse des causes au cas par cas, elle peut donc s'utiliser directement sur le terrain. Deuxièmement, les morphologies macroscopiques des altérations

peuvent souvent être rapportées aux processus d'altérations en poussant l'analyse et en confrontant les résultats des observations avec la classification des altérations en fonction des processus (Annexe 2).

Dans cette étude, les altérations observées en œuvre seront donc classées selon leur morphologies macroscopiques, ces classes de dégradations ne sont rapportées à des processus d'altérations que lorsque les interactions entre ces derniers pourront être déterminées. Les termes correspondant aux processus seront différenciés par une mise en *italique*, alors que les morphologies caractéristiques d'une altération seront soulignées. Nous utiliserons ainsi une classification des altérations en fonction de leur morphologie :

1/ encroûtements et patines se formant à la surface des blocs

2/ dissolutions : généralisée à toute la surface ou localisée : ravinements

3/ desquamations : débit en mille-feuilles ou en plaques : exfoliations

4/ désagrégation : perte d'éléments ou de petits groupes d'éléments (ordre centimétrique et inférieur)

5/ fragmentation : perte d'une partie d'un bloc (débris d'ordre centimétrique et supérieur)

Les données bibliographiques et les caractéristiques générales de ces 5 types d'altérations sont principalement décrites dans **l'Annexe 2**. Mais nous insisterons ici sur quelques aspects de l'altération en œuvre et sur l'état des connaissances sur ce sujet.

Relations entre microclimats d'exposition et altérations :

L'altération développée en œuvre peut être liée à de nombreux facteurs externes : conditions d'exposition et composition de l'atmosphère ambiante, microclimat et conditions climatiques, position dans la construction, caractéristiques architecturales… (Sansom-Gombert, 1991, Philippon, 1992) Les paramètres les plus importants sont ceux qui contrôlent les circulations d'eau à la surface des blocs et dans la roche : exposition à la pluie, remontées capillaires, ruissellements…

L'exposition aux pluies battantes favorise les dissolutions de surface et le ravinement, le ruissellement érode les zones externes de la roche et provoque la migration des sels. Dans les zones abritées, les particules d'origine atmosphérique s'accumulent, les sels de calcium cristallisent en surface ou peuvent épigéniser la calcite. Des croûtes noires (Jeannette, 1981 ; Gobbi *et al.*, 1995 ; Sabbioni, 1995 ; Sabbioni *et al.*, 1998) comprenant de nombreuses cendres volantes (Ausset *et al.*, 1989, 1991a et 1991b, 1992 et 1994) ou des croûtes blanches (recristallisation de calcite) peuvent se développer. Dans les zones humides à la périphérie des lessivages par la pluie, les croûtes peuvent dépasser un centimètre d'épaisseur (Del Monte et Furlan 1995).

Aux endroits soumis aux cristallisations de sels de calcium (d'oxalates ou de gypse), les blocs sont fissurés ou desquamés. Ces dégradations sont dues aux pressions exercées par l'eau lors du gel ou lors de la cristallisation de minéraux, ou bien elles résultent des gonflements des sels lors de leur hydratation.

Enfin, il est fréquemment démontré que la pollution tend à amplifier ces dégradations (Furlan et Girardet, 1989 ; Camuffo et Bernardi, 1990) : apports d'éléments chimiques (acidification de l'eau (Bell, 1993), dépôt de particules qui catalysent ou provoquent les réactions telles les cendres volantes contenant du vanadium (Ausset *et al*, 1992). Mais elle peut aussi provoquer l'augmentation des dégradations en modifiant les populations d'organismes à la surface des bâtiments (Krumbein et Gorbushina, 1994).

L'importance de la porosité :

De nombreuses dégradations sont fonctions de la pénétration de l'eau dans la roche, la porosité est donc un facteur essentiel pour estimer la durabilité en œuvre d'un calcaire (Gérard, 1985 ; Punuru *et al.*,, 1990, Rémy, 1993). Pourtant, si l'importance de la porosité totale est un facteur déterminant, la taille des pores, leur interconnexion ainsi que leur distribution dans le calcaire sont aussi d'une importance capitale : la Pierre de Savonnières par exemple n'est pas gélive alors qu'elle peut avoir une porosité totale supérieure à 40%. Dans ce cas, les pores d'une taille supérieure à 1µm ont tendance à protéger la roche du gel car ils seront rarement saturés en eau et l'air résiduel dissipe la baisse de température et diminue l'effet de gel (Lautridou et Ozouf, 1987). La taille des pores et la morphologie du réseau poreux ont aussi une influence sur les dégradations engendrée par les sels. Un fin réseau de micropores interconnectés facilite les transferts de fluides par capillarité, et rend la roche très sensible aux cristallisations salines car les pressions exercées provoqueront rapidement la microfissuration du bloc (Bromblet 1989). Certains auteurs (Gauri *et al.*, 1988 ; Chowdhury *et al*., 1990) signalent même que la présence d'un réseau avec de nombreux resserrements et des pores en « goulots de bouteille » faciliteraient la cristallisation des sels.

Remarque : Les relations entre les altérations, les microclimats d'exposition et les environnements de mise en œuvre ont fait l'objet d'un très grand nombre d'études et de nombreux ouvrages synthétiques traitent de ce sujet (voir Annexe 2). Dans ce travail, nous avons tenus compte de ces études afin d'essayer de différencier les altérations (mécanismes et morphologies résultantes) qui sont directement liées à cette relation Roche / Agressivité du milieu d'exposition de celles dont le développement est visiblement conditionné par la nature de la roche elle-même. Pour plus de détails soit sur les caractéristiques des principaux types d'altération en œuvre soit sur l'importance des paramètres externes dans le développement d'une altération en œuvre se reporter à **l'Annexe 2 : les altérations des calcaires en œuvre,** ainsi qu'aux données bibliographiques indiquées.

Chapitre 1 :

Caractérisation des calcaires

- Inventaire des Pierres à bâtir utilisées en Champagne-Ardenne
- Caractérisation des calcaires étudiés
    - Le Calcaire à débris
    - L'Oolithe vacuolaire
    - Le Calcaire grossier
    - Autres calcaires étudiés (cités à tire de comparaison)

CHAPITRE 1 : Caractérisation des calcaires étudiés

Inventaire des Pierre à bâtir calcaires utilisées en région Champagne-Ardenne :

La région Champagne-Ardenne possède une grande variété de roches calcaires, d'âges et de natures variées (voir Introduction). Or, pour mener à bien ce travail, nous devions nous focaliser sur un nombre limité de calcaires aux faciès typés et différents. Il fallait donc sélectionner judicieusement les pierres que nous allions étudier. Dans ce but, nous avons dressé un inventaire exhaustif des pierres à bâtir calcaires utilisées ou extraites dans la région Champagne-Ardenne en essayant pour chaque roche de préciser :

- L'âge des formations géologiques exploitées : en effet, les roches exploitées en Champagne-Ardenne peuvent avoir un âge compris entre le Dévonien (-385 m.a.)et le Stampien (- 35 m.a.) ;

- La localisation sommaire des différents sites d'extraction : pour connaître l'importance du bassin carrier et sa localisation géographique dans ou hors de la région ;

- La caractérisation sommaire du faciès du calcaire : afin de correspondre à notre problématique, les roches étudiées devaient présenter des faciès bien typés : calcaire oolithique, bioclastique, micritique… ;

- Une estimation de l'importance de l'utilisation de chaque roche et du nombre de bâtiments construits dans cette pierre : afin de pouvoir étudier son comportement en œuvre à grande échelle et éliminer les pierres à bâtir à distribution restreinte.

De plus, nous avons procédé au regroupement des appellations globalement identiques sous le nom de la formation géologique dont elles sont issues. Par exemple, Pierre de Savonnières et celle de Brauvilliers proviennent en fait de la même formation calcaire à savoir l'Oolithe vacuolaire. (Pour plus de détails sur ces formations se reporter à la « Synthèse géologique du Bassin de Paris, Collectif, BRGM, 1980).

En classant les pierres du Nord vers le Sud, nous obtenons donc l'inventaire suivant (Fig 8) :

Calcaires récifaux du Givétien :

Pierre brune ou Pierre bleue. L'âge de la roche est Givétien (Dévonien Moyen). Ces calcaires durs sont extraits de quelques carrières autour de la ville de Givet, au Nord de la Champagne-Ardenne dans la pointe ardennaise, à la frontière franco-belge. Ils présentent un faciès bioclastique très recristallisé (calcaire de l'ère primaire) avec des veines de calcites et une porosité très faible. Ce calcaire bioclastique compact de couleur brune, gris-bleutée à noirâtre est utilisé pour la construction de bâtiment dans le nord du département des Ardennes, et a été commercialisé à grande échelle comme pierre de dallage et de bords de trottoirs.

Calcaire de Romery :

D'âge Sinémurien moyen, la Pierre de Romery n'était exploitée que dans quelques carrières de la commune de Romery, à quelques kilomètres à l'Est de Charleville-Mézières. De faciès très gréseux, les bancs peuvent contenir plus de 50% de grains de quartz cimentés par une calcite microcristalline et même passer verticalement à de véritables sables. La zone d'utilisation de la Pierre de Romery fut limitée, ces calcaires gréseux se rencontrant principalement dans les remparts de Charleville-Mézières et Sedan.

Calcaire à débris :

Pierre de Dom-le-Mesnil, Pierre de Saint-Martin. Ce Calcaire de couleur brun-rouille, réputé gréseux, présente une très forte porosité. L'âge de la formation est Bajocien moyen. Les carrières sont localisées au sommet de la cuesta sud de la Meuse entre Charleville-Mézières et Sedan, le plus grand nombre se trouvant sur la commune de Dom-le-Mesnil. Ce calcaire (en réalité « bioclastique ») a été exploité intensivement et fut utilisé dans tout le nord des Ardennes (sauf la pointe de Givet à partir de Revin) en particulier pour la construction de la « Place ducale » à Charleville-Mézières.

Calcaires sub-oolithiques blancs :

Pierre de Chémery, Pierre du Fond d'enfer à Bulson, Pierre de Bulson. Ces niveaux ne possèdent pas de nom de formation bien définie, même si un nouveau découpage stratigraphique, en cours d'élaboration propose le nom de Formation de Chémery (Thiry-Bastien *et al.,* 1999). Ils furent exploités dans la vallée de la Bar et particulièrement dans une haute carrière souterraine à Chémery. Ces calcaires micritiques du Bathonien Moyen sont parfois marneux et contiennent des niveaux à brachiopodes (*Burmirhynchia decorata*) ou des concrétions algaires. Seuls les bancs durs étaient véritablement exploités et leurs zones d'utilisation est relativement limitée : vallée de la Bar et communes proches de la vallée de la Meuse (Douzy, Ponts de Sedan…).

Calcaires coralliens (« Argovien ») :

Les calcaires coralliens de l'Oxfordien supérieur des environs de Rethel : Novion-Porcien, Saulces-aux-Tournelles, Vaux-Montreuil ont été exploités pour la chaux, pour l'amendement et le remblai, mais nous supposons qu'ils ont aussi été utilisés localement pour la construction. Mais l'absence de données sur l'utilisation et la mise en œuvre de ces calcaires micritiques à éléments coralliens (et/ou à oolithes) ne nous permettent pas de préciser l'étendue réelle de leur utilisation : utilisation dans l'église de Neuvizy, à Novion-Porcien.

Craie turonienne :

Les carrières de craie turonienne (Crétacé supérieur) sont nombreuses dans le Porcien et dans les environs de Rethel. Cependant l'utilisation pour la construction de cette craie blanche à silex est limitée, souvent délaissée au profit de la brique (comme dans les églises de Thiérache ardennaise).

Calcaire grossier :

Pierre de Courville, de Romain, de Magneux, de Vandeuil, d'Hermonville, de la Villette pour la région rémoise ; Pierre de Noyant, de Saint-Pierre-l'Aigle pour la région Soissonaise, Pierre de Laon, de Vendresse, de Colligis, de Bièvres, de Montenault pour le Laonnais…

Les pierres citées précédemment ne sont que quelques exemples de la richesse et de la diversité encore trop mal connue des pierres à bâtir de la formation du Calcaire grossier (Lutétien moyen). Ces calcaires micritiques à foraminifères (surtout des Milioles) sont aussi connus pour contenir de remarquables gastéropodes (dont *Cerithium giganteum*) et pour leur utilisation dans les cathédrales gothiques d'Ile de France. Les anciens sites d'exploitation sont très nombreux et il existe encore quelques carrières en activité, dont la carrière St-Julien à Courville dans la Marne. Leur utilisation est primordiale dans tout le centre du bassin de Paris à l'intérieur d'une zone comprenant Reims, Laon, Noyon, Creil, Mantes et bien sûr Paris.

Calcaire de Vertus :

Pierre de Faloise ou des Faloises. Le faciès, les sites d'extraction et d'utilisation de ce calcaire bioclastique parfois très grossier ont été très bien étudiés par F. Mégnien (notice de la carte géologique de Vertus, 1977) et par A. Blanc (Blanc, 1992 et 1994). Ce calcaire actuellement considéré comme « Dano-Montien » est constitué de ciments calcitiques palissadiques jointifs qui entouraient initialement des bioclastes ultérieurement dissous (aspect très poreux). Les quelques carrières de cette formation se situent à l'Est de Vertus et sur la butte du Mont-Aimé au Sud ; les sites d'utilisations sont relativement rares : églises de Vertus et Bergères-les-Vertus, façade occidentale de Notre-Dame-en-Vaux de Châlons-en-Champagne.

Craie sénonienne :

Les carrières de craie sénonienne furent sans doute nombreuses par le passé, mais le remembrement des riches terres agricoles de Champagne et l'abandon de l'utilisation de la craie comme matériel de construction font que ces sites sont aujourd'hui très rares. La carrière de la Veuve, à Chépy, fut la dernière à rester en activité et permet encore d'observer quelques blocs laissés à l'abandon. La craie, calcaire nanogrenu essentiellement formé de coccolithes, possède des caractéristiques très particulières (porosité, capillari-

té…), elle fut exploitée dans toute la région de Châlons-en-Champagne à Vitry-le-François et cette zone compte encore de nombreux bâtiments en Craie de Champagne.

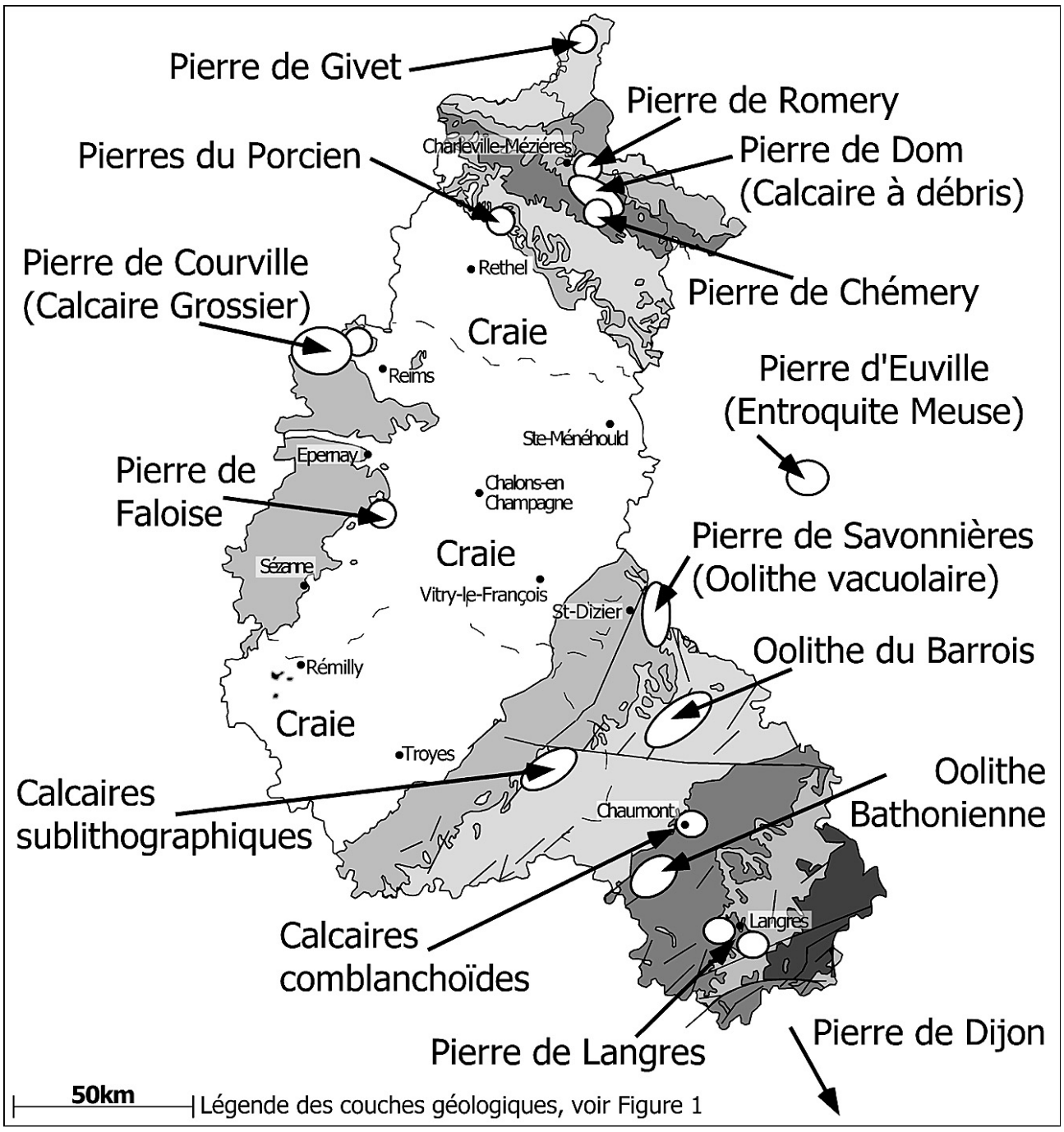


Fig. 8 : Principaux groupes de calcaires utilisés pour la construction en Champagne-Ardenne

Calcaires à entroques de la Meuse :

Le terme « Entroquite de la Meuse » regroupe la Pierre d'Euville, Pierre de Lérouville, Pierre de Sorcy, Variété du Moulin à vent… Ces célèbres calcaires blancs à entroques (d'où le nom d'entroquites) proviennent de la région de Commercy (Meuse) et datent de l'Oxfordien moyen (Jurassique supérieur). Le

bassin carrier est de très grande envergure : à Euville, lors de la grande époque d'exploitation des différentes carrières, plus de 1000 ouvriers y travaillaient. Ces pierres à bâtir ont été utilisées à l'échelle internationale (nombreux sites d'utilisation à Bruxelles) et elles se retrouvent dans toutes les grandes villes de Champagne-Ardenne (Reims, Charleville-Mézières…).

Oolithe vacuolaire

Pierre de Savonnières, de Brauvilliers, de Chévillon, de Combles, d'Haironville, de Ville-sur-Saulx… Ces calcaires oolithiques de la fin du jurassique (Tithonique) se rencontrent entre Joinville, St-Dizier et Bar-le-Duc, chevauchant la limite entre les départements de la Meuse et de la Haute-Marne. Les sites d'extractions sont très nombreux et répartis sur une dizaine de communes, il existe d'ailleurs trois carrières en exploitation pour la pierre de taille. Les diverses pierres à bâtir exploitées ont eu une distribution nationale (voire internationale avec notamment un fort commerce avec la Belgique), les bâtiments construits en Oolithe vacuolaire sont donc très nombreux et répartis dans toutes les grandes villes de la région.

Oolithe du Barrois

Oolithe de Bure, Pierre de Gudmont… Nous regroupons ici, sous le terme Oolithe du Barrois tous les calcaires oolithiques à matrice micritique datant du Jurassique supérieur (Oxfordien, Kimméridgien et Tithonique) dont les affleurements se situent entre Saint-Dizier et Chaumont (à l'Est) et entre Chateauvillain et Bar-sur-Aube (à l'Ouest). L'utilisation de ces calcaires, parfois gélifs, fut très locale, mais comme les affleurements sont nombreux le long de la Côte des Bars, ces oomicrites relativement tendres se rencontrent ponctuellement en œuvre.

Calcaires sublithographiques du Barrois

Pierre de Bar-sur-Aube et assimilées. Provenant eux aussi du Jurassique supérieur de la Côte des Bars, ces dismicritiques (calcaires mudstones) se rencontrent rarement dans les constructions, mais ont pu être exploités localement.

Calcaire « comblanchoïde »

Pierre de Chaumont (dite de la Maladière), Pierre de Brainville. Ces calcaires micritiques rosés à oncolithes et tapis algaires ont une nature sédimentologique et une position stratigraphique (Bathonien moyen) proche de la Pierre de Comblanchien exploitée en Bourgogne. Notons aussi qu'il s'agit du même niveau stratigraphique que les calcaires sub-oolithiques de la vallée de la Bar (Pierre de Chémery), et que l'on y retrouve les mêmes niveaux à *Burmirhynchia decorata.*

Oolithe bathonienne

Pierre d'Arc-en-Barrois, Pierre de Bugnières, Pierre de Villers-sur-Suize (dite de Leffonds). Le faciès de ces pierres de taille est nettement plus granulaire que les précédents. Il s'agit parfois d'un oosparite à litages obliques ressemblant à la Pierre de Ravières ou la Pierre de Massangis, dans l'Yonne, mais avec des bancs de puissance nettement plus faible. Leur utilisation est locale et les carrières reconnues sont toutes situées dans la région d'Arc-en-Barrois.

Calcaires bajociens de Langres

Pierre de Balesmes, Pierre de Rolampont. Les carrières des sources de la Marne et du Nord-Est de Langres ont fourni des calcaires de couleur rousse. Ces calcaires bioclastiques à grandes entroques sont généralement très dolomitisé, ils s'organisent en litages obliques de grande amplitude et présentent de grandes variations de microfaciès (ainsi que de taux de dolomitisation). Ces pierres de taille ont été utilisées dans toutes les communes entourant le plateau de Langres. Les carrières sont encore visibles et l'une d'elles a été de nouveau mise en exploitation afin de restaurer les remparts de Langres (Carrière de St-Ciergues).

Oolithe de Bourgogne

Pierre de Dijon-Corton, Pierre de Ladoix. En marge de la région Champagne-Ardenne, mentionnons tout de même ces calcaires oolithiques nets aux litages obliques marqués (d'âge Callovien inférieur). En effet leur utilisation dans de nombreuses constructions de la région dijonnaise permet d'observer leur comportement en œuvre dans de bonnes conditions et leur faciès « homogène » est caractéristique des calcaires oolithiques.

Choix des calcaires étudiés (sélection ou élimination) :

Pour ce travail, nous avons choisi de nous limiter à l'étude de 4 à 5 types de calcaires. Une fois que l'inventaire des pierres à bâtir champenoises fut établi, nous avons donc éliminé ou sélectionné ces calcaires, en réduisant progressivement leur nombre. Nous avons premièrement choisi d'étudier le Calcaire grossier car cette pierre à bâtir est omniprésente à Reims et elle présente de fortes altérations en milieux urbain (cathédrale de Reims notamment). Puis pour étudier un faciès opposé au calcaire micritique à foraminifères qu'est la Pierre de Courville, nous avons ensuite sélectionné l'Oolithe vacuolaire puisqu'il s'agit d'un calcaire oolithique très granulaire et fortement macroporeux.

Ensuite, le choix fut plus complexe, nous voulions un calcaire à composante bioclastique et la Pierre de Faloise nous a semblé un bon exemple. Mais nous l'avons éliminé jugeant que les sites d'extraction et

d'utilisation étaient trop limités et que puisque les coquilles d'organismes y étaient dissoutes, nous ne pouvions étudier leur impact dans l'évolution en œuvre du calcaire. Nous avons donc sélectionné l'Entroquite de la Meuse, un calcaire à gros entroques massivement utilisé dans toute la région.

Enfin, pour compléter l'étude, nous avons décidé d'étudier un calcaire gréseux afin d'analyser l'importance des grains de quartz sur le comportement en œuvre d'un calcaire. Deux calcaires ardennais semblaient convenir : la Pierre de Romery et la Pierre de Dom, or la Pierre de Romery trop proche d'un grès et trop peu utilisée fut rapidement éliminée au profit du Calcaire à débris bajocien. Mais, la Pierre de Dom, malgré son aspect sablonneux, n'est pas un calcaire gréseux, il s'agit en effet d'un calcaire biodétritique à débris d'échinodermes. Notre exemple de calcaire gréseux sera donc constitué par certains microfaciès du Calcaire Grossier : à bioclastes et nombreux grains de quartz.

Puis, afin d'établir des points de comparaison avec l'Oolithe vacuolaire, nous avons décidé d'étudier le comportement en œuvre de l'Oolithe bourguignonne car son faciès est plus typique d'un calcaire oolithique que la Pierre de Savonnières. Enfin, dans le but de compléter notre analyse, nous avons procédé à des observations ponctuelles des formes d'altération développées par les calcaires sublithographiques du Barrois, la Pierre de Givet, la craie de Champagne et le calcaire à entroques de Langres. Nous avons alors choisi d'étudier en détail le Calcaire à débris, dont les carrières situées en Champagne-Ardenne n'ont pas réellement fait l'objet d'analyses sédimentologiques ou pétrophysiques. Et pour des questions de temps, nous avons limité l'analyse des affleurements des entroquites oxfordiennes, par ailleurs déjà très étudiées (Humbert, 1971 ; Enay et Boullier, 1981 ; Rémy, 1993…).

Nous avons donc finalement retenus 7 groupes de calcaires (voir localisation Fig. 8), dont 3 seulement ont été étudiés dans le détail : le Calcaire à débris, l'Oolithe vacuolaire et le Calcaire Grossier. Cette dernière formation contenant en réalité plusieurs faciès dont des calcaires nettement micritiques et des calcaires gréseux… Les 4 autres groupes de calcaires sont utilisés pour compléter l'étude et comprennent : les calcaires à entroques de la Meuse (Pierre d'Euville), les calcaires micritiques du Barrois, la Pierre de Givet du primaire ardennais et la Pierre de Dijon.

1/ le Calcaire à débris :

Pierre de Dom-le-Mesnil et pierres assimilées

a/ Sites d'affleurements

1 : Cadre géographique et géologique

Les affleurements et les diverses carrières de Calcaire à débris se situent dans le département des Ardennes (08), au sommet de la rive sud de la Meuse entre Charleville-Mézières et Sedan, Fig. 9. La zone d'exploitation intensive de ces pierres à bâtir se trouve localisée à Dom-le-Mesnil, village qui a donné le nom usuel le plus répandu de cette roche : la Pierre de Dom.

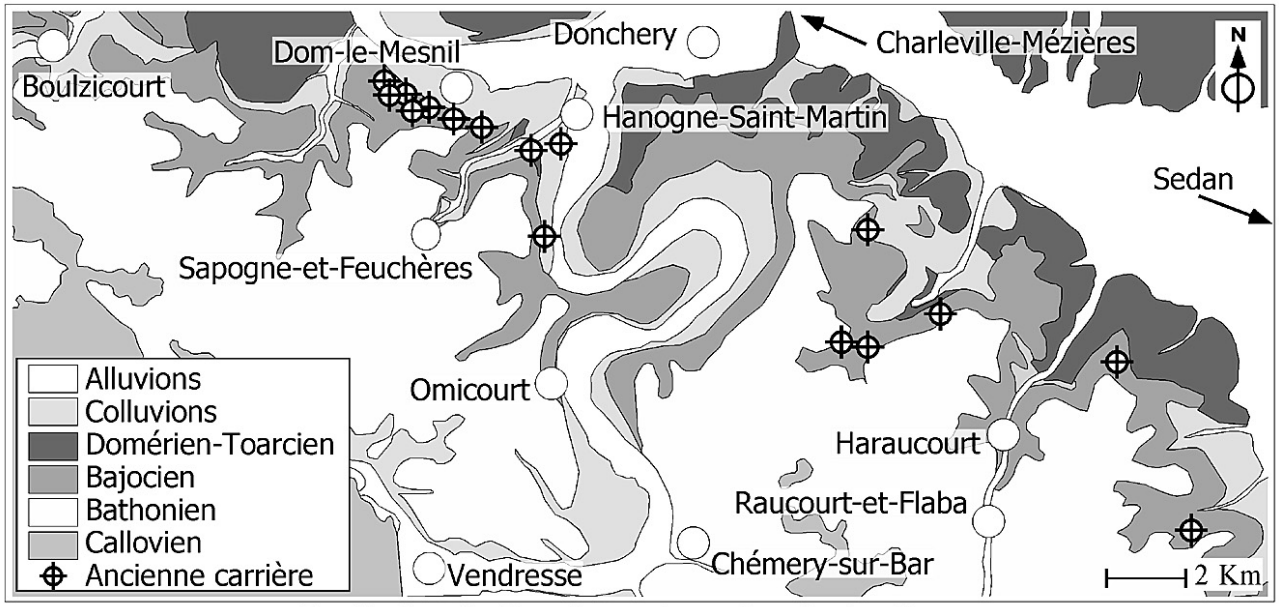


Fig. 9 : Localisation des anciens sites d'extraction
Formation du Calcaire à débris, Bajocien moyen

L'âge de la formation est Bajocien « moyen », les sous-zones à *humphriesanum* et à *balgdeni* ont été mises en évidence mais la rareté des fossiles à valeur biostratigraphiques ne permet pas d'apporter plus de précision à sa datation (pas de corrélation entre les carrières).

Stratigraphiquement, le calcaire à débris se situe entre une épaisse formation de 60 mètres composée de calcaires en plaquettes parfois oolithiques contenant quelques niveaux marneux et gréseux (attribuée à Bajocien inférieur, zone à *sauzei* (Ardaens *et al.*, 1983a) ; et la formation des Calcaires à *Ostrea acuminata.* Cette der-

nière formation datée du Bajocien supérieur est constituée d'une succession de bancs irréguliers, formés d'une lumachelle à *Ostrea acuminata* (15 mètres). La formation du Calcaire à débris se termine par une surface indurée, légèrement ravinante, perforée et encroûtée par des huîtres plates. Ce type de discontinuité se retrouve d'ailleurs au sommet des différents bancs de calcaire à *O. acuminata*.

2 : Sites d'exploitations

Les anciens sites d'exploitations du Calcaire à débris sont assez nombreux, la commune de Dom-le-Mesnil compte encore de nombreuses carrières dont le front de taille reste accessible. Le répertoire des carrières de pierre de taille de 1889 (Anonyme, 1890) inventorie diverses exploitations sur les communes de Dom-le-Mesnil (11) et d'Hannogne-Saint-Martin (4). D'autres se situeraient sur les communes de Sapogne-et-Feuchères, Omicourt et Bulson (Blanc, 1972 ; Ardaens *et al.*, 1983a). Si la plupart de ces carrières existent encore (voir localisation Fig. 9), elles sont généralement gagnées par la végétation et ne permettent plus d'observer le front de taille dans de bonnes conditions. En effet, globalement, l'exploitation du Calcaire à débris s'est achevée après la seconde guerre mondiale, l'inventaire de Noël, 1970, ne traite pas de la Pierre de Dom et considère qu'elle n'était plus exploitée. Même si des travaux sur le terrain (Blanc, 1972), montrent des traces d'extraction artisanale périodique.

A l'heure actuelle, aucune carrière n'est exploitée dans la formation du Calcaire à débris et les travaux de restauration des bâtiments construits dans ces calcaires utilisent une autre roche : la Pierre de Jaumont (un calcaire oolithique du Bajocien de la région de Metz). Signalons différents sites permettant encore d'observer la roche in-situ et dont les carrières ne sont pas trop gagnées par la végétation :

- Carrière dite « de l'observatoire », au Sud-Ouest de Dom-le-Mesnil : cette grande carrière (site 1Do) fut apparemment la dernière à être exploitée dans les années 70 (Blanc, 1972). Le front de taille, de 13 mètres de puissance, y est encore bien visible. La limite supérieure de la formation est nettement observable tout comme les Calcaires à *Ostrea acuminata* du Bajocien supérieur ;

- Carrière souterraine de Dom-le-Mesnil : sans doute la seule carrière souterraine de cette formation (site 2Do), elle permet l'observation de plus de 10 mètres de Pierre de Dom ainsi que la limite supérieure de la formation. Des paliers d'exploitation permettent l'accès à toute l'épaisseur d'un front de taille en très bon état de conservation. C'est pourquoi, les échantillons qui ont fait l'objet d'une étude pétrophysique (Carion *et al.*, 1999) ont été prélevés sur ce site ;

- Carrières d'Hannogne-Saint-Martin : en 1996, les seules autres carrières de Calcaire à débris dont l'état de conservation permet encore des observations se trouvent dans cette commune ; mais malgré tout, les fronts de taille sont très dégradés et les sites sont envahis par les bois.

3 : Répartition générale des microfaciès

Dans tous les sites de Dom-le-Mesnil, soit une dizaine de carrières visitées et 3 sites d'échantillonnages, les fronts de taille paraissent très homogènes et ce malgré les stratifications obliques entrecroisées. Le faciès est très homogène, les microfaciès sont toujours biosparitiques et seuls varient les pourcentages des différents éléments : débris d'échinodermes et de lamellibranches, quartz et pelletoïdes. On note seulement, vers le sommet de la formation, l'apparition de litages plus marqués ainsi que la présence de gros pelletoïdes micritiques.

Dans tous les sites, le calcaire est coloré par des oxydes et hydroxydes de fer, cette couleur brun-rouille est la principale caractéristique du Calcaire à débris et par conséquent des pierres de taille qui proviennent de la formation : Pierre de Dom, de Saint-Martin… Notons que la quantité d'oxydes de fer augmente vers l'Est et qu'ils forment parfois de véritables croûtes ferrugineuse (Ardaens *et al.*, 1983a et 1983b). Certains sites contiendraient même des accumulations d'oxydes de fer au niveau des plans de diaclases (Communication orale Michel Coulon).

b/ Caractérisation générale du Calcaire à débris

Les données pétrophysiques sur les pierres de taille issues du Calcaire à débris sont relativement rares, la Pierre de Dom n'est pas mentionnée dans les inventaires réalisés par les organismes de restauration (Noël, 1970 ; Le Mausolée, 1976 ou dans l'ouvrage de la documentation française du bâtiment aux Edition du Moniteur (Anonyme, 1980). De plus, nous n'avons pas réussi à obtenir de données effectuées par le CEBTP et l'absence de carrières en exploitation ne permet pas d'obtenir de données récentes par l'intermédiaire des carriers.

Nous utiliserons donc principalement les analyses chimiques de Renard et Richebois (1983) et les mesures pétrophysiques effectuées à notre laboratoire (Carion *et al.*, 1999).

1 : Nature

Le répertoire des carrières de 1889 décrit la Pierre de Dom comme un « calcaire jaune, sablonneux à grain moyen ». L'accent est donc mis sur la couleur de la roche, le terme sablonneux indiquant la présence de grains faiblement cimentés qui se séparent facilement de la masse du bloc. La notion de grain moyen fait référence à la taille des éléments, qui macroscopiquement apparaissent plus gros que leur taille réelle, en effet, le ciment syntaxial (principale phases de liaison) reste solidaire des éléments qu'il englobe. La notice de la carte géologique 1/50 000 de Raucourt et Flaba (Ardaens *et al*, 1983a) indique que le Calcaire à débris est constitué d'une « tendre intrasparite finement gréseuse avec intraclastes de fins débris coquilliers millimétriques » associée à « de minuscules grains de quartz bien classés diffus dans la masse : diamètre moyen 0,3 mm ». Selon la classi-

fication de Folk (1959,1962), les intraclastes sont des débris issus d'un milieu et d'un environnement proche du milieu de dépôt, voire qui se sont formés sur place. Les auteurs insistent donc sur le caractère tendre de la roche et sur son aspect gréseux : en indiquant la taille moyenne des grains de quartz. En revanche, ils ne caractérisent pas véritablement les fins débris coquilliers, ni les autres éléments du calcaire.

Concernant les différentes appellations de la Pierre de Dom, nous ne possédons pas de documents sur les variétés commerciales exploitées et nous considérerons donc que le Calcaire à débris ne fournissait qu'un seul type d'appellation par commune (sans différencier plusieurs qualités de blocs).

2 : Caractéristiques chimiques

Le Calcaire à débris est un calcaire relativement pur : 91 à 95% de $CaCO_3$ selon Renard et Richebois, (1983), 91,9% selon Carion *et al.* (1999). Sa couleur brun-rouille est sa principale caractéristique, elle provient de la grande quantité d'oxydes et d'hydroxydes de fer contenus : (entre 4300 et 5600 ppm de fer).

Echantillon	**CaO_3 (%)**	**Fe (ppm)**	Mg (ppm)	Mn (ppm)	Sr (ppm)	Na (ppm)	K (ppm)	Cr (ppm)
Calcaires à *O. acum*	**96,83**	**3558**	1768	168	426	414	25	3
Sommet formation	**94,1**	**4460**	2805	209	378	331	52	15
Pierre de Dom	**93,04**	**4909**	2457	221	384	966	54	14
Pierre de St-Martin	**91,45**	**4212**	2205	244	439	408	69	8

Tab. 2 : Analyse géochimique du Calcaire à débris, d'après Renard et Richebois, 1983.

D'après ces données (Tab. 2), la concentration en fer est plus faible au sommet de la Pierre de Dom et dans les calcaires à *Ostrea acuminata* que dans les niveaux exploités pour la pierre de taille. De plus, la Pierre de St-Martin (provenant de Hannogne-Saint-Martin) contient en moyenne moins de fer que le calcaire de Dom alors que les auteurs signalent, eux aussi, la présence de croûtes ferrugineuses. Pour la Pierre de St-Martin, on peut supposer qu'une phase diagénétique tardive a remobilisé le fer et a provoqué son accumulation au niveau des barrières de porosité : horizontales (limites de bancs) et verticales (plans de diaclases).

Echantillon	CaCO3 (%)	ρs (g/cm^3)
D3h2	90,7	
D2h1	93,1	
D1h2	90,6	
C4h2	93,4	2,715
B3h2	93,3	
A3h3	90,5	2,718
Moyenne	**91,9**	

Tab. 3 : Calcimétrie (Calcaire à débris, d'après Carion *et al.*, 1999)

Les valeurs de la masse volumique de la Pierre de Dom (Tab. 3) sont légèrement supérieures à 2,71 (masse volumique de la calcite) en dépit de l'existence d'une fraction quartzeuse (masse volumique 2,65). Ces quelques pour-cents de quartz sont donc compensés par les oxydes et hydroxydes de fer.

3 : Caractéristiques physiques et Porosité

	Densité	Porosité totale (%)	Vitesse onde (m/s)	Indice continuité	Porosité fissure
Moyenne Pierre de Dom	1,84	32,2	2550	48	0,5%
Echantillon D2h2	1,98	26,98	3384	51,2	0,28%

La porosité totale de la Pierre de Dom est relativement élevée (environ 32% avec un écart type inférieur à 1%). Le coefficient de saturation de 0,88 (et parfois supérieur à 0,9) indique que cette porosité est bien connectée. Cependant, parmi les 40 mesures de porosité réalisées sur des carottes entières, quelques échantillons diffèrent largement de la moyenne (voir échantillon D2h2 dans le tableau ci-dessus et Fig. 10).

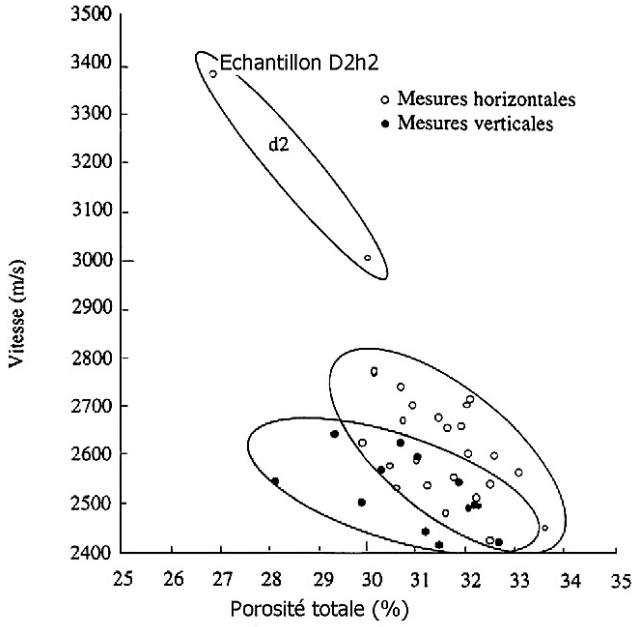


Fig. 10 : Porosité totale et vitesse des ondes acoustiques, Calcaire à débris, Dom-le-Mesnil (08)

Tous les échantillons analysés proviennent de la carrière souterraine de Dom-le-Mesnil, ce calcaire qui paraissait très homogène à grande échelle présente donc quelques variations de faciès.

L'échantillon D2h2 (4,50 mètres au-dessus du sol de la carrière) provient d'un litage oblique beaucoup plus clair que les niveaux qui l'encadrent. Cet échantillon, pétrographiquement différent de la Pierre de Dom de référence est donc aussi caractérisé par une quantité d'oxydes de fer plus faible. Sur un front de taille non altéré par les agents météoriques, les hétérogénéités de microfaciès sont donc soulignées par les oxydes de fer.

	Porosité totale	Coefficient de saturation à 32 jours (par ascension capillaire)
Pierre de Dom Type 1	**32%**	0,88
Echantillon Type 2	**27%**	0,85
Valeur minimale	22,2%	0,79
Valeur maximale	38,3%	0,96

Tab. 4 : Analyse de petits échantillons de Calcaire à débris, Carion *et al.,* 1999

Afin de mieux comprendre les différences entre les deux types d'échantillons et de préciser la variation de la porosité, nous avons scié finement une série de carottes et effectué d'autres séries de mesures (Tab. 4). Il apparaît que les variations de porosité totale sont plus importantes que pour les valeurs mesurées sur les échantillons de grande taille, même si la porosité moyenne est identique. Ceci confirme que la Pierre de Dom analysée à grande échelle est très homogène (porosité moyenne = 32% variant entre 27% et 33,7%). En revanche,

plus l'analyse est faite en détail et plus les différences entre chaque litage apparaissent (de 22,2 à 38,3%). Ainsi, le type référence possède une porosité totale d'environ 32% avec un écart type de 2% alors que la porosité de la Pierre de Dom de type 2 varie beaucoup plus. On observe 16% de différence avec des valeurs atteignant 38%, malgré une porosité globale légèrement plus faible que le faciès référence : 27% au lieu de 32%. Ces grandes différences de porosité totale soulignent la variabilité du faciès entre les différents litages entrecroisés, la compacité variant très rapidement, même si les éléments contenus sont toujours identiques.

Le coefficient de saturation par ascension capillaire au bout de 32 jours (Tab. 4) est une valeur comparable à celles obtenues par saturation en immersion totale (coefficient Hirshwald). Le coefficient de saturation de la Pierre de Dom est très élevé : 0,88 en moyenne. Ce calcaire contient donc peu de macroporosité ou bien celle-ci est très bien inter-connectée avec une faible porosité piégée. Les analyses au microscope optique iront dans le sens de cette deuxième hypothèse (voir figures 12 et 16).

	Porosité totale	Kh (coefficient de perméabilité)	A (g / $cm^2H^{1/2}$)	B (cm / $H^{1/2}$)
Pierre de Dom Type 1	32%	Kh1 : 3,4 ; Kh2 : 2,2	1,4	6
Valeur minimale	22,2%	Kh1 : 1,22 ; Kh2 : 0,96	0,7	4,6
Valeur maximale	38,3%	Kh1 : 5,17 ; Kh2 : 3,11	1,8	8,4
Echantillon Type 2	27%	Kh1 : 1,5 ; Kh2 : 0,96	0,7	4,6
Craie	/	Kh1 : 3 à 12	2 à 4	6 à 10
Tervoux	24,5%	/	1,14	6,1
Pouillenay	6,2%	/	0,04	0
Lérouville	11,2%	/	0,13	3,75

Tab. 5 : Prise en eau par capillarité d'après Bousquié, 1979 et Carion *et al.*, 1999
A = volume d'eau absorbée par cm2 et par heure, B = hauteur atteinte au cours du temps

Les mesures de prise d'eau par capillarité (Tab. 5) montrent des coefficients de perméabilité très importants (en moyenne entre 2 et 5 cm^2/H), ces valeurs sont plus proches de celles de la craie ou d'un calcaire microporeux comme la Pierre de Tervoux que des calcaires granulaires comme les Pierres de Pouillenay ou de Euville - Lérouville. L'étude du microfaciès permettra de préciser les différences de porosité et d'expliquer la nette discrimination de ces échantillons vis-à-vis de la pierre de référence. Nous verrons aussi (à la section d/) que la quantité d'oxydes de fer contenus dans un échantillon (et mesurable en analyse d'images) est effectivement caractéristique de la nature de l'échantillon.

4 : Aptitudes d'emploi

Les différentes pierres à bâtir issues de la Formation du Calcaire à débris ne sont pas mentionnées dans la littérature consultée mais les mesures effectuées durant ce travail nous permettent d'émettre des hypothèses sur leurs aptitudes d'emploi en climat Séquanien. En effet, celles-ci se déterminent par la valeur de la porosité

totale de la roche et son coefficient d'absorption en eau (coefficient Hirshwald) ici « remplacé » par un coefficient de saturation par capillarité à 32 jours (résultats à utiliser avec précautions). Les échantillons du type de référence ont une porosité moyenne de 32% et un coefficient de saturation de 0,89. Ils figurent donc dans la 4ème zone des aptitudes d'emploi (en limite de la zone B) et leur emploi conseillé sera limité à l'élévation (voir Tab. 6 et Fig. 11). Les échantillons moins poreux (porosité : 25%, coefficient de saturation : 0,8) sont placées dans la zone 3 et ont donc des aptitudes d'emploi un peu plus étendues (élévation, bandeau, rejaillissement, corniche et élévation sous saillie). Enfin, le type 2 avec une porosité pouvant atteindre 38% et un coefficient de saturation moyen de 0.85 est placé dans la zone 4 et son utilisation doit donc être limitée à l'élévation.

Zone d'emploi	Pierre de Dom : Zone 3	Pierre de Dom : Zone 4
Rez-de-chaussée	Oui	Oui
Elévation	Oui	Oui
Rejaillissement	Oui	**Non**
Bandeau	Oui	**Non**
Corniche	Oui	**Non**
Elévation sous saillie	Oui	**Non**
Revêtement	Oui	**Non**
Balcon	**Non**	**Non**
Soubassement	**Non**	**Non**
Socle	**Non**	**Non**
Pile en rivière	**Non**	**Non**
Dallage extérieur	**Non**	**Non**
Gargouille	**Non**	**Non**

Tab. 6 : Aptitudes d'emploi supposées de la Pierre de Dom (Calcaire à débris)

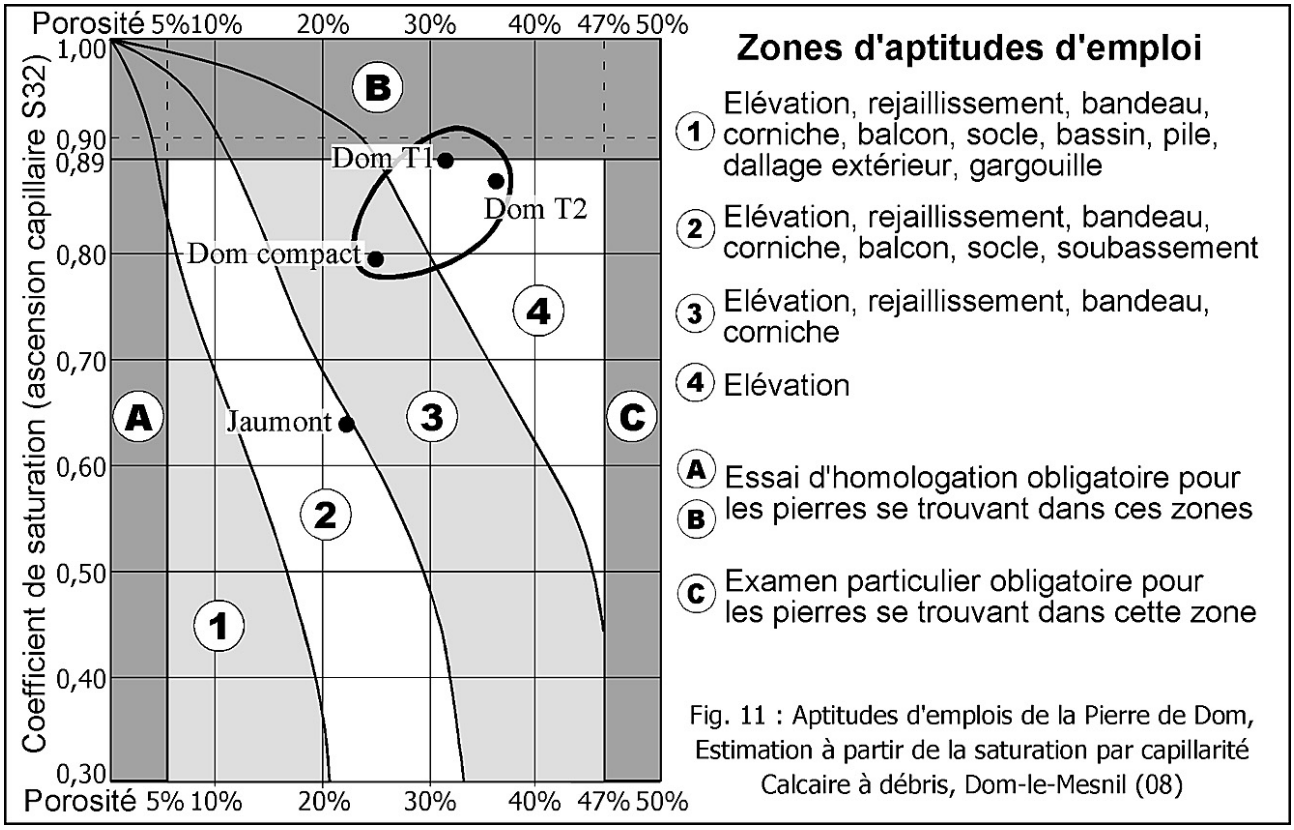


Fig. 11 : Aptitudes d'emplois de la Pierre de Dom, Estimation à partir de la saturation par capillarité Calcaire à débris, Dom-le-Mesnil (08)

De plus, rappelons que la Pierre de Dom possède de très forts indices de prise capillaire, nous pouvons donc supposer qu'il s'agit d'une mauvaise pierre de soubassement. Car elle laissera remonter l'eau du sol jusqu'à une grande hauteur, ce qui entraînera des dégradations de la base du bâtiment.

c/ Description d'un affleurement de référence :

La carrière dite de l'Observatoire (Dom-le-Mesnil)

Généralités

Les formations qui encadrent le Calcaire à débris sont généralement masquées par la végétation, le calcaire gréseux du Bajocien inférieur peut être parfois observé en bord de champs et les calcaires marneux du Bajocien supérieur dans les bois du sommet de la cuesta (Ardaens *et al*., 1983a et 1983b). Les carrières de pierre de taille de Dom-le-Mesnil et d'Hannogne-Saint-Martin permettent pourtant d'observer la base du Bajocien supérieur et plus particulièrement le contact entre le Calcaire à débris et les Calcaires à *Ostrea acuminata*. En revanche, nous n'avons pas observé le contact entre le Bajocien inférieur et le Bajocien moyen, ni la base de la formation du Calcaire à débris. En effet, la carte géologique de Raucourt-et-Flaba (Ardaens *et al.*, 1983a) indique que le Bajocien moyen a une puissance de 40 mètres d'épaisseur et les carrières de pierre de taille n'ont une hauteur maximale que de 13-15 mètres.

Le Calcaire à débris contient très peu d'organismes bien conservés : rares *Teloceras blagdeni*, quelques débris de *Trigonia sp*. et un échinide (*Hemipedina* aff. *perforata*) sont cités dans la notice de la carte géologique de Raucourt-et-Flaba. Les autres éléments de macrofaune observés sont quelques rostres de *Megatheutis sp*. qui figurent dans les collections de l'Université de Reims. La microfaune, elle aussi, est particulièrement rare : quelques foraminifères Arénacés agglutinants de peu de valeur biostratigraphique ou paléo-environnementale.

Le front de taille des carrières à ciel ouvert paraît très homogène et la stratification en litages obliques entrecroisés ne laisse pas apparaître de bancs ou d'unités particuliers, seule la formation du Bajocien supérieur peut être découpée en bancs plus ou moins plans. La couleur brun-rouille caractéristique de la Pierre de Dom semble très régulièrement répartie, avec parfois des zones de concentration plus sombres. Seule la carrière souterraine de Dom-le-Mesnil présente des réelles variations de couleur selon les litages obliques. Ils apparaissent alors hétérogènes, avec des variations de couleur très nettes suivant des lamines obliques de l'ordre du centimètre, regroupées en litages d'environ 20-30 centimètres d'épaisseur.

Description de la série : log voir Fig. 12

La carrière n'est plus exploitée depuis le début des années 1970 (Blanc, 1972), elle permet d'observer entre 10 et 15 mètres de Calcaire à débris exploité sous l'appellation de Pierre de Dom ainsi qu'environ 3-4 mètres de Calcaires à *Ostrea acuminata* et la surface indurée qui sépare les deux unités lithologiques.

Unité 1 : l'absence de coupe fraîche ne permet pas d'analyser finement les fronts de taille, mais ceux-ci ne semblent composés que de la succession de litages obliques entrecroisés où seul varie le taux de conservation des litages. Ces derniers ont une faible épaisseur d'environ 50 centimètres et un développement latéral plus ou moins métrique suivant leur taux de conservation. On peut rencontrer de petits bancs de marnes vertes plus ou moins feuilletées (parfois reprises et formant des lithoclastes allongés et arrondis) et quelques litages entrecroisés paraissent soit plus compacts soit plus vacuolaires que les autres. Ces bancs correspondraient aux faciès de type 2 déterminés par les analyses pétrophysiques, cependant les positions de ces différents niveaux ne peuvent être corrélées à une hauteur particulière du front de taille où a une conformation spéciale de la stratification.

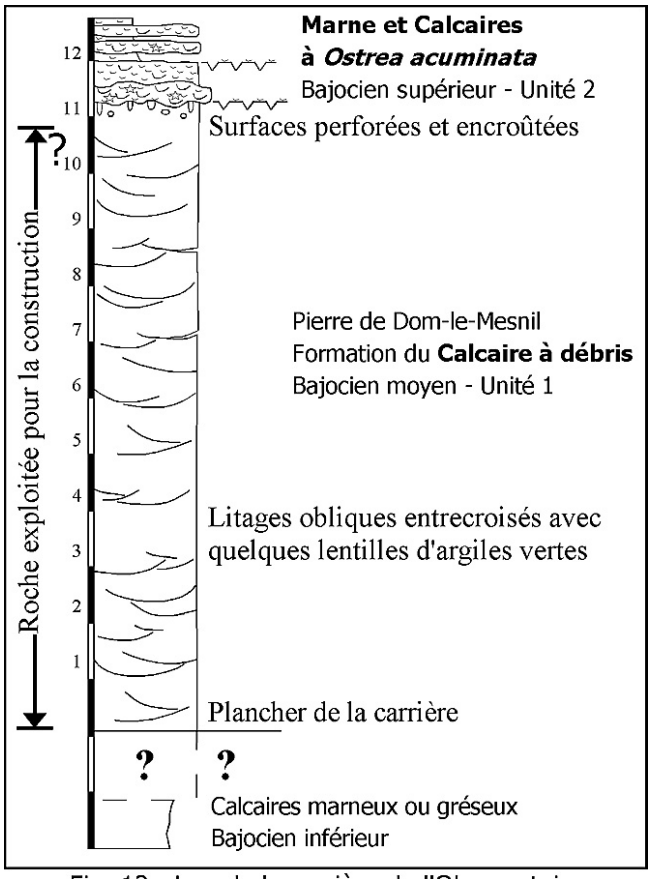


Fig. 12 : Log de la carrière de l'Observatoire Dom-le-Mesnil (08) Calcaire à débris, Bajocien moyen

Vers le sommet du Calcaire à débris, le litage est un peu plus marqué, le faciès devient plus compact et des traces de perforations apparaissent dans les 50 derniers centimètres. L'examen au microscope optique révèle des différences que nous avons jugé suffisantes pour justifier la différenciation de ce microfaciès : nommé Type 3 (voir section suivante). Ce microfaciès, qui ne se rencontre qu'au sommet du Calcaire à débris, est caractérisé par une macroporosité inférieure à 10%, principalement intragranulaire et mal interconnectée, voir Figure 13 et 17. De plus, il contient de gros pelletoïdes micritiques gris de plus de 500 µm de diamètre, absents du reste de la formation.

Le toit de l'unité est tronqué par une discontinuité érosive perforée et encroûtée par des huîtres plates. Dans la carrière souterraine proche, les 2 derniers centimètres du banc sommital ne sont pas colorés par les oxydes de fer ; mais cette caractéristique n'a pu être retrouvée dans la carrière à ciel ouvert. De plus, malgré l'observation

de plusieurs échantillons prélevés juste sous cette discontinuité, nous n'avons observé aucune phase diagénétique pouvant être mise en relation avec celle-ci (hormis les perforations). L'importance stratigraphique de cette discontinuité ne peut donc être précisée.

Unité 2 : La formation des Calcaires à *Ostrea acuminata* est constituée d'une succession de petits bancs d'une épaisseur variant entre 20 et 50 centimètres et séparés par des niveaux marneux. Tous ces bancs (calcaires et marnes) sont formés d'une lumachelle de petites coquilles d'huîtres (*Ostrea acuminata*) et ont une morphologie plus ou moins lenticulaire. Les coquilles sont liées soit par une matrice micritique soit par une gangue marneuse. Dans les bancs calcaires, les coquilles sont généralement accumulées de façon anarchique présentant parfois un granoclassement décroissant vers le haut et une absence de micrite à la base des bancs. Les bases de bancs calcaires sont érosives alors que leurs sommets sont perforés et encroûtés par des huîtres. Ceci montre que la sédimentation était très irrégulière avec de brutale arrivée de boue riche en coquilles puis un arrêt de la sédimentation avec induration. Ces critères sédimentologiques indiquent que ces bancs sont à rapprocher de tempestites, à l'origine du déplacement et de l'accumulation de grandes quantités de coquilles.

Enfin, signalons que le premier banc de cette unité contient de nombreux débris de crinoïdes (*Isocrinus sp.)* alors que ceux-ci sont rares dans le reste de l'unité, il contient en plus des débris de coquilles d'une huître de plus grande taille qu'*Ostrea. acuminata.*

Environnements de dépôt et cadre séquentiel

Le Calcaire à débris est de nature biodétrique et les éléments figurés (organiques ou minéraux) ont été apportés dans cette zone de dépôt par des courants de direction et de force variées, à l'origine des litages entrecroisés (HCS en accrétion latérale ?). L'absence d'indice sur la paléo-profondeur du milieu de dépôts ne permet pas de mieux préciser les reconstitutions des environnements de dépôts et l'absence quasi totale de faune à valeur biostratigraphique ne permet pas de corréler les différentes coupes. Le Calcaire à débris semble pourtant être un dépôt de milieu marin peu profond, mais sans indice d'émersion (les croûtes de fer sont plutôt liées à une remobilisation tardive du fer qu'à une accumulation éogénétique). Les litages entrecroisés sont de type chenalisant à base ravinante et sont plutôt typiques d'un hydrodynamisme irrégulier que d'un véritable environnement tidal. Dans les affleurement étudiés, la variation des figures sédimentaires : HCS dans le Calcaire à débris et lentilles lumachelliques dans les Calcaires à O. acuminata, ne peut être reliée à une variation de paléo-profondeur. Les éléments figurés sont principalement des bioclastes en petits débris (d'où le nom de la formation), ils sont visiblement accumulés par les courants et ne reflètent pas la réelle productivité biologique du milieu. Enfin, notons que l'absence de phases diagénétiques liées à la discontinuité sommitale du toit du Calcaire à débris ne permet pas de préciser l'importance de cette discontinuité.

D'une façon générale, le Calcaire à débris montre des litages successifs (agradation), sans enregistrer de variation de paléo-profondeur et rien n'indique que la discontinuité sommitale a une réelle signification séquentielle régionale.

d/ Inventaire et caractérisation des variétés de microfaciès

1 : Généralités

Le Calcaire à débris est finement granulaire, très poreux avec une cimentation intergranulaire partielle ; il est de couleur brun rouille, en raison de la présence d'oxydes et d'hydroxydes de fer. Les terme de gréseux et de sableux sont parfois utilisés pour décrire le Calcaire à débris (Maubeuge, 1953), alors que celui-ci est biodétrique, à débris d'échinodermes et de lamellibranches. Les microfaciès apparaissent très homogènes car ils sont toujours composés des mêmes éléments (principalement des bioclastes) et des mêmes phases de liaisons (des ciments sparitiques). L'absence de calcite sparitique de blocage explique la forte macroporosité de la roche (porosité totale élevée : 32%) et l'aspect sablonneux du calcaire : les grains ne sont pas noyés dans un ciment calcitique, mais liés les uns aux autres par les ciments syntaxiaux. Le taux de cohésion entre les grains est donc faible et les éléments ont tendance à se dissocier de la surface de la roche. Cette propriété ajoutée à l'éclat spathique des débris d'échinodermes contribuent à la surestimation des grains de quartz.

La taille des éléments est faible : 300 µm pour les bioclastes et moins de 200 µm pour les grains de quartz. Dans un même litage, ces éléments ont une taille relativement homogène et sont très bien triés ; en revanche d'un litage à l'autre, la taille des éléments, la porosité et le taux de cimentation entre les grains peuvent varier. Les différents types de calcaires mis en évidence par les analyses pétrophysiques sont donc principalement liés à la variation du taux de représentation des différents composants du microfaciès sédimento-diagénétique : éléments, ciments et porosité.

Enfin, notons que la couleur brun-rouille de la roche provient soit de petites granules d'oxydes ou d'hydroxydes de fer d'une taille inférieure à 50µm, soit d'imprégnations ferreuses qui tapissent les parois des pores et remplissent le stéréome des débris d'échinodermes.

2 : Inventaire des différents microfaciès du Calcaire à débris

Type n°1 : microfaciès de référence (80-90% des observations) :

Il s'agit du microfaciès le plus typique du Calcaire à débris (voir Fig. 13), la phase granulaire représente environ 50% de la surface observée au microscope optique. Ces éléments sont principalement de 4 types :

- des débris d'échinodermes : environ 50% des éléments figurés et 25% du volume total (pourcentages correspondant aux surfaces mesurées par logiciel après délimitation manuelle des contours des éléments). La nature de ces débris est difficile à préciser du fait de leur mauvais état de conservation, de la cristallisation du ciment syntaxial et de la petite taille des éléments. Parfois, les éléments peuvent être attribués à des crinoïdes, mais sans permettre plus de précisions (communication orale Michel Roux) ;

- de fins débris de coquilles de lamellibranches : environ 15% des éléments et moins de 10% du volume total. Ces débris ont une longueur d'environ 300 µm pour une largeur de 75-100µm, ils peuvent provenir d'Ostréïdés (e.g. *Ostrea acuminata*) ou d'autres lamellibranches. Un mince ciment sparitique palissadique les enveloppe mais il est moins bien développé que le ciment syntaxial lié aux échinodermes ;

- des grains de quartz : environ 5-10% des éléments pour 5% du volume total, ils sont moins nombreux que certaines descriptions le laisse supposer (Ardaens *et al.*, 1983a). Ils mesurent en moyenne 150µm et ont une forme très arrondie ;

- des éléments micritiques dont la nature est difficile à préciser : ils sont relativement nombreux (10-15% du nombre des éléments et du volume de la roche), mais leur pénétration par les oxydes de fer et la recristallisation partielle de leur contenu ne permettent pas de déterminer s'il s'agit de pellets micritiques ou d'éléments micritisés.

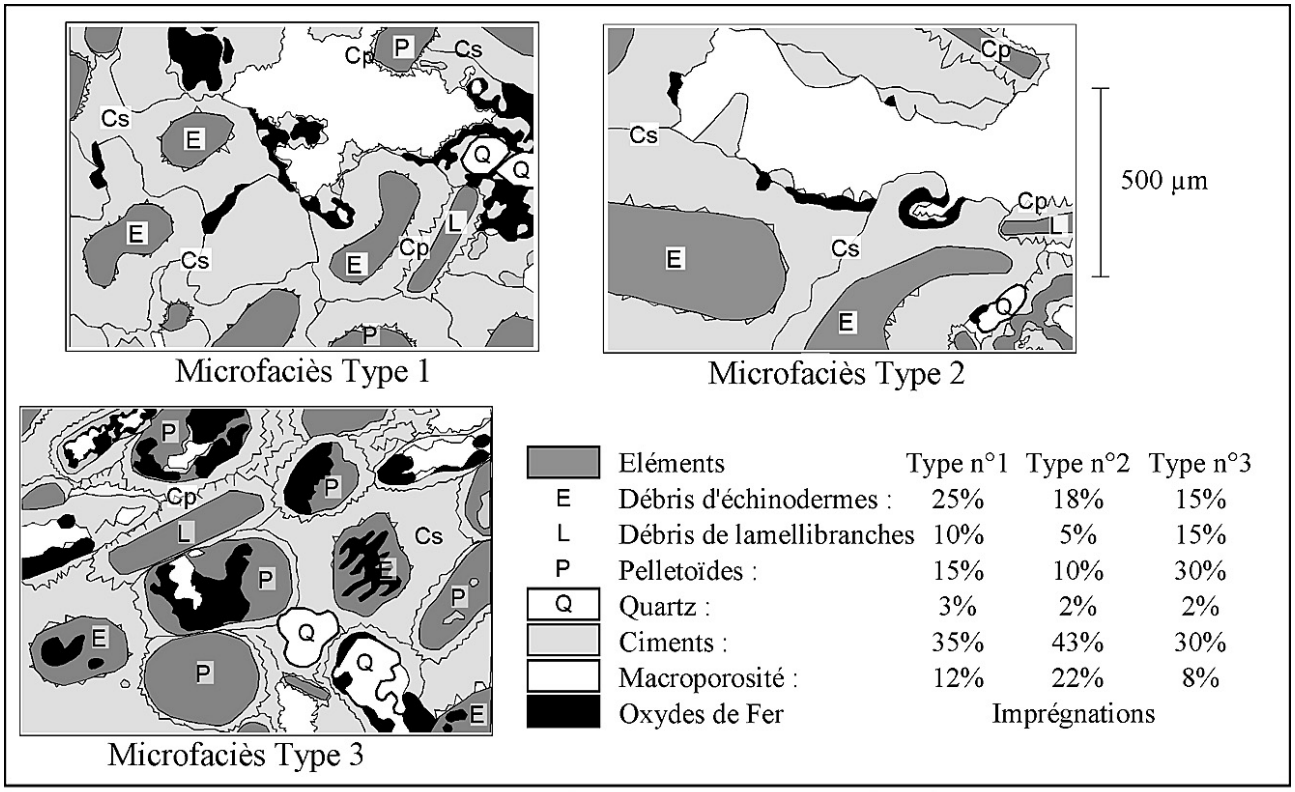


Fig. 13 : Microfaciès types du Calcaire à débris

La présence de petits foraminifères (*Textulariidae*) est parfois constatée. Ils représentent moins de 5% des éléments et du volume de la roche et leurs loges sont fréquemment envahies par les oxydes de fer.

La phase de liaison est principalement composée des ciments syntaxiaux sparitiques développés à partir des éléments d'échinodermes (Cs de la Fig. 13), le mince ciment palissadique (Cp de la Fig. 13) qui entoure les divers éléments figurés est d'ailleurs englobé par le ciment syntaxial. Le sédiment a donc connu une phase de cimentation précoce (ciment palissadique) puis les ciments syntaxiaux se sont formés, consolidant encore le sédiment mais généralement sans totalement obturer la macroporosité intergranulaire. La porosité est nettement bimodale, les macropores sont principalement intergranulaires et fonctions du développement des divers ciments sparitiques, ils représentent environ 10% de volume de la roche soit 1/3 de la porosité totale. Les 2/3 restant de la porosité (soit plus de 20% du volume de la roche) sont constitués de micropores et d'infrapores principalement intragranulaires.

Le Calcaire à débris est donc une biosparite à échinodermes de texture grainstone voire micrograinstone si l'on insiste sur la faible taille des éléments figurés. Il faut aussi insister sur la présence de quelques niveaux d'argiles vertes (observation macroscopique), parfois reprises sous la forme de galets mous ; ainsi que sur les abondants oxydes de fer qui donnent au calcaire sa teinte brun-rouille caractéristique.

Type n°2 : microfaciès à forte macroporosité (10-15% des observations) :

Limité à certains litages obliques entrecroisés et même a certains niveaux de ces litages, le microfaciès type 2 apparaît, au microscope optique, beaucoup plus poreux que le type de référence : 22 à 30% de macroporosité contre 10-12% pour le Type 1. Les macropores, principalement intergranulaires, ont tendance à être allongés dans le sens du litage oblique, certains pores peuvent atteindre plus de 5 millimètres de longueur pour environ 500 µm de large (Fig. 12 et 17).

Les débris d'échinodermes sont les éléments majoritaires et leur taille est légèrement plus importante que dans le microfaciès de Type 1 (400 à 500µm au lieu de 300µm). De même, les ciments syntaxiaux sont plus développés et alors que le pourcentage de volume représenté par les éléments est plus faible, l'importance des ciments est identique à celle du Type 1 voire supérieure (soit 40 à 45% du volume).

La différence entre le microfaciès de référence et le Type 2 est donc sédimento-diagénétique : les éléments contenus dans ces litages, légèrement plus gros que dans le reste de la formation ont provoqué le développement de ciments syntaxiaux de plus grande taille et l'induration fut suffisamment rapide pour que les pores ainsi créés ne soit pas écrasés lors d'une phase de compaction ultérieure. Ce microfaciès est aussi une biosparite à échinodermes de texture grainstone que les classifications des carbonates (Folk, 1959, 1962) et Dunham (1962) ne permettent pas de différencier du Type 1. Pour cela, il faudra donc quantifier les éléments et/ou utiliser l'analyse d'images.

Type n°3 : microfaciès à éléments serrés et nombreux pelletoïdes (- de 5% des observations) :

Ce microfaciès ne se rencontre que vers le sommet de la formation : environ sur le dernier mètre avant la discontinuité sommitale. Il contient un type d'élément figuré absent du reste de la formation : de grands pellets micritiques gris (environ 500µm). De plus, le faciès est plus compact : macroporosité plus faible (5-8% au lieu de 10-12%). La porosité est principalement intragranulaire : les pelletoïdes très fréquents dans ce type (50% du nombre des éléments et 30% du volume total) sont partiellement dissous (Fig. 13).

Ce microfaciès a été caractérisé dans des échantillons provenant du sommet du Calcaire à débris et ne se rencontre que dans le dernier mètre de la formation. Comme nous ne possédons pas de documentation sur les méthodes d'extraction de la Pierre de Dom, nous ne savons pas si le sommet de la formation était exploité et donc nous ignorons si ce Type de microfaciès peut être observé en œuvre.

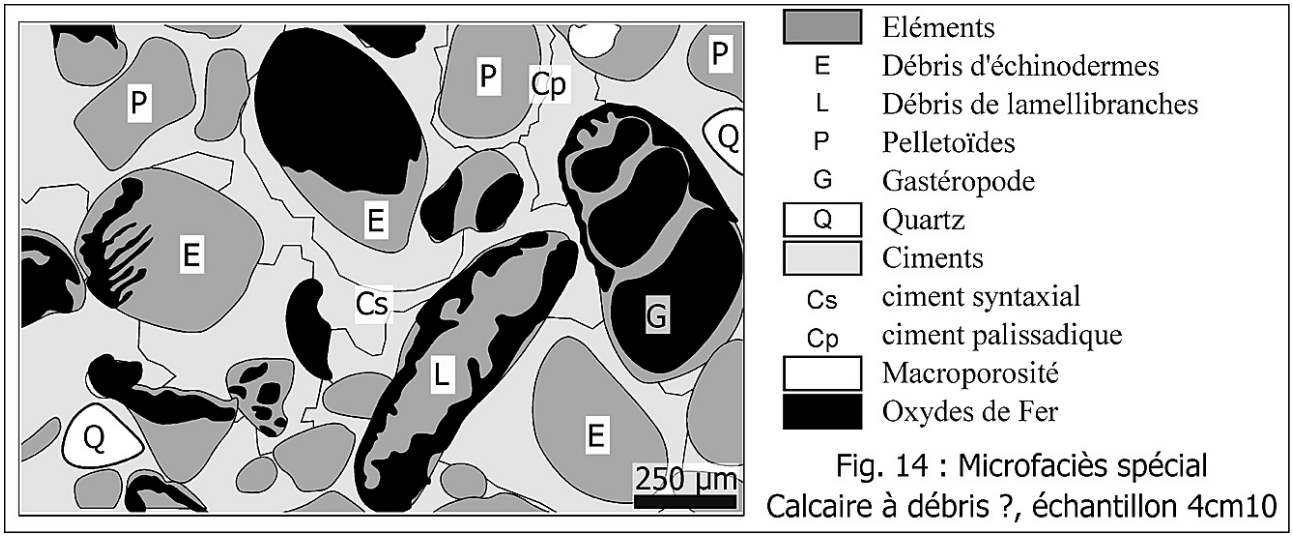


Fig. 14 : Microfaciès spécial Calcaire à débris ?, échantillon 4cm10

Variété non identifiée : microfaciès à bioclastes diversifiés arrondis (- de 5% des observations) :

Quelques échantillons prélevés dans les soubassements de divers bâtiments de Charleville-Mézières présentent un faciès très semblable à la Pierre de Dom, mais avec une granulométrie légèrement supérieure. Leur teinte brun-rouille est quasiment identique au Calcaire à débris, mais la nature et la taille des éléments diffèrent nettement. Dans un premier temps, nous avons pris ces échantillons pour de la Pierre de Jaumont, mais une visite ultérieure du site de Jaumont (dans le cadre d'un programme de recherches du Cercle des partenaires du Patrimoine / LRMH) a montré de nombreuses différences entre les deux roches. Notamment, le fait que les éléments soient ici arrondis et non oolitisés. Cette variété est composée de nombreux débris d'échinodermes (Fig. 14), dont la taille est très supérieure à ceux du Calcaire à débris de référence. De plus, il contient des types d'éléments absents de la Pierre de Dom : des gastéropodes par exemple. Mais surtout, les oxydes de fer sont

localisés à l'intérieur de quelques éléments (principalement les bioclastes) et la macroporosité est très faible (moins de 5%).

Les blocs, où ce microfaciès est reconnu, sont principalement des pierres de soubassement (par exemple à la base de la basilique de Charleville-Mézières), position d'utilisation qui ne convient pas au Calcaire à débris type Pierre de Dom. Nous supposerons donc que ce calcaire était extrait dans la région de Charleville-Mézières pour être spécialement mis en œuvre aux positions architecturales ne convenant pas au Calcaire à débris. Il s'agit peut-être d'une variation latérale du Calcaire à débris, un microfaciès intermédiaire avec la Pierre de Jaumont, ou une pierre à bâtir bajocienne de l'Ardenne wallone : Pierre de Grandcourt, de Torgny…

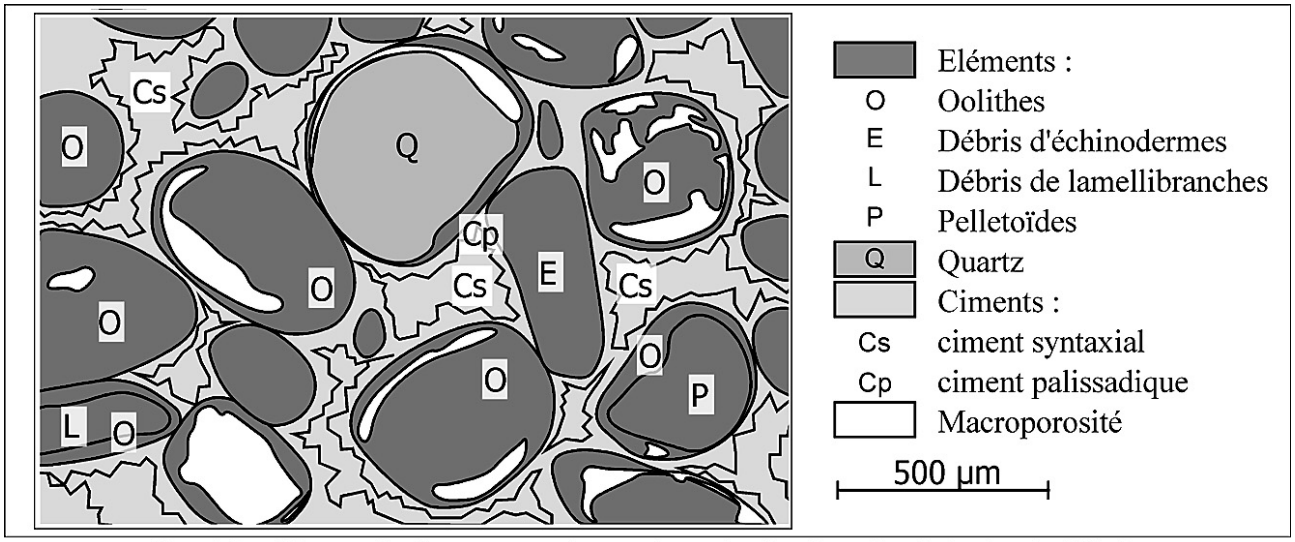


Fig. 15 : Pierre de Jaumont, pierre de substitution du Calcaire à débris

Pierre de Jaumont : microfaciès de substitution pour la restauration du Calcaire à débris :

Ce calcaire oolithique brun-jaune du Bajocien de la région de Metz est mis en œuvre pour remplacer les blocs de Calcaire à débris dégradés, sa couleur étant proche du brun-rouille de la Pierre de Dom. Il s'agit d'un calcaire granulaire oosparitique (grainstone) à macroporosité principalement intragranulaire dont la porosité totale est voisine de 20-25% (CEBTP, 1993). Les éléments bioclastiques, les pelletoïdes et les grains de quartz sont tous légèrement oolitisés (Fig. 15), c'est à dire qu'ils sont arrondis et entourés d'un cortex oolithique de quelques lamines. Ces minces cortex sont mal formés et souvent partiellement dissous (macroporosité intragranulaire moldique). La taille moyenne des éléments est supérieure à celle du microfaciès de référence du Calcaire à débris, elle se rapproche du microfaciès non identifié cité précédemment. La nature des bioclastes est plus diversifiée que dans le Calcaire à débris : lamellibranches, échinodermes, bryozoaires, gastéropodes, foraminifères… Les oxydes de fer (non représentés sur la figure) sont localisés à l'intérieur des éléments oolithique : cortex et nucléus.

La phase de liaison est importante : 30-40% de la surface ; elle est composée d'un ciment palissadique sparitique, bien développé autour de tous les éléments, ainsi que d'un ciment sparitique syntaxial lié à la présence des débris d'échinodermes. La cimentation obture l'espace intergranulaire, le taux de cohésion entre les éléments de la Pierre de Jaumont est beaucoup plus important que pour le Calcaire à débris de référence (Type 1).

3 : Discrimination des microfaciès par analyse d'images

a : Discrimination des microfaciès par quantification de phases (signatures ternaires)

Les microfaciès du Calcaire à débris sont difficiles à différencier sans quantification des composants du microfaciès (comme la macroporosité ou le taux de cimentation). En effet, dans les trois microfaciès de Pierre de Dom, la nature des éléments et des phases de liaison est presque identique : des bioclastes (lamellibranches et échinodermes), quelques quartz et des oxydes ou hydroxydes de fer. Selon les classifications de Folk et de Dunham, les microfaciès Types 1 et 2 correspondent à une biosparite à échinodermes de texture grainstone, le Type 3 étant quant à lui une biopelsparite grainstone à échinodermes.

Pour différencier ces microfaciès, nous avons utilisé l'analyse d'images (quantification des surfaces représentées par trois phases seuillées de pixels). Mais pour ce groupe de microfaciès (images 2D, microscopie optique), la discrimination des différentes phases et le seuillage des images s'avèrent difficile à effectuer :

- Premièrement, les oxydes et hydroxydes de fer sont toujours présents et leur grande quantité fausse les mesures en lumière polarisée. En effet, soit ils sont confondus avec la couleur noire de pores (en lumière polarisée-analysée : LPA), soit ils obscurcissent des éléments et décalent le niveau de gris mesuré. En LPA, les oxydes de fer et les éléments sombres auront donc le même niveau de gris que la porosité.

- Deuxièmement, les principaux éléments figurés sont des débris d'échinodermes auxquels sont directement liés des ciments syntaxiaux sparitiques. Or les éléments d'échinodermes et les ciments syntaxiaux se comportent comme un seul cristal de sparite, en lumière polarisée-analysée, ils s'éteignent et s'allument en même temps. De plus, en lumière naturelle, les éléments paraissent intégrés dans le ciment, ils ne seront nettement visibles que lorsque le stéréome échinodermique sera coloré par les oxydes de fer. Ainsi, la réelle quantification des éléments est difficile à réaliser : ils seront toujours partiellement confondus soit avec les ciments sparitiques soit avec les oxydes de fer (et cela en lumière naturelle et en lumière polarisée). C'est pourquoi, même si l'utilisation d'une résine colorée en bleu permet de mieux mesurer la macroporosité, elle ne permet pas ici d'améliorer la quantification du taux d'éléments.

C'est pourquoi, dans un premier temps, nous avons quantifié la macroporosité d'échantillons indurés avec des résines colorées (Fig. 13), puis nous avons caractérisé les autres échantillons sous lumière naturelle sans utiliser de résine spéciale. En effet, l'estimation de la quantité d'oxydes de fer en lumière naturelle, des éléments gris et de la phase claire (sparite + porosité + quartz) est suffisante pour individualiser les microfaciès types (Fig. 16a et16b). L'utilisation d'un protocole expérimental plus complexe n'est donc pas justifiée.

Les signatures ternaires permettent de discriminer efficacement les différents types de microfaciès mis en évidence à la section précédente. Mais la complexité du microfaciès du Calcaire à débris, qui contient des oxydes de fer et des ciments syntaxiaux, ne permet pas de mettre en corrélation directe les phases quantifiées et les composants du microfaciès sédimento-diagénétique (à l'opposé d'un faciès plus simple comme l'Oolithe vacuolaire, voir page 91, Fig. 32).

Paramètres d'éclairage et d'acquisition vidéo pour les microfaciès du Calcaire à débris :
- Lumière naturelle sans lentille condensatrice, Luminosité bloquée réglage photographique (indice 9).
- Faisceau lumineux dérivé vers utilisateur et caméra tri-CCD.
- Filtre bleu, Pas de filtre gris.
- Réglages caméra : Gain 05 DB, G. rouge –20, CCD iris 1/250ème.

Réglages des seuils des trois phases mesurées :
- 01 - 65 : Phase A : oxydes de fer et éléments obscurcis par le fer (phase noire) ;
- 66 - 155 : Phase B : éléments (échinodermes), bioclastes et pelletoïdes gris ;
- 156 – 255 : Phase C : sparite, quartz et macroporosité (phase claire à blanche).

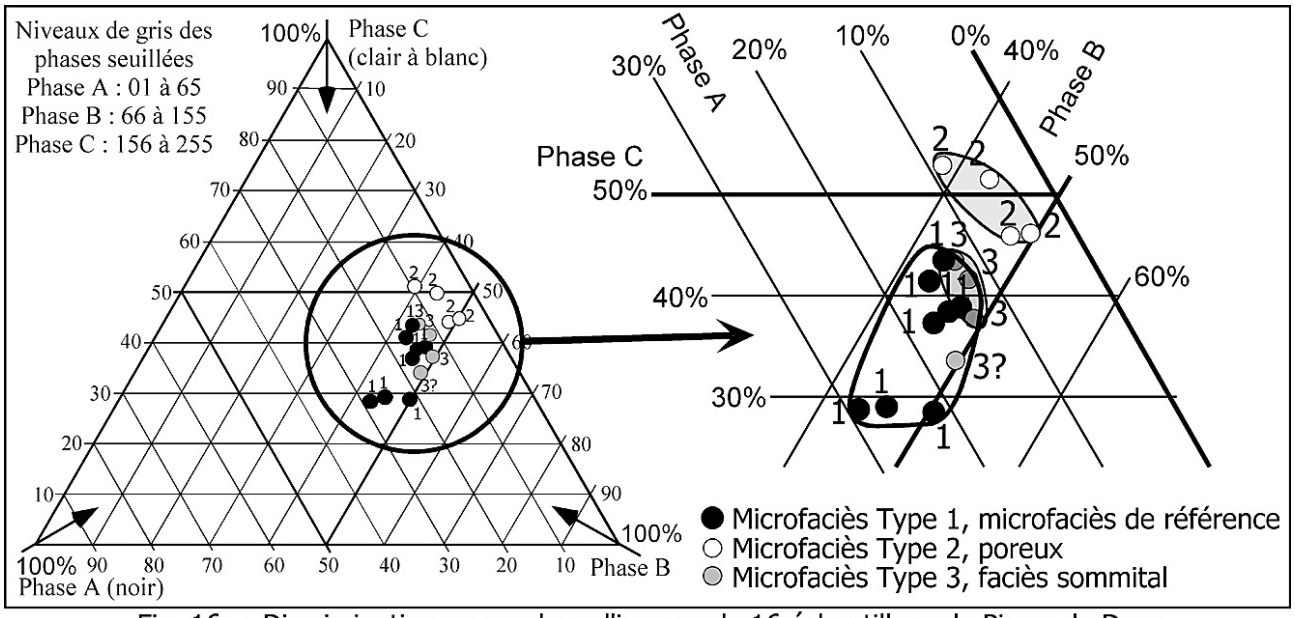


Fig. 16a : Discrimination par analyse d'images de 16 échantillons de Pierre de Dom (Signature ternaire moyenne) Calcaire à débris, Bajocien Moyen

L'analyse de 16 échantillons (soit environ 600 mesures) montrent que les 3 types de microfaciès du Calcaire à débris mis en évidence par l'analyse sédimento-diagénétique ont des signatures ternaires différentes (Fig. 16a et 16b). Les microfaciès Types 1, 2 et 3 sont nettement discriminés par le pourcentage de phase A (noire) : le Type 1 (microfaciès de référence) compte plus de 20%, alors que le seuil de 10% limite le Type 2.

Le type 3 apparaît confondu avec certains échantillons de type 1 (notés 1' sur la figure ci-contre) dont le pourcentage moyen de phase A (noire) est entre 10 et 20 %. Les échantillons de type 1 très marqué peuvent être individualisés dans un deuxième groupe de points avec plus de 20% de phase A (noire), noté 1 sur la Fig 16b.

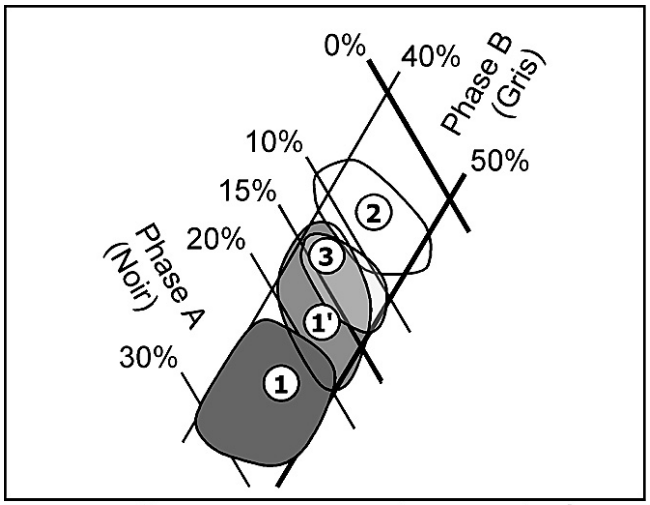


Fig. 16b : Discrimination des microfaciès par analyse d'images (signatures ternaires) Pierre de Dom, Calcaire à débris

De plus, on remarque (Fig. 16b) que les microfaciès type 1 et type 2 mis en évidence par l'analyse sédimento-diagénétique ne sont que les deux extrêmes d'un même microfaciès et que toutes les variantes intermédiaires existent.

Les seuils de pourcentage de phase A (noire) caractérisent les échantillons afin de les classer objectivement parmi les deux grands types mis en évidence par l'étude préliminaire. Les signatures ternaires moyennes mesurées par analyse d'images permettent donc de discriminer les échantillons de cette suite continue de microfaciès (voir ci-dessous).

Les échantillons de type 3, microfaciès que l'on ne rencontre qu'au sommet de la série ne peuvent être différenciés des échantillons de type 1'. Mais ils sont les seuls à contenir de gros pellets gris, facilement identifiables lors de l'acquisition des images, la présence des ces éléments sera donc à mentionner en marge des résultats, et permettra d'affiner la discrimination des microfaciès en différenciant type 1' et type 3.

Cette différenciation des microfaciès établie à partir de la moyenne des signatures ternaires (40 mesures par échantillon) se retrouve si on examine les nuages de points des analyses (non représentés sur la figure 16). De plus les nuages de points montrent une dispersion des valeurs plus importante, certaines valeurs de phase A (noire) dépassent 35% ou sont inférieures à 5% (voir par exemple Fig. 18). Nous pouvons alors établir une distinction plus précise des microfaciès :

- Microfaciès type 1 très marqué : plus de 20% de phase noire.
- Microfaciès type 1 intermédiaire nommé 1' : entre 11 et 20% de phase noire.
- Microfaciès type 2 intermédiaire nommé 2' : entre 5 et 10% de phase noire.
- Microfaciès type 2 très marqué : moins de 5% de phase noire.

Enfin, remarquons que toutes les moyennes des signatures ternaires de la Pierre de Dom se trouvent entre 40 et 50% de phase C (claire) : macroporosité + ciments + quartz. Cette constance peut servir à caractériser le Calcaire à débris pour la différencier d'autres microfaciès (comme la Pierre de Jaumont par exemple).

b : Analyse morphologique de la porosité

La morphologie de la porosité du Calcaire à débris est difficile à obtenir à partir d'images de microscopie optique car si la macroporosité peut être visualisée en lumière naturelle (avec utilisation de résine colorée en bleu), une partie de la microporosité intergranulaire sera masquée par les oxydes de fer. Ne voulant pas recourir à des moyens d'observation plus complexes (comme le MEB en mode électrons rediffusés, Belin *et al.*, 1999), nous avons reconstitué la morphologie en superposant deux images (Fig. 17). D'une part la macroporosité visible en lumière polarisée ou avec une résine colorée qui est représentée en gris, d'autre part, les oxydes de fer qui sont obturent une partie de la macroporosité et soulignent les zones microporeuses qui ont été acquis en lumière naturelle et sont représentés en noir.

Cette superposition avec différentes couleurs met en évidence la variation morphologique de la porosité selon les types de microfaciès (Fig. 17).

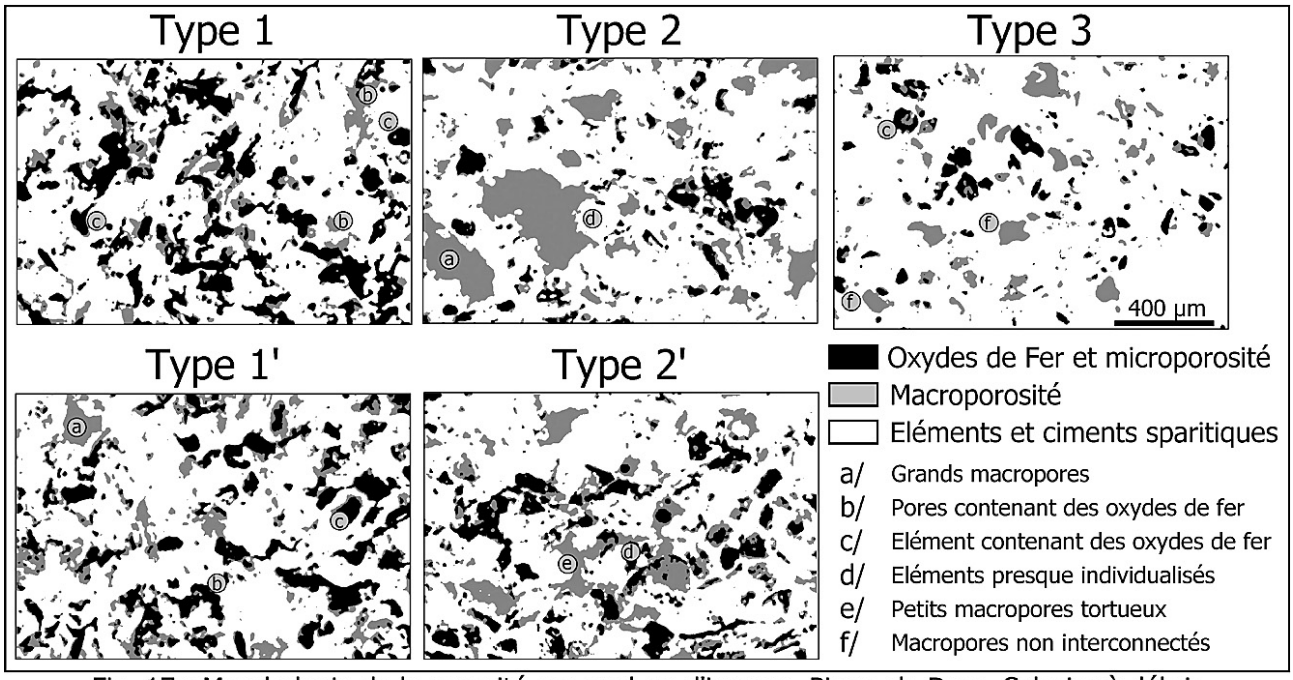


Fig. 17 : Morphologie de la porosité par analyse d'images, Pierre de Dom, Calcaire à débris

- Le type 1 (1 net et 1' intermédiaire) contient peu de grand macropores (a). Les pores apparaissent dans la continuité des oxydes de fer (b), ces alignements oxydes de fer + macropores, indique que la porosité est très

interconnectée, ce qui confirme le fort taux de saturation en eau de ce calcaire . L'orientation préférentielle des alignements souligne une anisotropie de la porosité, sans doute suivant les microlitages sédimentaires.

- Le type 2 contient de très grands macropores qui apparaissent ici isométriques, mais ils peuvent présenter un net allongement en fonction du litage. Certains éléments ne sont quasiment pas liés au reste de la roche (voir par exemple l'élément d/ qui apparaît en blanc entouré d'un macropore gris).

- La morphologie de la porosité du type 2' est légèrement différente du type 2 avec des pores plus petits, relativement tortueux (e) qui sont nettement orientés suivant le litage : très forte anisotropie. La porosité est très fortement interconnectée et les éléments peu cimentés sont nombreux.

- Le type 3 présente une porosité totale nettement plus faible que dans les autres types. La morphologie de ces pores est également différente : les pores sont pour la plupart intergranulaires et très mal connectés.

c : Analyse de la variabilité du microfaciès par analyse d'images (profil de niveaux de gris)

Nous venons de montrer que les microfaciès du Calcaire à débris (et donc les variations de porosité) peuvent être mis en évidence par la semi-quantification par analyse d'images des phases claires (ciments +porosité) et noires (oxydes de fer). Les variations de microfaciès dans un échantillon peuvent donc s'estimer en calculant les pourcentages de ces deux phases et en représentant graphiquement leur variation verticale ou latérale (méthode des profils de niveaux de gris).

Pour cela, nous avons utilisé un échantillon fortement hétérogène, dont les microlitages sont visibles à l'œil nu et effectué deux série de mesures où les images contiguës recomposent deux profils verticaux, notés a et b sur la figure 18.

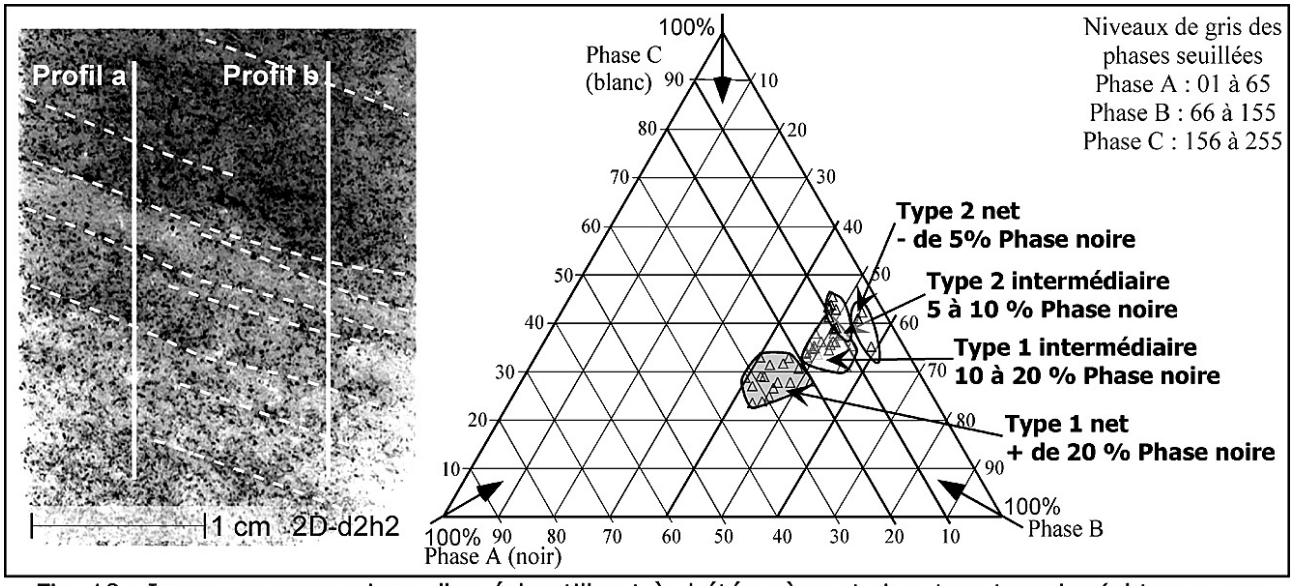


Fig. 18 : Image macroscopique d'un échantillon très hétérogène et signature ternaire (obtenue par analyse d'images 2D, microscopie optique), échantillon 2D-d2h2, Pierre de Dom, Calcaire à débris

Dans un premier temps, nous avons vérifié que les microfaciès contenus dans l'échantillon étaient similaires à ceux examiné précédemment. La comparaison de la signature ternaire de cet échantillon (diagramme triangulaire de la figure 18) avec les valeurs de la Fig. 16 montre bien qu'il contient des microfaciès équivalents, répondant à la même organisation. Puis, nous avons organisé les mesures selon leur position dans la lame mince (soit 2 profils) et recomposé la distribution des différents microfaciès reconnus par l'analyse d'images (Fig. 19). Nous montrons ainsi la grande variabilité verticale du Calcaire à débris, les litages obliques entrecroisés présentant de nettes successions de microfaciès (et donc de porosité) en quelques centimètres. Dans cet échantillon par exemple, le sommet de la lame mince est composé du microfaciès de référence type 1 (peu macroporeux) alors que sa base est très poreuse (microfaciès types 2 et 2').

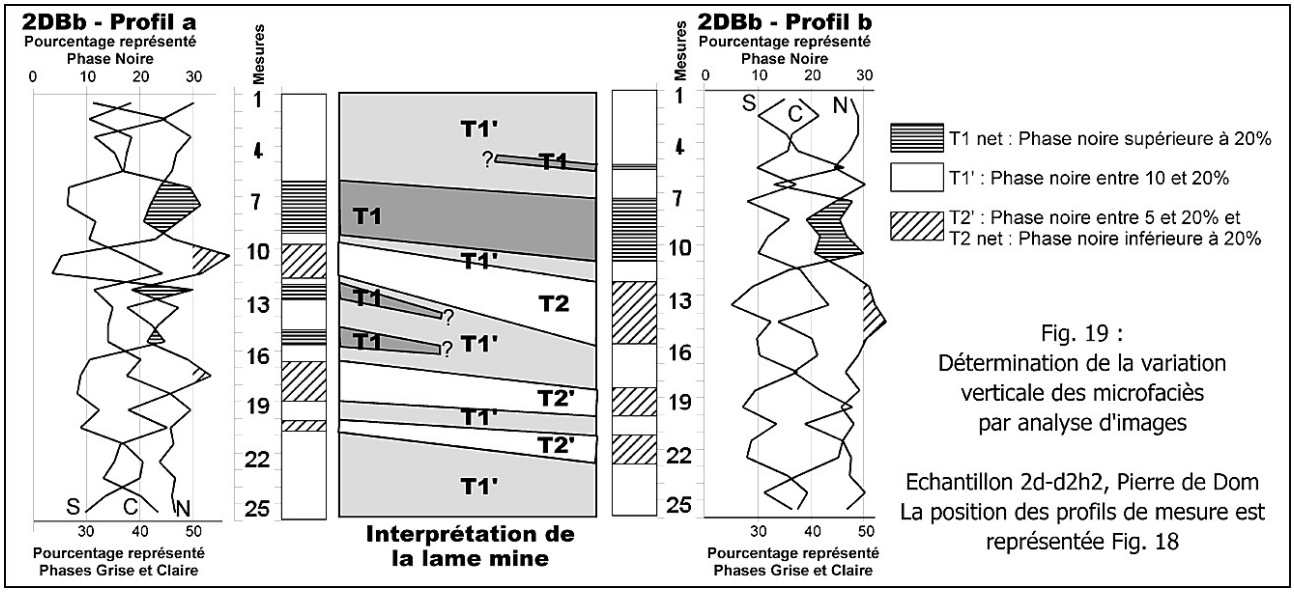


Fig. 19 :
Détermination de la variation verticale des microfaciès par analyse d'images

Echantillon 2d-d2h2, Pierre de Dom
La position des profils de mesure est représentée Fig. 18

e/ Synthèse :

1 : Le Calcaire à débris : un calcaire poreux à petits bioclastes peu cimentés

Les différents calcaires exploités dans la formation du Calcaire à débris ont une composition sédimentologique très homogène : ils sont majoritairement composés de bioclastes et particulièrement de débris d'échinodermes. La grande quantité d'oxydes et d'hydroxydes de fer (environ 4000 à 5000 ppm) constituent l'autre principale caractéristique de ce calcaire. La cimentation est presque uniquement composée par les ciments syntaxiaux sparitiques liés aux éléments d'échinodermes. La phase de liaison n'obture pas totalement la porosité intergranulaire, les différentes variétés de microfaciès de cette formation : Pierre de Dom, Pierre de Saint-Martin sont donc des calcaires granulaires (même si les éléments sont de petites tailles), biodétritiques, à forte porosité et à faible taux de cohésion granulaire.

Le faciès de référence a une porosité totale élevée (moyenne de 32%), principalement intergranulaire. Cette porosité est très bien connectée ; le réseau poreux se sature quasiment totalement en eau (coefficient de saturation dépassant parfois 0,9), de plus il présente de fortes capacités capillaires. Mais certains litages et même certains niveaux des litages obliques ont une porosité plus importante (jusqu'à environ 40%) ou nettement inférieure (environ 20%).

Ainsi, suivant le microfaciès sédimento-diagénétique, la macroporosité peut quasiment doubler en moins d'un centimètre. Ce calcaire homogène à grande échelle apparaît donc en microfaciès comme très hétérogène, même si la nature des composants (éléments figurés et phase de liaison) est toujours identique.

Les aptitudes d'emploi du Calcaire à débris semblent limitées et excluent l'utilisation en tant que pierre de soubassement, ce calcaire semble donc plus particulièrement adapté à une utilisation en élévation de mur.

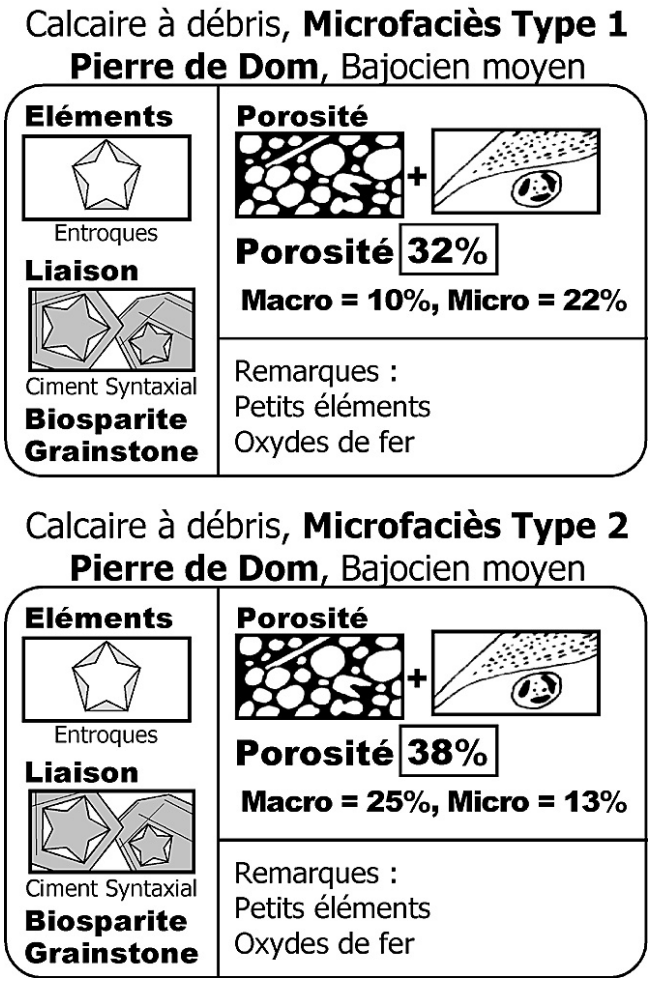


Fig. 20 : Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des 2 principaux microfaciès du Calcaire à débris

2 : Paramètres contrôlant le microfaciès du calcaire

D'anciennes références indiquent que le Calcaire à débris est une roche sablonneuse (Anonyme , 1890, Maubeuge, 1953) ou qu'il s'agit d'un calcaire tendre finement gréseux (Ardaens *et al.*, 1983), mais nous avons montré qu'il s'agit plus précisément d'un calcaire biodétrique à faible taux de cohésion.

Les principales particularités de ce microfaciès sont la présence de nombreux petits débris d'échinodermes, peu cimentés et qui se détachent facilement de la masse de la roche (pour former une fine poudre rousse) et la quantité d'oxydes de fer qui apportent au calcaire sa teinte particulière brun-rouille.

La porosité totale du Calcaire à débris est importante, l'anisotropie du milieu poreux sera parfois très marqué et visible au microscope optique. Les macropores seront fortement interconnectés dans le sens des litages obliques et la stratification du calcaire influencera les circulations de fluides.

Le Calcaire à débris présente un faciès homogène à grande échelle, car la roche n'est composée que de bioclastes : débris d'échinodermes et de lamellibranches, avec quelques pelletoïdes. Pourtant, à l'échelle centimétrique, la macroporosité et le taux de cohésion entre les éléments présentent de très grandes variations.

Ainsi, à l'échelle de la formation géologique, le Calcaire à débris apparaît très homogène alors qu'à petite échelle, il présente une grande variabilité. Et nous avons montré que cette variabilité peut se détecter par les mesures pétrophysiques (porosité par immersion dans le mercure, célérité des ondes acoustiques) et se comprendre grâce à l'analyse au microscope optique.

L'étude des microfaciès permet en effet d'organiser cette variabilité en classant les différents microfaciès selon leur taux de cohésion granulaire, c'est à dire la relation entre la quantité d'éléments, de phase de liaison et de macroporosité.

Le taux de cohésion granulaire est important dans les microfaciès types 1 et 3 et faible dans le microfaciès type 2, qui contient de grands macropores. Ces différents microfaciès peuvent se succéder très rapidement suivant les microlitages de la stratification oblique et la macroporosité peut doubler en quelques centimètres.

2/ l'Oolithe vacuolaire :

Pierre de Savonnières et pierres assimilées

a/ Sites d'affleurements

1 : Cadre géographique et géologique

Les affleurements et les diverses carrières d'Oolithe vacuolaire se situent à l'Est de St-Dizier, dans le département de la Meuse (pour la plupart), ou dans le département de la Haute-Marne (entre Chévillon et Joinville) Fig. 21. La zone d'exploitation intensive de l'Oolithe vacuolaire va d'Aulnois-en-Perthois à Chévillon. La commune de Savonnières-en-Perthois, centre du bassin carrier, est la localité éponyme de cette famille de faciès calcaires : la Pierre de Savonnières (Fig. 21 et 22).

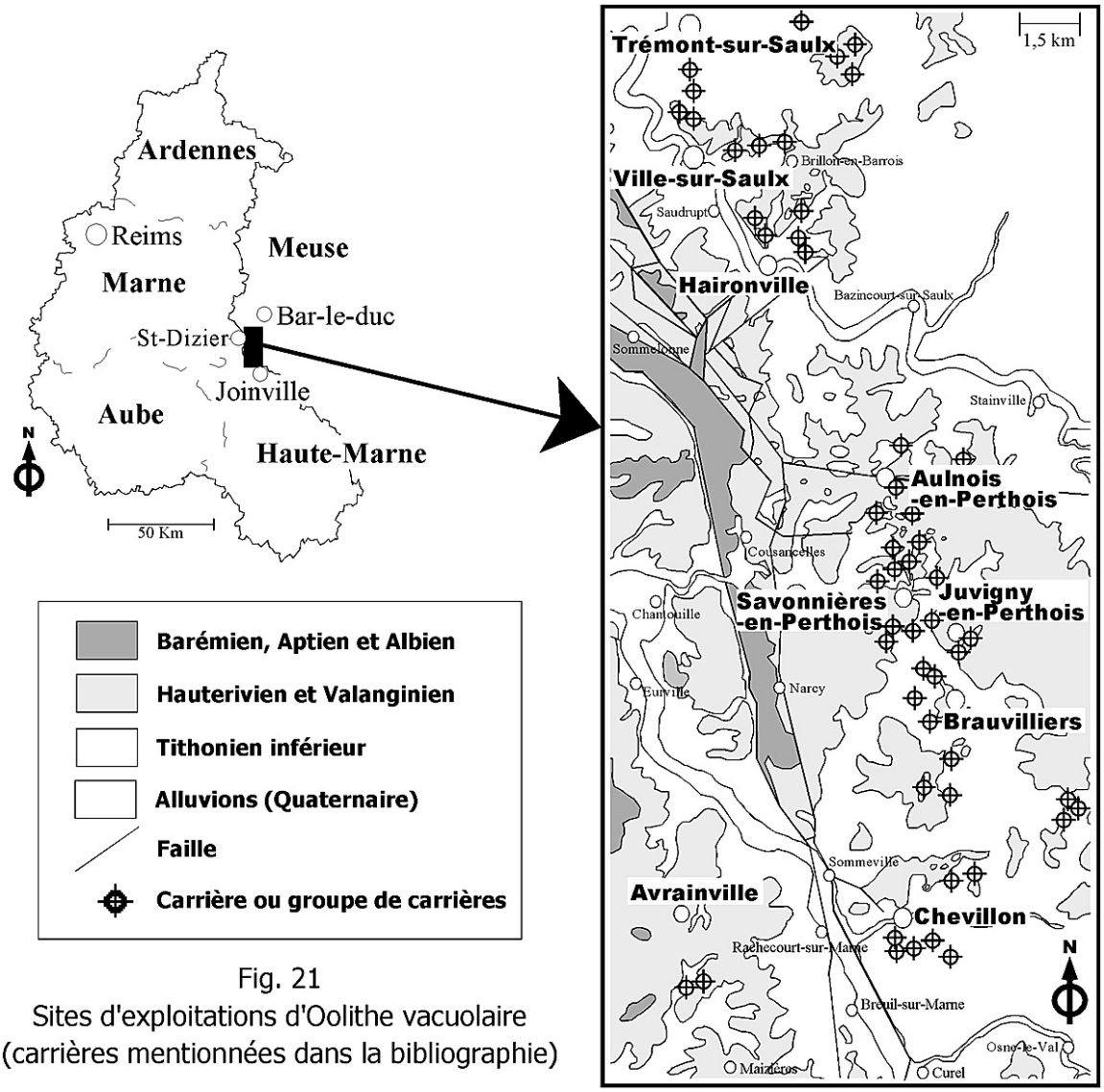


Fig. 21
Sites d'exploitations d'Oolithe vacuolaire
(carrières mentionnées dans la bibliographie)

L'âge de la formation de l'Oolithe vacuolaire n'est pas connu avec précision, on le suppose Tithonique inférieur (zone à *Cyrena rugosa*), mais la formation proprement dite ne contient pas de marqueurs biostratigraphiques (De Brétizel, 1962 ; Stchépinsky, 1959, 1960, 1969) ; même si Cornuel y aurait trouvé *Perisphinctes giganteus ?* (Buvigner, 1854 ; Salin, 1935). Pourtant la position stratigraphique de cette formation, à savoir au dessus de l'Oolithe de Bure (Tithonien inférieur, zone à *Cyprina brongniarti*), mais surtout au dessus des niveaux à *Gravesia portlandica* et sa limitation au toit par la discontinuité Jurassique – Crétacé, permet de l'attribuer au Tithonique (De Brétizel, 1962).

2 : Sites d'exploitations

Les anciens sites d'exploitations de l'Oolithe vacuolaire sont nombreux : pour la seule commune de Savonnières, la carte géologique de Bar-le-Duc (1/50000°) signale plus de 50 carrières (Fig. 21), ce qui est inférieur à la réalité. Sur place, toutes les collines sont percées de carrières souterraines et le calcaire à l'affleurement fut exploité à ciel ouvert depuis l'époque gallo-romaine comme l'attestent les restes de sarcophages et de colonnes découverts au lieu-dit Saint Maurice à Savonnières-en-Perthois (Bedon, 1984).

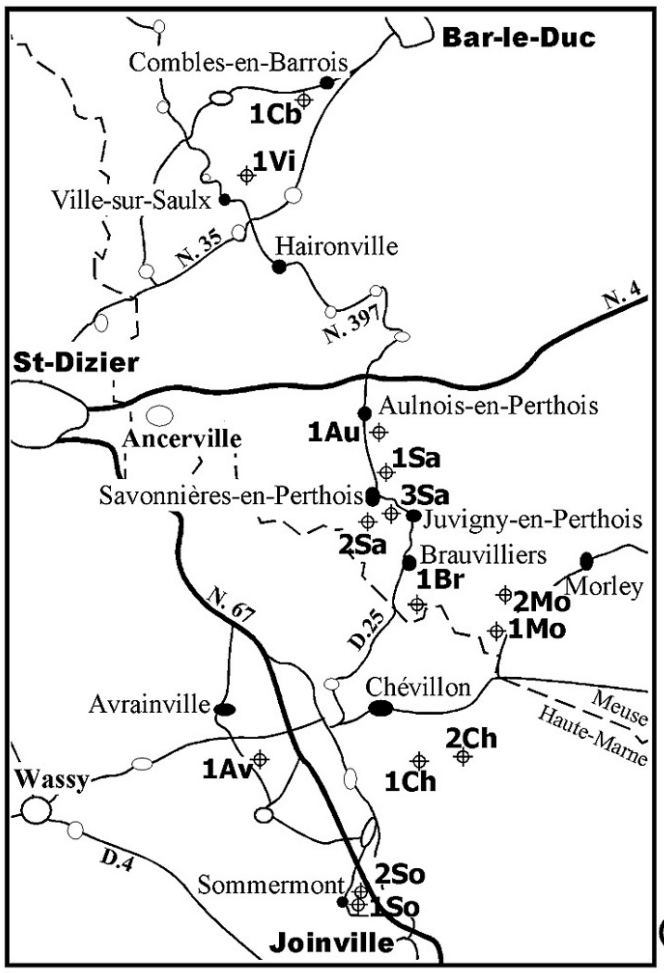


Fig. 22 :
Localisation des sites d'échantillonnages Oolithe vacuolaire, Tithonien inférieur.

Légende :
: communes d'échantillonnage
: numéro de site de prélèvement et abréviation de la commune (avec du Nord au Sud)
Cb : Combles-en-Barrois
Vi : Ville-sur-Saulx
Au : Aulnois-en-Perthois
Sa : Savonnières-en-Perthois
Br : Brauvilliers
Mo : Morley
Ch : Chévillon
Av : Avrainville
So : Sommermont

: autre commune

Le répertoire des carrières de pierre de taille de 1889 (Anonyme, 1890) inventorie plus d'une trentaine de sites, répartis essentiellement sur les communes de Savonnières-en-Perthois et Brauvilliers. La mécanisation de l'extraction au cours des années 1850 permettant d'intensifier l'exploitation en souterrain (Buvigner, 1854), le village de Savonnières-en-Perthois est d'ailleurs entièrement construit au dessus de carrières souterraines inter-connectées. La plupart de ces carrières existent encore aujourd'hui, elles sont abandonnées ou parfois utilisées comme champignonnières ou comme hangar à matériel agricole. Il y a trente ans (NOEL, 1970), le nombre de carrières en exploitation était encore relativement important : 5 à Savonnières-en-Perthois, 6 à Aulnois-en-Perthois et 9 à Brauvilliers (dont déjà la carrière de la Fontaine).

En 1997 pourtant, trois carrières seulement étaient encore en activité. Deux d'entre elles sont exploitées par la société ROCAMAT : la carrière de la couleuvre à Savonnières-en-Perthois et la carrière de la fontaine à Brauvilliers, à la limite du département de la Haute-Marne (voir descriptions des coupes soit à la section suivante soit en annexe 3). La troisième carrière exploitée se situe entre Savonnières-en-Perthois et Aulnois-en-Perthois, mais nous n'avons pu contacter l'exploitant pour obtenir plus de détails. Dans ces trois carrières, l'exploitation se fait actuellement à ciel ouvert après dégagement par engin mécanique d'un découvert argileux pouvant atteindre plus de 10 mètres (Mausolée, 1985).

Bien que la plupart des anciennes carrières soient abandonnées ou disparues. Signalons ici quelques sites permettant encore d'observer la roche in-situ (du Sud vers le Nord, localisation des sites Fig. 22) :

- Carrières du plateau de Sommermont sur la rive gauche de la Marne : quelques carrières à ciel ouvert peuvent encore être observées dans les bois au sommet du plateau (1So, 2So). Plus au sud, les carrières n'offrent plus de conditions d'observation satisfaisantes ;

- Carrières du haut du plateau au Sud de Chévillon : exploitations à ciel ouvert, recouvertes par les bois, mais le front de taille est visible par endroits (1Ch, 2Ch). Les niveaux en plaquettes (inutilisables en construction) ont été entassés et forment des murs parallèles de plus de deux mètres de haut ;

- Carrières de Ville-sur-Saulx : le plateau à l'Est de la ville est percé de nombreuses carrières souterraines. Parfois, celles-ci sont encore accessibles (1Vi) et permettent l'observation du front de taille (un peu moins de deux mètres de haut) mais aussi des sédiments de découverte : un calcaire marneux très riche en tubes de serpules carénées et des marnes à coquilles d'huîtres ;

- Carrières de Combles-en-Barrois : les anciennes carrières dans le bois sur la route de Bar-le-Duc présentent un front de taille de plus de 3 mètres composé de deux bancs oolithiques massifs (1Cb). Ces carrières sont les affleurements les plus au Nord où l'observation de la formation est possible.

3 : Répartition générale des microfaciès

Dans la plupart des sites, le microfaciès rencontré correspond à « l'Oolithe vacuolaire » telle qu'il est observable dans les monuments et autres constructions sous le nom de Pierre de Savonnières. Le faciès est généralement oolithique mais peut-être parfois très coquillier. Dans tous les sites, les nucléus des oolithes sont partiellement dissouts, de même pour les coquilles de lamellibranches. Les microfaciès à matrice micritique se rencontrent dans tous les affleurements, ils marquent une variation sédimentologique ponctuelle et non une évolution latérale du faciès. Les faciès dolomitisés ou dolomitiques se sont formées lors de la diagenèse précoce et se développent différemment selon les secteurs.

A la périphérie du bassin carrier, le microfaciès présente quelques variantes (localisation des sites Fig. 22) :

- présence de Milioles (en éléments libres ou en nucléus d'oolithes) : sites : 1Cb (nombreuses Milioles : ¼ des nucléus des oolithes), mais aussi 1Vi (rares Milioles : 1 ou 2 par lames minces). On en trouve aussi dans certains niveaux d'Avrainville (1Av) : 2 à 3 Milioles par lame dans des oolithes altérées ;

- présence de nombreux lithoclastes micritiques arrondis répartis dans certains bancs ou certains litages obliques : 1Cb ;

- seconde phase de cimentation sparitique : grand cristaux obturant partiellement ou totalement la porosité intergranulaire : sites 1Ch et 2Ch. Cette seconde phase de cimentation s'avère caractéristique de la Pierre de Chévillon.

b/ Caractérisation générale de l'Oolithe vacuolaire

1 : Nature

Selon la description des carriers (ROCAMAT, 1996), la Savonnières ½ fine correspond à un « calcaire oolithique ou coquillier, gris - beige, à grain fin, rond serré avec de nombreux petits trous vacuolaire ». Alors que le Brauvilliers Liais est plutôt un « calcaire oolithique à coquilles de petites dimensions et la pierre est peu alvéolaire : petits grains ronds et fins, coquilles peu nombreuses, aspect veiné jaune sur fond beige ». Lors de la période de pleine exploitation de ces calcaires, et jusqu'à la seconde guerre mondiale, le nombre d'appellations était plus important (Noël, 1970), les qualités de pierres les plus dures sont donc soit épuisées soit non exploitées. Ainsi, à la carrière de la Fontaine (Fig. 25), cinq types de bancs étaient différenciés et exploités. Les 3 bancs inférieurs (de Liais dur) ne le sont plus actuellement. Enfin, dans les communes de Savonnières-en-Perthois ou d'Aulnois-en-Perthois, on exploitait de la Savonnières ½ fine comme à l'heure actuelle, mais aussi un niveau de pierre fine appelé « Bernais veiné » moins vacuolaire.

Notons enfin que l'appellation Savonnières coquillière était parfois utilisée, mais qu'actuellement ce terme n'a plus court car les bancs de Fromentelle ne sont plus exploités. Ce qui pose parfois problème pour les restaurations de monuments historiques où ces niveaux lumachelliques ont été utilisés (comme colonne par exemple).

Echantillon	**CaO (%)**	**MgO (%)**	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Fe_2O_3 (%)	K_2O (%)	SO_3 (%)	Total (%)
Brauvilliers 1	**54,23**	**0,55**	0,16	0	0,23	0	0,14	55,31
Brauvilliers 2	**55,65**	**0,44**	0,38	0,02	0,28	0	0,13	56,89
Savonnières	**54,28**	**0,46**	0,31	0,09	0,19	0,01	0,07	55,42
Pouillenay	**54,09**	**0,61**	0,58	0,19	0,82	0,02	0	56,29

Tab. 7 : Analyse chimique en fluorescence X, d'après Bousquié, 1979.
Le complément des pourcentages pondéraux à 100% est composé par CO_2.

2 : Caractéristiques chimiques

L'Oolithe vacuolaire est un calcaire quasiment pur, composé de plus de 99, 8% de $CaCO_3$ (Rocamat, 1996). Cependant, dans certains niveaux, les zones de dolomitisation sont importantes et des analyses chimiques (Bousquié, 1979), laisse supposer que la dolomite peut être présente dans certains faciès (voir microfaciès 6a à 6c, pages 82 et 83). En effet, les valeurs indiquées dans le tableau ci-dessus pour la Pierre de Pouillenay (calcaire à entroques du Bajocien moyen bourguignon) sont de CaO : 54,09% et MgO : 0,61% et parmi les 17 mesures effectuée par Bousquié (1979), l'échantillon (PO), qui contient de la dolomite visible au microscope optique, est celui qui contient le plus de MgO. Mais on voit aussi (Tab. 7) que Liais de Brauvilliers contient **0,55%** de MgO, ce qui correspond à la seconde valeur par ordre décroissant et indique donc une tendance à la dolomitisation.

Si dans ce travail, nous n'avons pas effectué d'analyse chimique qui confirme la présence de dolomite, mais nous avons individualisé des échantillons où la dolomite est nettement visible au microscope : par coloration à l'alysarine Red-S, sous cathodoluminescence ou épifluorescence. La dolomitisation est alors plus ou moins développée, allant de la présence de simples rhomboèdres de dolomite plus ou moins dissoute (microfaciès type 6a), jusqu'à une transformation totale de la roche, alors inutilisable comme pierre de taille et non exploitée (microfaciès type 6c).

3 : Caractéristiques physiques et porosité

Nous présenterons ici des résultats de tests géotechniques (Tab. 8a à 8d) issus de la bibliographie (Noël, 1970, Bousquié, 1979 et Rocamat, 1996) en montrant que s'ils permettent bien de différencier les appellations Liais et ½ fin, les différences entre les variétés ½ fines de Savonnières ou de Brauvilliers sont moins nettes.

Résultats moyens	Savonnières ½ fine	Savonnières ½ fine choix
Résistance à la compression (kg/cm^2)	114	115
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1720	1750
Porosité (%)	36% (de 31,7 à 41,1)	34,5% (de 22,8 à 37,8)
Vitesse de propagation du son (m/s)	2885	2680
Largeur de rayure (en mm)	1,92	1.37
Coefficient d'absorption moyen	0,5	?

Tab. 8a : Caractéristiques pétrophysiques de la Pierre de Savonnières, d'après Noël (1970)

Résultats moyens	Brauvilliers ½ fin	Brauvilliers Liais
Résistance à la compression (kg/cm^2)	121	236
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1765	1960
Porosité (%)	34% (de 30,7 à 35,5)	27% (de 23,8 à 29,8)
Vitesse de propagation du son (m/s)	3045	3105
Largeur de rayure (en mm)	1,35	1.10
Coefficient d'absorption moyen	0,66	0,67

Tab. 8b : Caractéristiques pétrophysiques de la Pierre de Brauvilliers, d'après Noël (1970)

Bousquié (1979) analyse trois échantillons d'Oolithe vacuolaire : 2 proviennent de Brauvilliers et 1 de Savonnières-en-Perthois.

	Savonnières	Brauvilliers 1	Brauvilliers 2
Porosité par densité	38 %	28 %	33 %
Porosité accessible à l'eau sous vide	37 %	28 %	33 %
Porosité totale (porosimétrie mercure)	36,2 %	27,6 %	32,6 %
Porosité piégée (porosimétrie mercure)	23,2 %	17,6 %	19,2 %
Rapport P. piégée/ P. totale	64.1 %	63,7 %	58,9 %

	Degrés de Saturation de la porosité par ascension capillaire			
	S% 5 jours	S% 36 jours	S% 64 jours	S% 120 jours
Brauvilliers 2	58 %	63 %	65 %	68 %
Savonnières	58 %	62 %	64 %	66 %

	Infraporosité (R<1µm)			Macro et Microporosité (R>1µm)		
	Rayon accès	% de porosité	% de la P tot	Rayon accès	% de porosité	% de la P tot
Brauvilliers 1	0,07 µm	10,6 %	38,4 %	27 µm	10,7 %	61,6 %
Brauvilliers 2	0,10 µm	11,8 %	39 %	22 µm	18,4 %	61 %
Savonnières	0,10 µm	13,8 %	40,35 %	7 µm	20,4 %	59,65 %

Tab. 8c : Caractéristiques pétrophysiques de l'Oolithe Vacuolaire, d'après Bousquié (1979)

Et les fiches techniques de la ROCAMAT donnent des mesures complémentaires, aux normes récentes :

	Savonnières ½ fine	Brauvilliers Liais
N° d'identification	3 à 4	3.5 à 4.5
Masse volumique apparente (kg/m^3)	1600 à 1800	1800 à 1900
Porosité (%)	30 à 40 %	30 à 35%
Résistance aux attaches (3cm)	50 à 70 daN	60 à 90 daN
Résistance à la compression	10 à 20 Mpa	12 à 16 Mpa
Résistance à la flexion	/	3 à 5 Mpa
Capillarité C1	/	2 à 5
Capillarité C2	/	4 à 10
Vitesse de propagation du son (m/s)	2500 à 3000	2600 à 3200

Tab. 8d : Caractéristiques pétrophysiques de l'Oolithe Vacuolaire, d'après Rocamat (1996)

Les faciès portant la mention ½ fin ou ½ fine sont relativement similaires qu'ils proviennent de Brauvilliers ou de Savonnières-en-Perthois (Tab. 8a et 8b). Ils ont une porosité totale très importante (25 à 40%) avec une porosité moyenne de 35%. En revanche, le Liais de Brauvilliers est considéré comme plus résistant et moins poreux que la Pierre de Savonnières (aspect moins vacuolaire d'après Noël, 1970), et en effet, sa porosité totale

moyenne est de 27% contre 33 à 35% pour les appellations de ½ fin. Nous pouvons d'ailleurs remarquer que cette tendance, observée par Noël, 1970 (Tab. 8b) et Bousquié, 1979 (Tab. 8c) ne se retrouve plus aussi nettement à l'heure actuelle : 30 à 35% de porosité pour le Liais de Brauvilliers contre 30 à 40% pour la Savonnières ½ fine (Rocamat, 1996, Tab. 8d). Le Liais exploité actuellement n'est donc peut-être pas totalement similaire au Liais exploité dans les années 70 et antérieures ?

Le coefficient d'absorption est très faible : 0.66 au bout de 120 jours, le pourcentage de porosité piégée est important (65%), le réseau poreux se sature très peu en eau. Dans le cas des appellations de ½ fin, la porosité non saturée en fluide mouillant, et donc ne contenant que de l'air, représentera environ 15% du volume total de la roche. Le propriétés du réseau poreux expliquent en partie la non-gélivité de cette roche et le fait qu'elle présente une bonne durabilité en œuvre, même avec une porosité totale atteignant parfois plus de 40%.

Les données obtenues par porosimétrie mercure montrent que les pores aux rayons d'accès inférieurs à 1µm représentent plus d'1/3 de la porosité totale, ils ne sont donc pas négligeables. Mais il ne faut pas considérer que cette valeur représente la part de l'infraporosité dans l'Oolithe vacuolaire. En effet, il peut s'agir de macropores mal connectés au reste de la porosité et qui ne sont accessibles que par de minuscules pores (voir le paragraphe morphologie de la porosité, pages 91 - 92). Pour l'Oolithe vacuolaire, nous considérons donc que les données obtenues par cette méthode ne donc pas directement interprétables en terme de taille de pores, mais qu'il faut toujours mentionner qu'il s'agit de taille d'accès aux pores.

4 : Aptitudes d'emploi

Malgré une porosité totale très élevée, les différentes appellations de l'Oolithe vacuolaire sont placées en zone d'utilisation 2 ou 3 car elles ont un coefficient d'absorption faible (Tab. 9 et Fig. 23). En climat Séquanien (à périodes de gel modéré) : les variétés de type Liais sont placées dans la zone 2 d'utilisation alors que les appellations Savonnières ½ fin ou Brauvilliers ½ fine sont dans la zone 3, aux zones d'emploi plus restreintes.

Aptitude d'emploi	Brauvilliers Liais : Zone 2	Pierre ½ fine : Zone 3
Rez-de-chaussée	Oui	Oui
Elévation	Oui	Oui
Rejaillissement	Oui	Oui
Bandeau, Corniche	Oui	Oui
Elévation sous saillie	Oui	Oui
Revêtement	Oui	Oui
Balcon	Oui	**Non**
Soubassement	Oui	**Non**
Socle	Oui	**Non**
Pile en rivière	**Non**	**Non**
Dallage extérieur	**Non**	**Non**
Gargouille	**Non**	**Non**

Tab. 9 : Aptitudes d'emploi de l'Oolithe vacuolaire

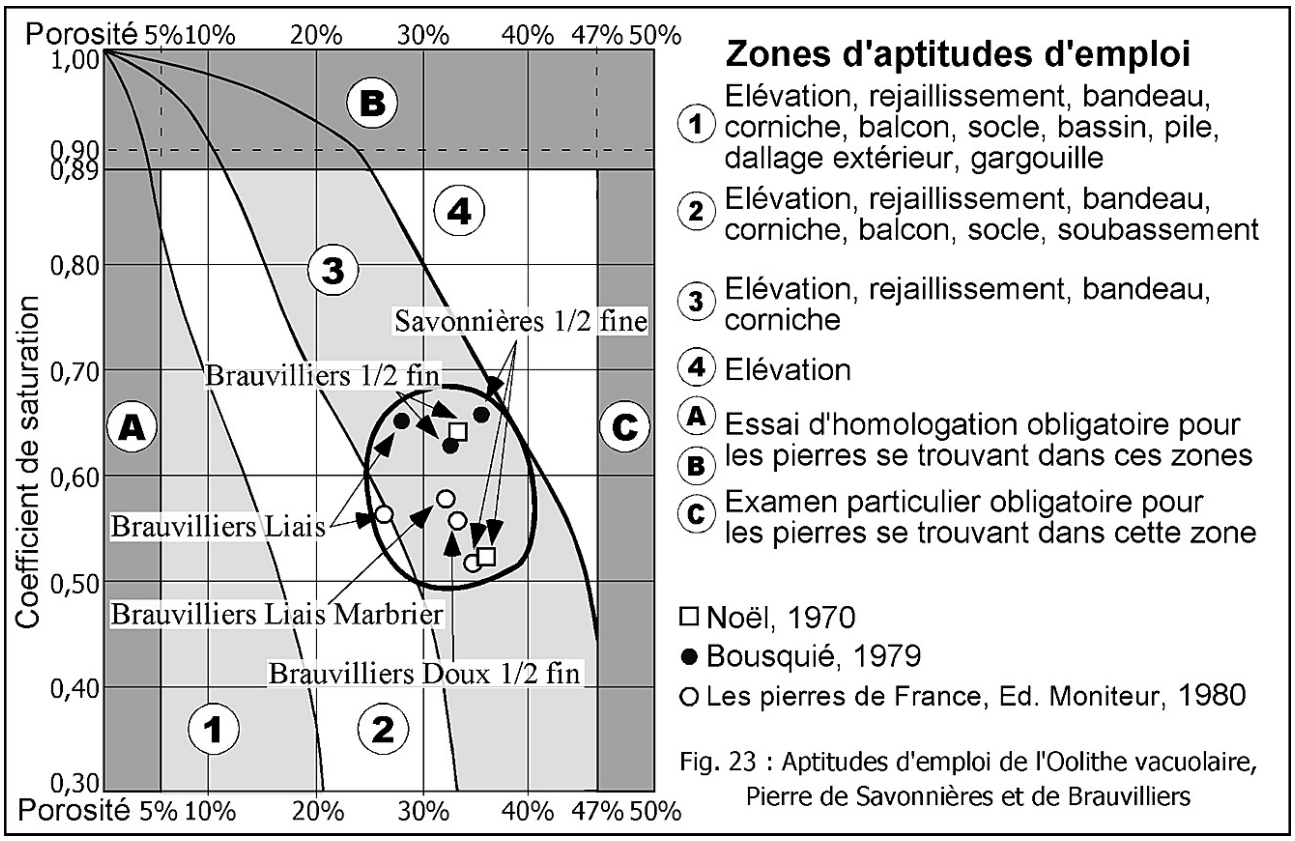


Fig. 23 : Aptitudes d'emploi de l'Oolithe vacuolaire, Pierre de Savonnières et de Brauvilliers

c/ Description d'un affleurement type :

La carrière de la Fontaine (Brauvilliers)

Généralités

La série lithologique contenant la formation de l'Oolithe vacuolaire est mal définie car très variable (Stchépinsky, 1959, 1960, 1969). Si les niveaux oolithiques sont relativement homogènes (épaisseur de 2 à 3,5 mètres) ; ils peuvent s'intercaler entre des formations calcaires (sublithographiques ou dolomitiques) ou marneuses. De plus la série est recoupée par la discontinuité qui marque le passage Jurassique – Crétacé, tronquant ou altérant les marnes supérieures et même l'Oolithe vacuolaire (Beaudoin, 1991). Pourtant, la série est généralement formée par une succession de calcaires dolomitiques fins et de bancs oolithiques qui seront surmontés des calcaires tendres sublithographique puis par des marnes et d'argiles azoïques.

Le contenu paléontologique est peu varié : la très grande majorité des coquilles proviennent de lamellibranches (*Corbula inflexa* Roem. et *Cyrena rugosa* Sow.), souvent réduits à l'état de moules. L'accumulation de ces coquilles forme des niveaux lenticulaires lumachelliques qui, dans la bibliographie (Buvigner, 1854 ; de Brétizel, 1962), portent le nom de « fromentelles ». Les zones très dolomitisées, impropres à l'utilisation comme pierre de taille, sont appelées « pierre morte » et ne sont pas exploitées.

Description générale

Cette carrière, encore exploitée actuellement, permet d'étudier toute la série où s'intercale l'Oolithe vacuolaire, en particulier les calcaires micritiques et les argiles de découverte. De plus la présence d'exploitations souterraines ou de zones délaissées à cause de la dolomitisation du calcaire (voir pages 82-83 et Fig. 27), de karst ou pour des raisons commerciales permet d'observer divers microfaciès ainsi que leurs transformations diagénétiques ou télogénétiques *in-situ*. Le guide des carrières ROCAMAT (François, 1992) fait une distinction entre un banc de base (épaisseur 1m20, appellation Brauvilliers Liais) et un banc sommital épais de 1 mètre, faiblement exploitable (appellation Brauvilliers ½ fin). La découverte est estimée à une épaisseur de 3 à 7 mètres et l'extraction prévisionnelle du banc de Liais est de 1000 m^3/ an.

Description de la série : log, Fig. 24

Unité 1 : La base de l'affleurement est composée d'un calcaire oobioclastique légèrement dolomitique et peu vacuolaire, épais d'environ 2 mètres à l'entrée de la carrière. Ces bancs ne sont plus exploités pour la pierre de taille (depuis 1945). Ils forment le plancher de la carrière exploitée actuellement.

Unité 2 : l'unité 2 est formée par un banc calcaire homogène, mesurant une puissance d'environ 2m50. A la base de cette unité, le calcaire est exploité sous le nom de Liais de Brauvilliers alors que le reste, plus coquillier et moins homogène, correspond au faciès ½ fin. Il n'y a pas de nette différence de faciès ou de microfaciès entre le Liais de base et les autres bancs. Cependant la porosité serait plus faible dans le Liais que dans le banc de ½ fin (d'après les données bibliographiques des années 1970).

Intercalés dans la série, des niveaux lenticulaires composés de coquilles de lamellibranches (lumachelle bioclastique à oobioclastique) mesurent en moyenne 50 cm de hauteur pour une vingtaine de mètres de longueur. Ces niveaux ont été exploités sous l'appellation de ½ fin coquillier, ils sont bien représentatifs de la « fromentelle ». Ce faciès est très poreux, parfois plus de 50% de porosité totale, car non seulement les coquilles sont dissoutes, mais les vacuoles intergranulaires sont importantes. A la base des lentilles lumachelliques et dans quelques niveaux épars dans la coupe, la phase de liaison est une constituée par une micrite grise plus ou moins recristallisée en microsparite. On peut rencontrer cette micrite matricielle dans les faciès oolithiques ou les faciès bioclastiques, les niveaux micritiques mesurant entre 1 et 10 centimètres de haut.

Les 20 derniers centimètres de cette unité ne sont pas exploités dans les carrières à ciel ouvert et forment le toit des exploitations souterraines. Au sommet, les éléments sont écrasés et seules les oolithes dont le nucleus n'a pas été dissout sont encore bien conservées (elles poinçonnent les autres éléments). La porosité est faible (moins de 10%) et les éléments sont parfois réduits à l'état de liséré micritique entre deux niveaux sparitiques (microfaciès type 5a à 5b).

Enfin notons que la présence de « Pierre morte » a causé l'arrêt de l'exploitation vers le Sud-Est. En effet une intense dolomitisation affecte les bancs oolithiques du haut vers le bas (microfaciès type 6b à 6c), sur une épaisseur variant de 0 à plus de 1,50 m (la puissance totale du banc calcaire étant de 2,5 mètres).

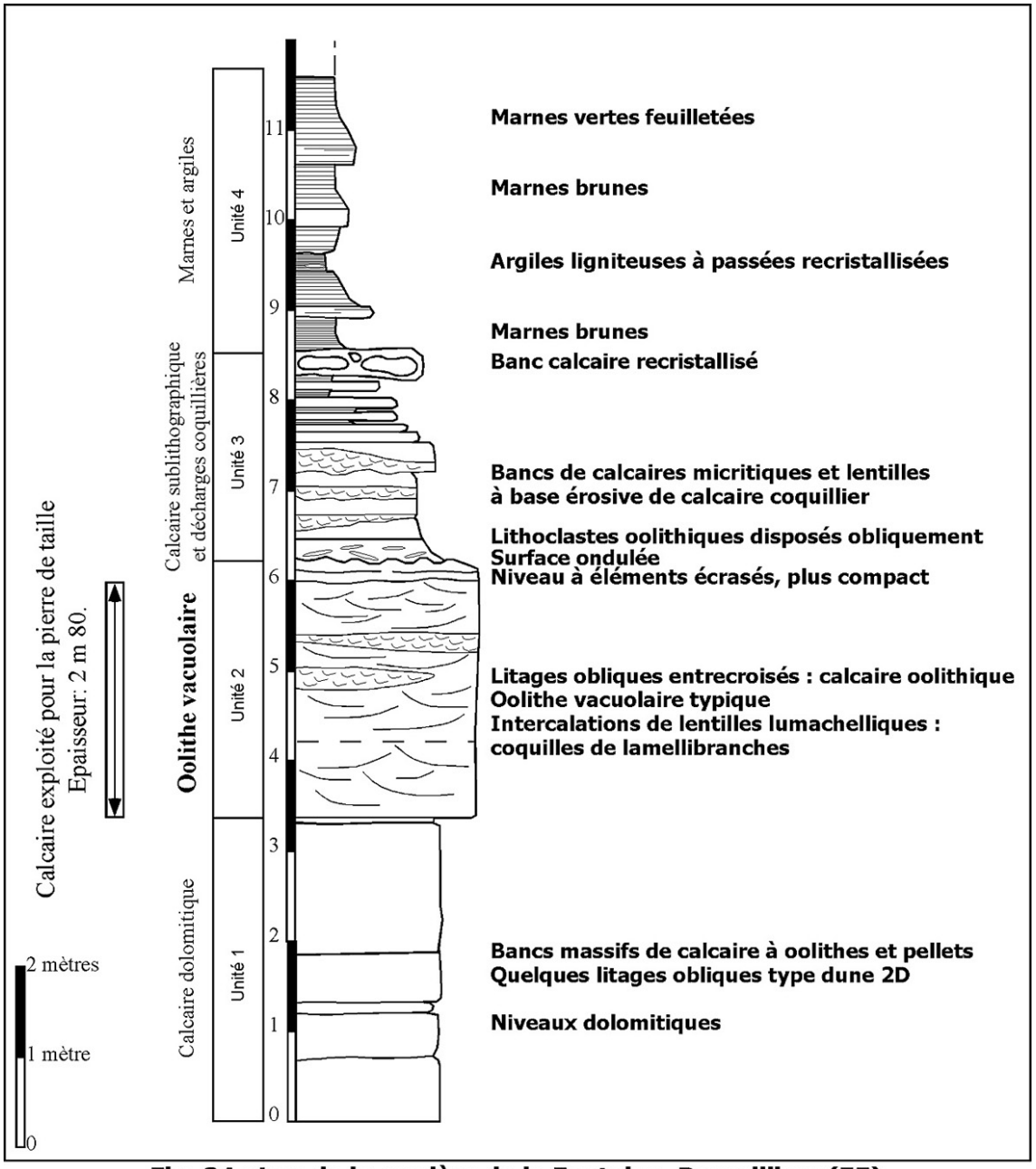


Fig. 24 : Log de la carrière de la Fontaine, Brauvilliers (55)
Pierre de Brauvilliers, Oolithe vacuolaire, Tithonien inférieur, Affleurement 1Br

Unité 3 : L'Oolithe vacuolaire est surmontée par une succession de petits bancs micritiques gris sans élément (sur 2 mètres d'épaisseur au maximum). Vers le haut, les bancs prennent une couleur brun - beige et deviennent de plus en plus tendre, l'épaisseur d'un de ces bancs varie entre 5 et 30 cm. Des niveaux coquilliers lenticulaires érodent parfois les bancs sublithographiques, ces passées lumachelliques mesurent entre 0 et 20 cm d'épaisseur.

Le dernier banc calcaire se trouve 2 m au-dessus du sommet du calcaire oolithique. Initialement sublithographique, ce niveau de 20 cm d'épaisseur, est altéré et recristallisé et possède un aspect caverneux avec des cristallisations blanches de calcédonite et de calcite.

Unité 4 : Les derniers mètres de la coupe sont essentiellement marneux et argileux, des niveaux de marnes brunes ou verdâtres parfois feuilletées alternent avec des argiles noires à passées ligniteuses. Des bancs plus calcaires peu épais (5-10 centimètres d'épaisseur) peuvent s'intercaler.

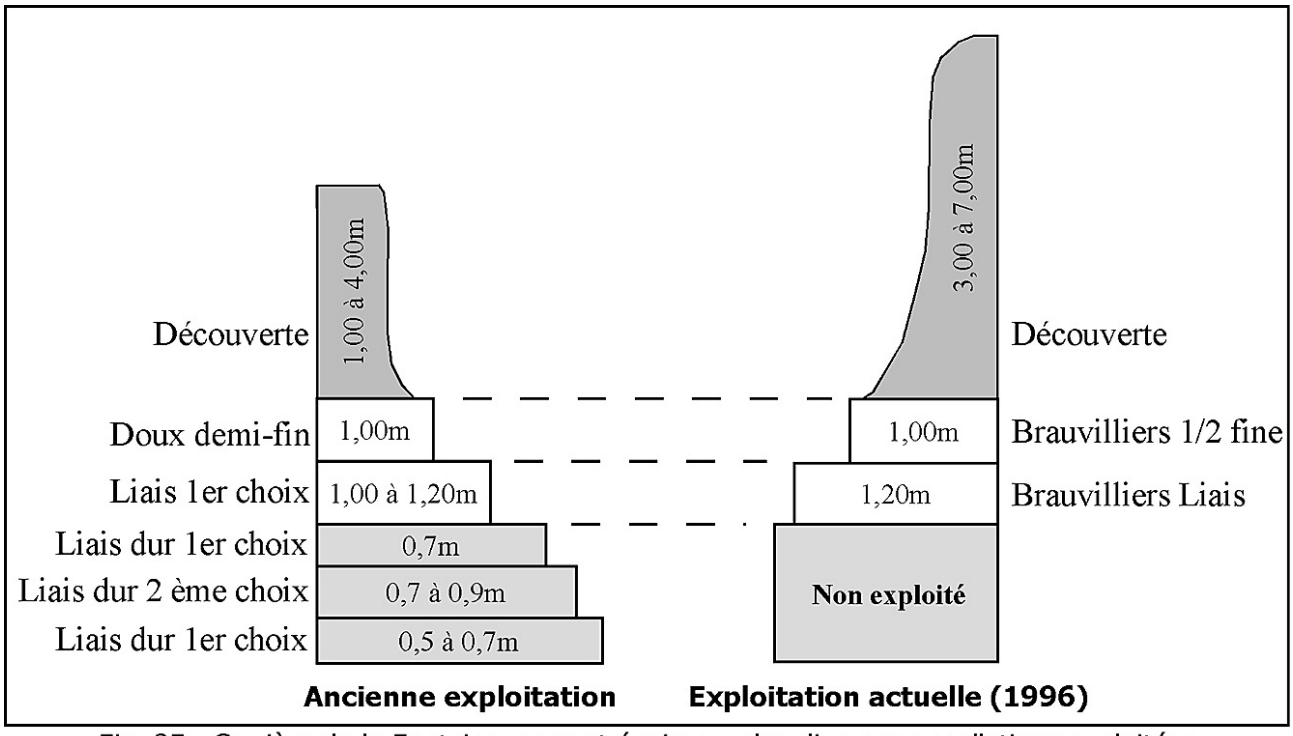


Fig. 25 : Carrière de la Fontaine, nom et épaisseur des diverses appellations exploitées (d'après Noël, 1970, François, 1992 et observations personnelles), Oolithe vacuolaire, Brauvilliers

Remarque : La comparaison des données bibliographiques récentes (François, 1992 et Rocamat, 1996) avec celles des années 70 (Noël, 1970 ; Bousquié, 1979) montre des différences dans les caractéristiques pétrographiques du Liais de Brauvilliers (Tab. 8). Or, on constate que l'exploitation de la carrière de la Fontaine s'est elle aussi modifiée dans le temps (Fig. 25).

Les bancs durs, moins homogènes dont la teinte présentaient parfois une tendance beige à jaunâtre, ne sont plus exploités à l'heure actuelle. Nous signalons donc que les anciennes appellations de Liais de Brauvilliers et le banc exploité actuellement ne sont peut-être pas tout à fait similaires.

Environnements de dépôts et cadre séquentiel

L'oolithe vacuolaire est un dépôt de milieu marin très peu profond, mais sans indice d'émersion. Les litages obliques sont des dunes hydrauliques 3D : typiques d'environnements tidaux, les passées lumachelliques sont disposées en lentilles peu épaisses à base ravinante (tempestites). Pourtant, comme les seuls éléments sont des oolithes, des pellets de crustacés et des coquilles de lamellibranches typiques de milieux saumâtres, rien ne prouve que l'environnement soit marin : il peut-être saumâtre, lagunaire… Vers le Nord du bassin carrier : Combles-en-Barrois, Ville-sur-Saulx…, la présence de Milioles et de nombreux lithoclastes témoigne d'environnements légèrement différents mais toujours de faible profondeur. Enfin, notons que la diagenèse précoce affecte largement les divers microfaciès : dolomitisation (indice d'eaux mixtes), compaction des oolithes au sommet de la formation…

De façon générale, la présence de bancs oolithiques à litages obliques surmontés par des bancs micritiques sans éléments puis par des marnes et argiles feuilletées à passées ligniteuses montre une tendance globale au comblement et à la baisse de l'hydrodynamisme. La séquence de dépôt est globalement régressive avec progradation des faciès et une limite de séquence au toit des marnes : discontinuité érosive avec émersion (paléokarst). Si cette limite correspond à la limite Jurassique – Crétacé, son importance dépasse la cadre régional, mais comme au cours de ce travail aucune faune à caractère biostratigraphique n'a été récoltée, nous ne pouvons préciser ce point. Enfin, et pour la même raison, l'absence de faune et de repères biostratigraphiques ne permet pas de corréler réellement les coupes (même si elles sont très proches) et une démarche d'analyse du type stratigraphie séquentielle à haute résolution ne permettrait à terme que de corréler des unités lithologiques.

d/ Inventaire et caractérisation des variétés de microfaciès

1 : Généralités

Le faciès le plus commun de ce groupe de calcaires est bien défini par le terme d'Oolithe vacuolaire. Car 90% des éléments sont des oolithes dont les nucleus sont totalement ou partiellement dissouts. Pourtant, sous une relative homogénéité du faciès, l'Oolithe vacuolaire présente une grande diversité de microfaciès. Ces microfaciès seront différenciés à la fois en fonction des éléments contenus (allochèmes de la classification de Folk, 1959) : oolithes, coquilles, pelletoïdes, et de leur état de préservation (dissous, écrasés, dolomitisés)… Enfin, des variétés plus locales peuvent être mises en évidence comme par exemple la Pierre de Chévillon avec une phase supplémentaire de cristallisation de sparite secondaire.

La grande particularité de ce calcaire est la dissolution du nucléus des oolithes, c'est à dire une phase de diagenèse précoce qui affecte préférentiellement les pellets fécaux (calcite hautement magnésienne) en respectant les cortex des oolithes et le ciment palissadique (calcite bassement magnésienne).

2 : Inventaire des différents microfaciès d'Oolithe vacuolaire

Type n°1 : microfaciès à oolithes dominantes (80-90% des microfaciès rencontrés) :

- 1a : microfaciès oolithique vacuolaire sparitique. Il s'agit du faciès le plus typique, la phase granulaire (50%) comprenant uniquement trois types d'éléments : des oolithes, des pellets non oolitisés et des coquilles plus ou moins éparses. Ce microfaciès, une oosparite grainstone, correspond à l'appellation ½ fine non coquillière et servira de microfaciès de référence pour l'Oolithe vacuolaire (Fig. 26).

Les éléments, sont liés par un ciment isopaque palissadique scalénoédrique incluant parfois les traces d'un ciment aciculaire qui aurait par la suite recristallisé en ciment de type « bladed ». La cimentation n'obture généralement pas totalement la porosité intergranulaire, laissant des vacuoles millimétriques, les ciments représentent globalement 25% du total de la roche.

La macroporosité est très importante : souvent plus de 25%, et de deux types :

- macroporosité intragranulaire : une phase de dissolution a affecté les nucléus des oolithes et la plupart des coquilles de lamellibranches. La porosité ainsi formée représente globalement 15 à 25% du volume de la roche. Cette phase de dissolution est relativement précoce (puisque qu'elle précède la phase de compaction mentionnée au microfaciès type 5b et les épisodes locaux de dolomitisation : microfaciès type 6). De plus, cette macroporosité intra-oolithes explique le très fort pourcentage de porosité piégée de ce calcaire (près de 60%). La porosité intragranulaire dépend donc du taux de dissolution des nucléus, dans le microfaciès de référence, ce taux de dissolution se situant entre 50 et 75%.

- macroporosité intergranulaire : le volume des vacuoles entre les grains est fonction du développement de la cimentation et du taux de compaction. Le taux moyen de cimentation du microfaciès de Type 1a est environ de 25%, la macroporosité intergranulaire représentant entre 5 et 25% du volume du calcaire.

La microporosité est faible : 5 à 10%, elle sera principalement composée de micropores au sein des oolithes (cortex ou vestiges du nucléus) ou entre les cristaux du ciment palissadique.

Les différentes phases diagénétiques inventoriées sont représentées dans la figure 26, on y distingue les ciments palissadique globalement isopaques liant les éléments entre eux (ici des oolithes au nucléus partiellement ou totalement dissous). Cette figure illustre parfaitement la faible connexion de la porosité soit en raison de sa nature intragranulaire (dissolution des nucléus), soit en raison de l'obturation de l'espace intergranulaire par le ciment palissadique. Dans certains microfaciès, la macroporosité est mieux connectée ou au contraire plus limitée (augmentation de la cimentation, dissolution des nucléus moins fréquente, Fig. 33).

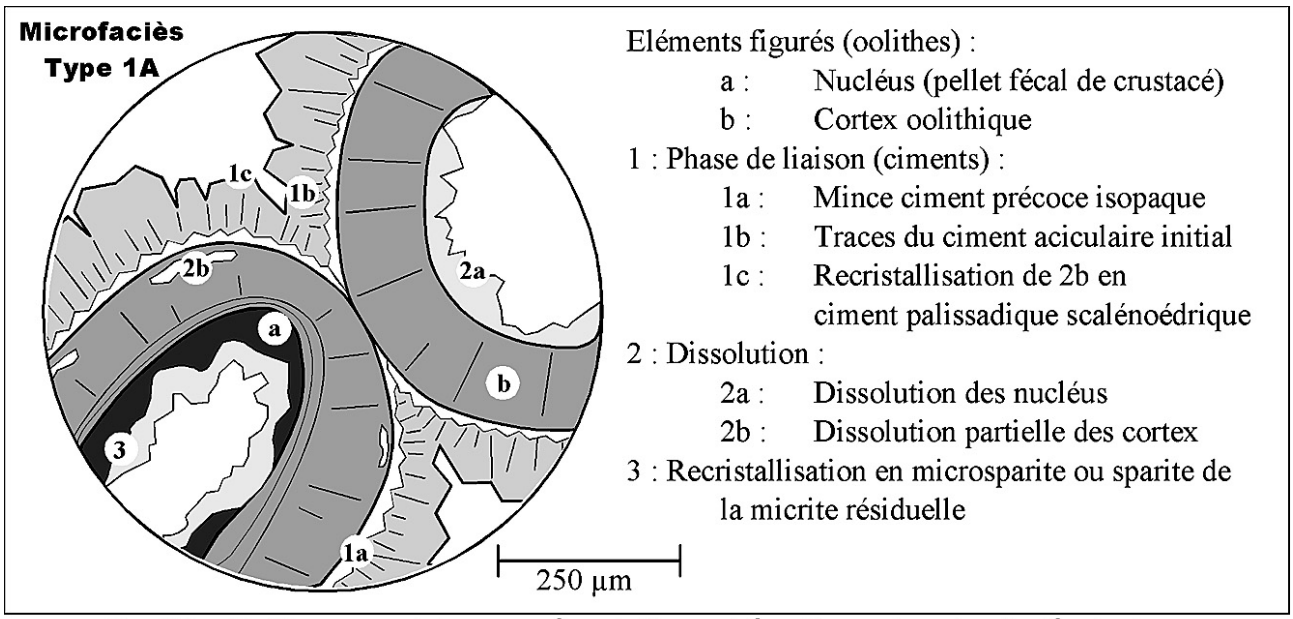


Fig. 26 : Oolithe vacuolaire, représentation schématique du microfaciès typique (éléments figurés, phases de liaisons et phases diagénétiques)

Ce microfaciès peut passer rapidement et sans logique géographique aux autres microfaciès : type 1b (présence d'une micrite matricielle), type 2a (augmentation du nombre de coquilles de lamellibranches), type 3b (cimentation plus importante avec préservation de nombreux nucléus) et type 6 (poche de dolomitisation) ; ceux-ci pouvant se rencontrer « aléatoirement » car ils sont le résultats de condition sédimento-diagénétiques particulières et souvent ponctuelles. Les autres microfaciès type 4, type 5b, variété à Milioles ou Pierre de Chévillon ne se rencontreront que localement selon des conditions décrites aux divers paragraphes concernés.

- 1b : microfaciès oolithique micritique ou microsparitique. Ce microfaciès se rencontre de façon localisée souvent en relation avec les lentilles coquillières, l'épaisseur des litages à matrice micritique est variable, mais généralement assez faible : centimétrique à décacentimétrique. Les niveaux lenticulaires à lumachelle de lamellibranches sont attribués à des tempestites ; la micrite provient donc d'environnements voisins et est redéposée lors de la baisse de l'hydrodynamisme.

Les oolithes ont souvent un aspect diffus et le ciment sparitique palissadique est peu développé voire absent. La macroporosité est nettement plus faible que dans le microfaciès de référence : 5-10%. Elle est principalement composée des pores intragranulaires et on note d'ailleurs un plus faible taux de dissolution des nucléus. La microporosité est plus importante que dans le microfaciès Type 1a car elle est ici directement liée à la présence de micrite (plus ou moins recristallisée en microsparite). Enfin, les oolithes sont parfois légèrement écrasées, alors qu'elles sont intactes dans les bancs de Type 1a. Ce sédiment s'est induré plus lentement que son homologue sparitique car la cimentation précoce y est moindre et sous le poids des sédiments sus-jacents, certains éléments peuvent donc être légèrement compactés, mais ils seront déformés plutôt qu'écrasés.

Type n°2 : microfaciès bioclastique (5-10% des microfaciès rencontrés) :

2a : microfaciès bioclastique vacuolaire sparitique, exploité sous le nom de ½ fin coquillier ou figurant parfois sous le nom de « fromentelle ». Il se rencontre dans des niveaux lenticulaires à base érosive dont la partie inférieure est parfois à matrice micritique (microfaciès 1b et 2b). Les phases diagénétiques sont identiques à celle décrites pour le microfaciès de référence : ciment palissadique, dissolution importante (les coquilles sont souvent entièrement dissoutes) et recristallisation à la périphérie des pores intergranulaires. La macroporosité est toutefois supérieure aux microfaciès non coquillier avec parfois des porosité totales supérieures à 50%. Dans ce cas, la porosité intergranulaire est très importante, les pores pouvant être d'une taille supérieure au centimètre. Dans les constructions, ce microfaciès est souvent présent dans les colonnes, taillées en délit du fait de la faible épaisseur des niveaux lenticulaires.

2b : microfaciès bioclastique micritique ou microsparitique. Comme pour le microfaciès oolithique : type 1a, il existe ponctuellement une variante bioclastique à matrice micritique (oomicrite) où la macroporosité sera plus faible que dans la microfaciès 2a.

Type n°3 : microfaciès à pellets fécaux dominants (- de 5% des microfaciès rencontrés) :

3a : Ce microfaciès assez rare contient de nombreux pellets non oolitisés, bien reconnaissables et dont la structure interne permet l'attribution à des crustacés (Flugël, 1982), il s'agit donc d'une oopelsparite (selon la classification de Folk, 1959). La cimentation est plus faible que dans le microfaciès de référence et la dissolution de la micrite moins intense : la macroporosité sera donc plutôt intergranulaire et la microporosité plus importante. On trouve surtout ce microfaciès à la base de la formation, dans les premiers litages obliques (site 1Sa par exemple). Ce microfaciès marque alors la transition entre les calcaires dolomitiques sans oolithes de l'unité 1 et l'Oolithe vacuolaire de l'unité 2 (voir Fig. 31a et 31b). Ce microfaciès peut aussi correspondre aux niveaux oolithiques où le pourcentage de nucléus dissouts est inférieur à la moyenne (75% et plus) et il se rencontre alors intercalé dans divers niveaux de l'unité 2 (en fonction de conditions sédimento-diagénétiques).

3b : Dans certains litages de l'unité 2, les nucléus des oolithes sont mieux préservés que dans le faciès de référence : globalement 50% des nucléus sont préservés contre environ 25% dans le microfaciès Type 1a. On observe une légère augmentation de la cimentation sparitique qui pourrait expliquer cette meilleure préservation des éléments. En effet, la cimentation étant plus forte, la porosité intergranulaire est plus faible et les fluides influençant la dissolution des nucléus ont moins circulé à l'intérieur de ces litages obliques : donc les nucléus oolithiques sont mieux préservés. Ainsi, dans certains niveaux de l'Oolithe vacuolaire la macroporosité est plus faible que dans le microfaciès de référence. En effet, elle ne représente que 5 à 15% de la roche selon l'importance de la cimentation et du taux de préservation des nucléus des oolithes.

Type n°4 : faciès à lithoclastes micritiques (- de 5% des microfaciès rencontrés) :

Le microfaciès type 4 est présent au Nord d'Haironville dans les carrières à l'Est de la Saulx (surtout dans les carrières de Ville-sur-Saulx et de Combles-en-Barrois). Il se trouve alors localisé à certains litages obliques d'angles faibles et à base érosive. Parfois les lithoclastes sont de véritables graviers ou galets (pouvant atteindre 8 à 10 cm de diamètre) de micrite sans éléments de couleur beige ou grise (dismicrite, selon Folk, 1959, texture mudstone selon Dunham, 1962). Dans d'autres niveaux, il s'agit d'intraclastes, repris d'un mince niveau micritique érodé dont on retrouve parfois les lambeaux.

Type n°5 : faciès à éléments engrenés ou écrasés (- de 5% des microfaciès rencontrés) :

5a/ microfaciès à éléments comprimés à engrenés. Il est observé dans des niveaux où la cimentation et l'induration ont été plus lente que dans le reste de la formation. Dans ce cas, les éléments ont été comprimés : aplatissement aux points de contact avec parfois des microstylolithes, pénétration entre les grains par pression - dissolution (le ciment précoce se comportant comme un poinçon). Ce microfaciès se rencontre ponctuellement au sein de l'Oolithe vacuolaire (Unité 2), en fonction des conditions sédimento-diagénétiques. Ces niveaux peuvent ou ont pu être utilisé comme pierre de taille et peut donc s'observer en œuvre.

5b et 5c/ microfaciès à éléments engrenés à écrasés. Ce microfaciès très particulier ne se rencontre qu'au sommet de l'Oolithe vacuolaire, car bien que cette unité ne se termine pas par une surface de discontinuité, on remarque, dans les deux derniers centimètres, une brutale transformation du microfaciès. Les éléments sont engrenés et même écrasés, seules les oolithes avec un cortex suffisamment résistant sont encore reconnaissables alors que les autres éléments forment comme des « lamines ». Ce microfaciès n'a apparemment pas été exploité pour la pierre de taille car les oolithes et les éléments sont écrasés, la macroporosité très faible : moins de 5%, et son aspect macroscopique compact est très éloigné de celui de l'Oolithe vacuolaire.

Type n°6 : faciès partiellement à totalement dolomitisé (5-10% des microfaciès rencontrés) :

6a/ microfaciès faiblement dolomitique. Il s'agit d'un microfaciès pouvant être rattaché à un autre type mais qui se distingue par la présence de rhomboèdres de dolomite (Fig. 28). Les modèles de précipitation d'une telle dolomite sont très nombreux (Tuker et Wright, 1990, Wendte *et al.*, 1998), notons seulement que la dolomitisation précoce d'un calcaire est souvent un indice de l'effet diagénétique d'eaux mixtes ou douces. Dans le microfaciès type 6a, faiblement dolomitisé, des fantômes rhomboèdres bien individualisés (dolomite de texture idiotopique) sont épars dans les espaces intergranulaires ou parfois au sein des éléments micritiques ou oolithiques. La dolomite étant souvent partiellement ou totalement dissoute, les rhomboèdres se trouvent réduis à l'état de macropores. La structure du sédiment et sa texture ne sont pas modifiées par la dolomitisation et

l'aspect macroscopique de la roche est identique à celui des autres microfaciès. Ce microfaciès se rencontre ponctuellement au sein de la formation (en fonction des conditions sédimento-diagénétiques). Il peut ou a pu être utilisé comme pierre de taille et donc s'observer en œuvre. (voir Chapitre 2, Fig. 75a et Fig. 75b).

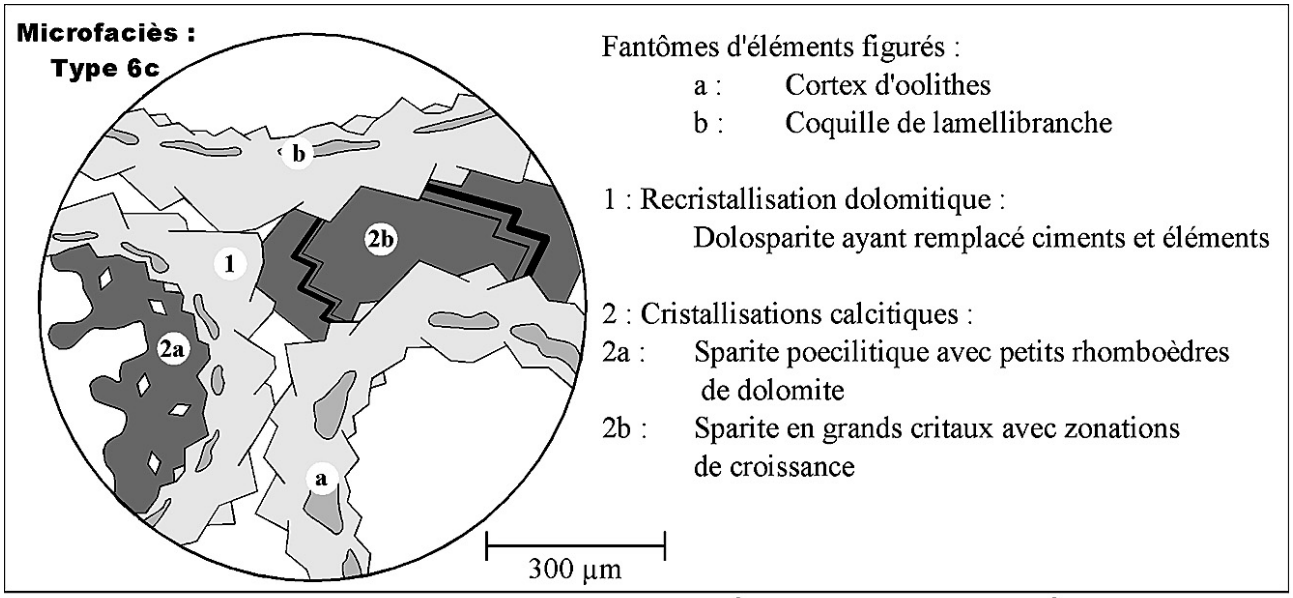
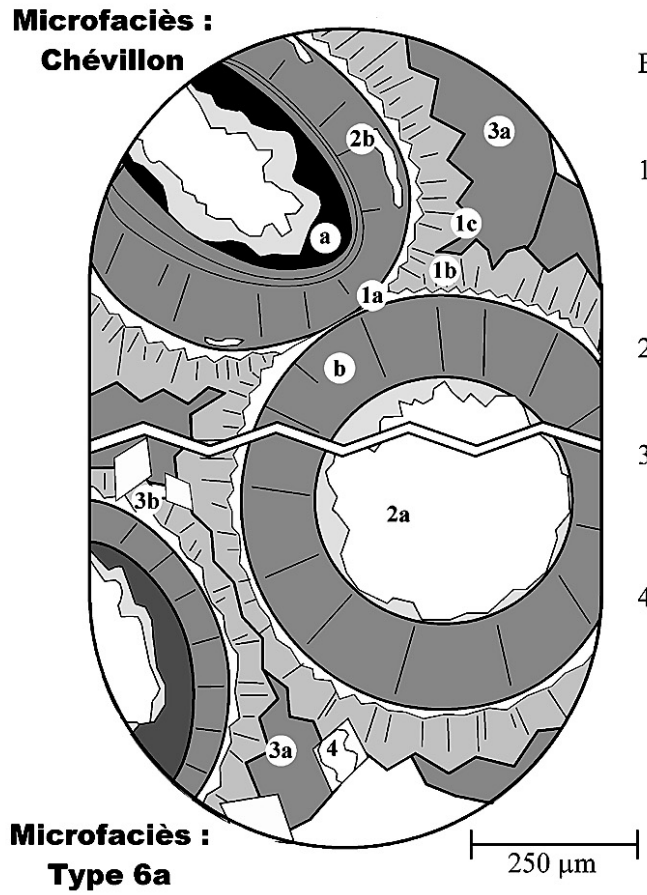


Fig. 27 : Oolithe vacuolaire, microfaciès totalement dolomitisé (éléments figurés, phases de liaisons et phases diagénétiques)

6b et 6c/ microfaciès fortement à totalement dolomitisés. Dans quelques zones, notamment la partie Est de la carrières de la Fontaine à Brauvilliers, la dolomitisation est beaucoup plus poussée avec de grands cristaux (dolosparite) qui épousent les contours des anciens composant du microfaciès. Les éléments sont partiellement ou totalement dolomitisés (microfaciès 6c, voir Fig. 27). L'aspect macroscopique de la roche est modifié ainsi que ses propriétés pétrophysiques : la porosité devient très importante (40% et plus). Les éléments sont réduits à l'état de fantôme et les ciments grossièrement recristallisés. La dolomite est encore très présente, même si quelques cristaux ont été dédolomitisés en calcite (ils prennent une coloration rouge à l'Alysarine). Une sparite poecilithique secondaire s'est développée dans les pores intergranulaires et de grands cristaux zonés de calcite colmatent partiellement les vacuoles intergranulaires.

Ce microfaciès est impropre à la construction et il cause généralement l'arrêt des exploitations : zone inexploitée de la carrière de la Fontaine à Brauvilliers, exploitation souterraine au Sud d'Aulnois-en-Perthois. Dans ces deux cas, la dolomitisation s'est effectuée du haut vers le bas sur une profondeur d'environ 1 mètre.



Eléments figurés (oolithes) :
- a : Nucléus (pellet fécal de crustacé)
- b : Cortex oolithique

1 : Phases de liaison (cimentation précoce) :
- 1a : Mince ciment précoce isopaque
- 1b : Trace du ciment aciculaire initial
- 1c : Recristallisation de 1b en ciment palissadique scalénoédrique

2 : Dissolution :
- 2a : Dissolution des nucléus
- 2b : Dissolution partielle des Oolithes

3 : Cristallisations secondaires :
- 3a : Sparite intergranulaire de blocage
- 3b : Rhomboèdres de dolomite se formant où la calcite de blocage 3a est peu développée

4 : Dissolution tardive de la dolomite

Fig. 28 : Oolithe vacuolaire, microfaciès type Pierre de Chévillon passant au microfaciès faiblement dolomitisé type 6a

Variété Pierre de Chévillon (avec sparite secondaire) :

Ce microfaciès n'a été observé que dans les échantillons provenant du plateau au Sud de Chévillon (52) : sites 1Ch et 2Ch. Il s'agit d'une belle pierre de taille, semblable au faciès classique de l'Oolithe vacuolaire, mais qui présente, en microfaciès, une phase diagénétique supplémentaire de cimentation. En effet, l'espace intergranulaire est partiellement ou totalement colmaté par une phase de cimentation secondaire composée de grands cristaux de sparite (phase 3a, Fig. 28).

La porosité de ces faciès est donc plus faible que pour la Pierre de Savonnières ou de Brauvilliers. Cette particularité (phase de cimentation supplémentaire) peut être utilisée pour caractériser la provenance de cette variété de pierres. On y observe également la présence localisée de rhomboèdres de dolomites cristallisant dans les pores intergranulaires (phase 3b) après la formation de la seconde phase sparitique (voir microfaciès 6a, Fig. 28).

Variété à Milioles :

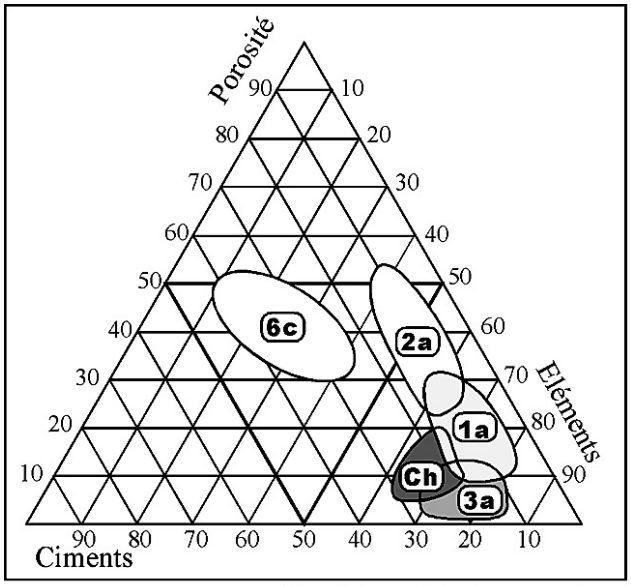
Ce microfaciès n'a été observé que dans les affleurements en marge du bassin carrier de l'Oolithe vacuolaire : sites d'Avrainville (1Av), de Ville-sur-Saulx (1Vi), mais surtout de Combles-en-Barrois (1Cb). Dans les

sites 1Av et 1Vi, les Milioles (de type *Quinqueloculina*) sont peu nombreuses, mal conservées et elles se trouvent essentiellement en nucléus d'oolithes. Alors que dans les affleurements de Combles-en-Barrois, les Milioles sont nombreuses (1/5 des éléments), bien conservées et parfois libres de toute oolithisation. La cimentation de ces microfaciès est généralement moins importante que pour le microfaciès Type 1a. Tandis que la dissolution de la micrite et des nucléus est équivalente à celle observée dans le microfaciès de référence. Une micrite intergranulaire est parfois présente, sa disposition en bordure des pores laissant supposer une influence vadose (mais qui n'a pas été confirmée par l'observation d'autre phase diagénétique typique de ce milieu).

La particularité de ce microfaciès peut être utilisée pour attribuer la provenance de certaines pierres de taille observées en œuvre (carrières plus proches de Bar-le-Duc que de Saint-Dizier).

3 : Discrimination des microfaciès par l'analyse d'images

- a : Discrimination des principaux microfaciès par délimitation manuelle des différents composants.



- 1a : Oolithe vacuolaire sparitique typique
  Macroporosité moyenne : 20 %
- 2a : Biosparite vacuolaire "Fromentelle"
  Macroporosité moyenne : 35%
- 3a : Oolithe sparitique peu vacuolaire (type 3a et 5a)
  Macroporosité moyenne : 5 à 10 %
- Ch : Oolithe vacuolaire avec sparite secondaire (Chévillon), Porosité moyenne : 10 %
- 6c : Calcaire dolomitisé (microfaciès type 6b et 6c)
  Porosité moyenne : 40%

Fig. 29a : Principaux microfaciès de l'Oolithe Vacuolaire
Quantification des phases constituantes

Les différents calcaires exploités dans la formation de l'Oolithe vacuolaire possèdent une structure relativement simple car ils ne sont composés que d'éléments sphériques (oolithes et pellets fécaux) entourés par un ciment palissadique sparitique ; leurs microfaciès peuvent donc être caractérisé à partir de la quantification de ces trois paramètres. On mesure donc respectivement : A/ la quantité d'élément : oolithes, pellets et bioclastes ; B/ le taux de développement de la phase de cimentation : ciments sparitiques ; et C/ l'importance de la macroporosité intergranulaire ou intragranulaire (Fig. 29a). La mesure des surfaces représentées par les 3 phases peut s'effectuer rapidement en délimitant manuellement les contours et en faisant calculer les surfaces représentées

(grâce au logiciel Saisam©). Dans le cas de l'Oolithe vacuolaire, cette méthode permet la caractérisation semi-quantitative de la composition des différents microfaciès (marge d'erreur d'environ 3%), même si cette mesure est réalisée à partir d'une lame mince et donc sur 2 dimensions.

Le microfaciès type 1a correspond à la variété la plus classique d'Oolithe vacuolaire, il apparaît composé de 70% d'éléments, de 10% de ciments sparitiques et de 20% de macroporosité et sera considéré comme le microfaciès de référence (Tab. 10). L'observation d'une différence par rapport à ce standard devra trouver une explication soit sédimentologique soit diagénétique (Fig. 29a et 29b).

Par exemple, le microfaciès type 2a possède une macroporosité moyenne de 40%, une proportion d'éléments de 50% et un taux de cimentation sparitique de 10%. Les différences : 20% de macroporosité de plus que le microfaciès 1a et 20% d'éléments en moins, s'expliquent principalement par l'absence de cortex d'oolithes. Mais elles sont aussi liées à la présence de très grandes vacuoles entre les coquilles (porosité intergranulaire) et par la dissolution quasiment totale des coquilles de bivalves (porosité moldique). Le taux de cimentation est identique à celui du microfaciès de référence 1a (environ 10%), la formation du ciment sparitique n'a donc pas été influencée par la nature des éléments (oolithes ou coquilles de lamellibranches). Les microfaciès type 1a et 2a sont donc des variétés sédimentologiques, fonctions du type d'éléments contenu.

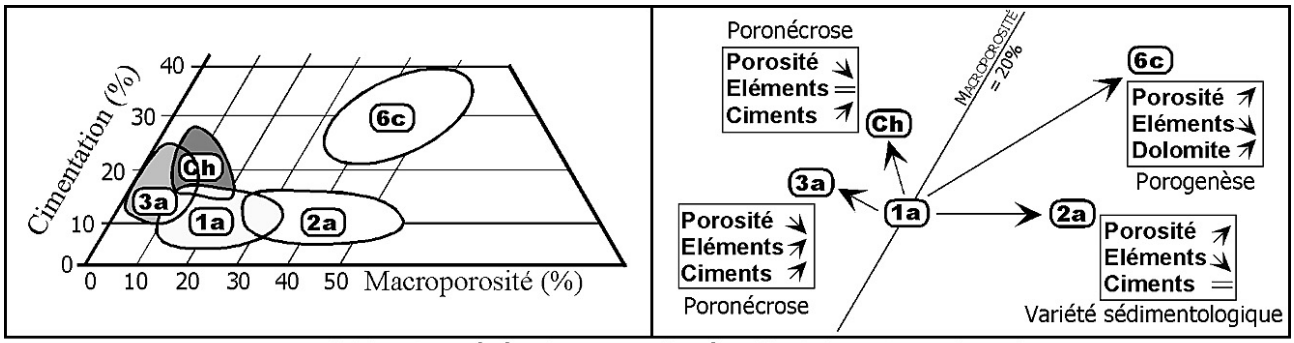


Fig. 29b : Variétés de microfaciès (Oolithe Vacuolaire)
Comparaison avec le microfaciès de référence

Au contraire, les microfaciès 6a et Ch sont fonctions des stades diagénétiques enregistrés par le sédiment :

- 6a : le calcaire est entièrement dolomitisé : les éléments et le ciment calcitique ont recristallisé. La phase de dolomitisation provoque la disparition des cortex oolithique et une nette augmentation de la macroporosité. Ce microfaciès est donc une variété diagénétique avec porogenèse par transformation minéralogique.

- Ch : ce microfaciès présente une seconde phase de cimentation sparitique (Fig. 28), le pourcentage mesuré de ciments sparitiques est plus élevé et la porosité intergranulaire plus faible (macroporosité totale de 5-10% au lieu de 20%). Il s'agit d'une variété diagénétique liée à la formation d'une phase diagénétique supplémentaire (notée 3a sur la figure 28) avec poronécrose par cimentation de la porosité intergranulaire.

- 3a : macroscopiquement cette variété d'Oolithe vacuolaire diffère peu du type référence. Le nombre d'éléments micritiques (pellets fécaux libres ou en nucléus d'oolithe) s'avère plus important : de 70 à 85%

d'éléments et la porosité totale est légèrement plus faible (5 à 10%). Les surfaces mesurées montrent que le taux de cimentation précoce est plus important que dans le microfaciès de référence et ceci explique le faible taux de dissolution des nucléus. En effet, si les ciments précoces sont plus développés, la porosité du sédiment est plus faible. Les fluides, qui ont provoqué la dissolution précoce des nucléus (en calcite hautement magnésienne), ont moins circulé et les dissolutions sont donc moins nombreuses. Cette variété de microfaciès est ici liée à la diagenèse précoce. La cimentation plus intense (phases 1b-1c de la figure 26) ayant limité le développement de la phase diagénétique 2a de dissolution. Ce microfaciès est le résultat de la diminution de l'importance d'une phase de porogenèse en raison d'une légère poronécrose antérieure.

- b : Discrimination des principaux microfaciès par analyse d'images (signatures ternaires).

L'analyse d'images convient particulièrement à l'étude des différents microfaciès regroupés sous l'appellation d'Oolithe vacuolaire. (voir méthode des signatures ternaires : annexe 1). En effet, pour ces différents calcaires, la macroporosité est facilement identifiable car les pores sont de grande taille et la morphologie du réseau poreux est simple. Pour ces microfaciès, les analyses en lumière polarisée-analysée (avec condensateur de lumière) ou en lumière « naturelle » avec utilisation d'une résine colorée en bleu donnent des résultats identiques (moins de 3% de différence). Pour des raisons de simplicité nous avons donc choisi de travailler en lumière polarisée analysée.

Paramètres d'éclairage et d'acquisition vidéo pour les microfaciès de l'Oolithe vacuolaire :
- Lumière polarisée avec lentille condensatrice, Luminosité bloquée réglage photographique (indice 9).
- Faisceau lumineux dérivé vers utilisateur et caméra tri-CCD.
- Filtre bleu, Pas de filtres gris.
- Réglages caméra : Gain 05 DB, G. rouge –20, CCD iris 1/250ème.

Réglages des seuils des trois phases mesurées :
- 01 - 65 : Phase A : macroporosité, micrite sombre (phase noire).
- 66 - 155 : Phase B : micrite, oolithes et pellets fécaux.
- 156 – 255 : Phase C : microsparite et sparite, ciments et recristallisations en dolosparite (phase claire)

La représentation graphique des signatures ternaires de 6 échantillons d'Oolithe vacuolaire (Fig. 30a et 30b) est fortement comparable à la quantification manuelle figurée précédemment. Ce type d'analyse, rapide à mettre en œuvre, est donc particulièrement adapté à l'étude de cette pierre à bâtir. Car les mesures, effectuées en routine, montrent une grande précision dans les résultats obtenus (moins de 5% de marge d'erreur). Seule la quantification de la phase de cimentation pose de légers problèmes car parfois les réglages lumineux ne permettent pas de différencier les cristaux de sparite éteints de la micrite des éléments figurés (voir Fig. 32), mais ce problème peut être résolu en utilisant des échantillons à surface polie et une lentille condensatrice de lumière.

- Le microfaciès de référence (type 1a) apparaît nettement et les pourcentages de composition mesurés sont identiques à ceux mesurés manuellement (Fig. 29a et 29b). Les échantillons 1Sa5b et 1Br1b (l'un de Pierre de Savonnières, l'autre de Pierre de Brauvilliers) sont entièrement compris dans la zone du microfaciès de référence (type 1a) : il n'apparaît donc pas ici de différence entre les deux appellations.

- 1Sa5a : l'échantillon est pour moitié composé d'oosparite vacuolaire type 1a et pour moitié de biosparite vacuolaire type 2a. Le pourcentage représenté par la cimentation est quasiment identique à celui du type 1a (soit 10%), même si une légère diminution est constatée dans les moyennes des mesures. Ponctuellement, la valeur de la porosité dépasse les 50%, en effet, parfois les vacuoles entre les coquilles de lamellibranches dépassent le ½ centimètre de long et elle remplissent plus de la moitié du champ mesuré (Images 2D, microscope optique).

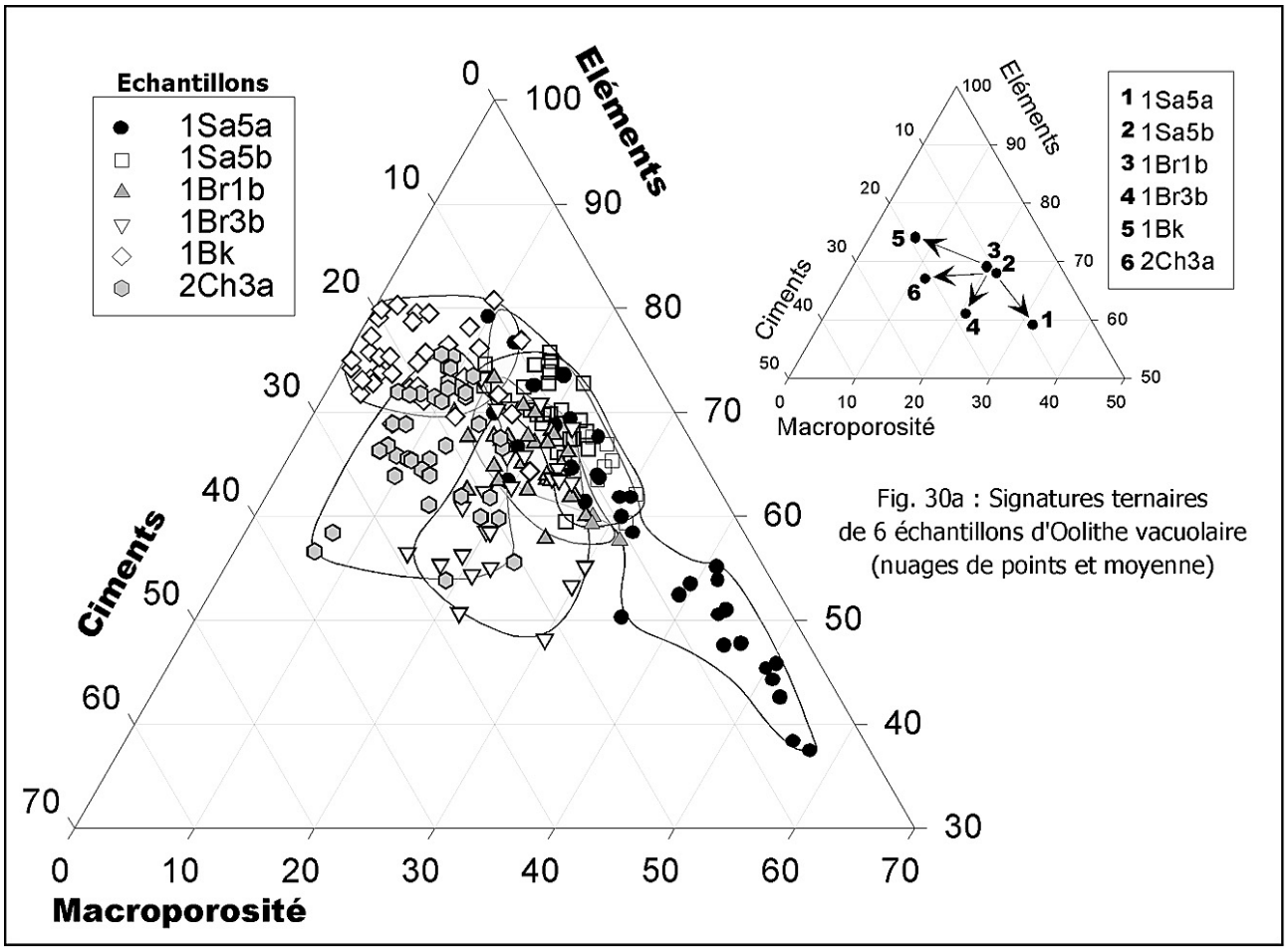


Fig. 30a : Signatures ternaires de 6 échantillons d'Oolithe vacuolaire (nuages de points et moyenne)

- 1BrK : cet échantillon récolté à proximité d'un karst actuel est caractérisé par une macroporosité inférieure à la valeur de référence (avec parfois moins de 5% de macroporosité totale), une cimentation et un taux d'éléments préservés plus importants. Il est à rapporter à la variété type 3a, la macroporosité intergranulaire étant encore réduite par une cimentation tardive liée à la karstification récente.

-2Ch3a : la variété Chévillon est nettement discriminée, quelques mesures dépassent les 35% de cimentation et montrent nettement le développement de la phase de cimentation sparitique secondaire.

- 1Br3b : cet échantillon, prélevé dans un des bancs exploités pour la pierre de taille de la carrière de Brauvilliers diffère du microfaciès de référence : même pourcentage de porosité voire un pourcentage inférieur, ciments plus importants et éléments moins bien représentés. L'examen au microscope permet d'expliquer cette différence. En effet, on observe de nombreux indices de pression-dissolution : micro-stylolithe, poinçonnement de grains, écrasement… Or, ce sont les grains qui ont subis cet écrasement, le ciment palissadique étant préservé alors que l'élément lui-même a partiellement disparu. Nous pouvons donc considérer que cet échantillon est de type 5a, avec un écrasement partiel des éléments.

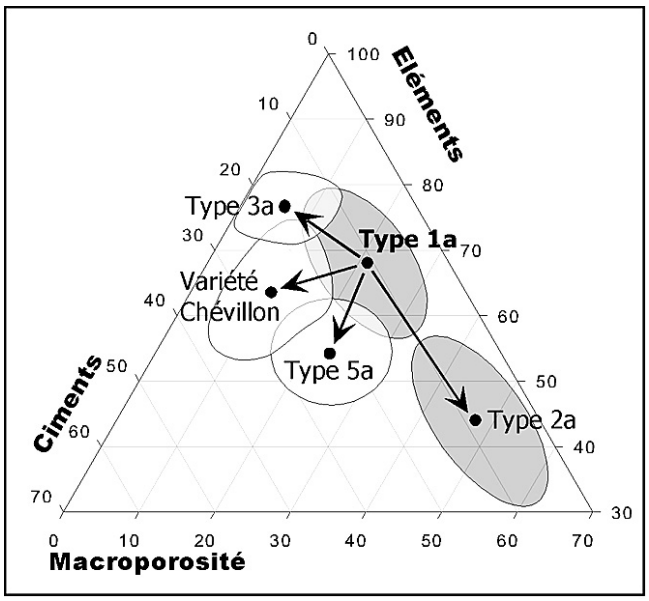


Fig. 30b : Signatures ternaires types de quelques microfaciès d'Oolithe vacuolaire

- c : Analyse de la base de l'unité 2 par analyse d'images (signatures ternaires).

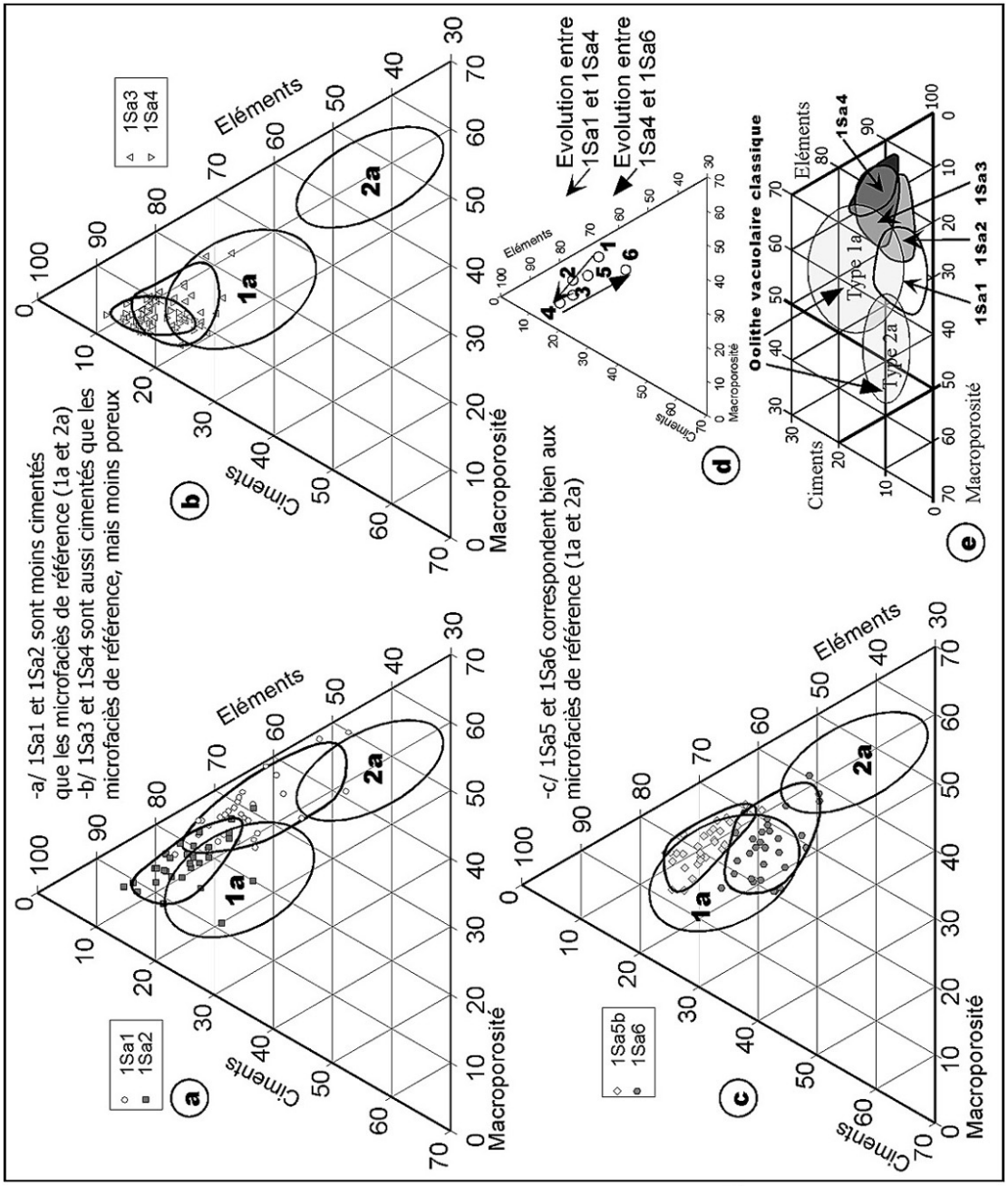
La carrière exploitée au nord de Savonnières-en-Perthois permet de mettre en évidence l'évolution du microfaciès depuis le calcaire oolithique non vacuolaire de l'unité 1 à la pierre de Savonnières classique. Pour cela nous avons échantillonné la base de la coupe (Fig. 31a), analysé la transformation du microfaciès et examiné l'évolution de la signature ternaire des différents échantillons (Fig. 31b).

Nous mettons ainsi en évidence les deux processus qui conduisent à la formation de l'Oolithe vacuolaire :

- une **cimentation** (ciment précoce palissadique) progressivement croissante : 6,5% (1Sa1) à 12-15% pour les échantillons 1Sa3 à 1Sa6 ;

- une brutale augmentation de la **dissolution** des éléments micritiques qui apparaît entre l'échantillon 1Sa4 et 1Sa5, la macroporosité totale passant de 7% à 20 et même 30%.

Nous montrons donc (Fig. 31b) que dans une première étape, la porosité totale diminue par augmentation de la cimentation et de la proportion d'éléments : augmentation de la cohésion de la roche (échantillon 1Sa2 à 1Sa4) avec une diminution de la porosité intergranulaire (25% en 1Sa1 contre 5% en 1Sa6).



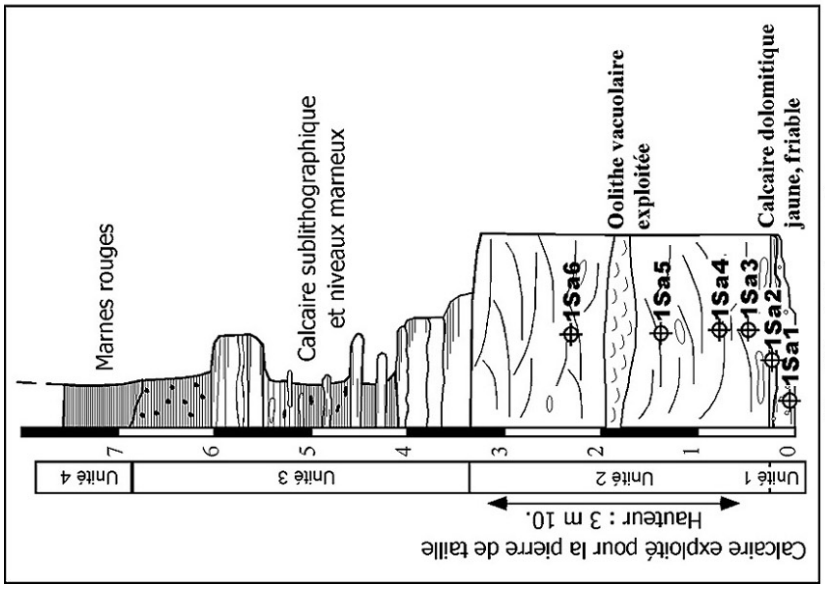


Fig. 31a (ci-dessus) : positions des prélèvements, site 1Sa

Fig. 31b (ci-contre) : Signatures ternaires des échantillons 1Sa1 à 1Sa6 (par analyse d'images)
a à c : nuages de points, d : moyennes, e : signatures ternaires analysées

Puis dans une deuxième étape, la dissolution des éléments micritiques (nucléus d'oolithes) provoque une augmentation de la macroporosité totale (de 7 à 25%) par apparition d'une macroporosité intragranulaire alors que la porosité intergranulaire reste stable (environ 5%). Dans le site 1Sa, la véritable pierre à bâtir type Oolithe vacuolaire n'apparaît donc qu'au dessus des 40 premiers centimètres de l'unité 2 (Fig. 31a). La base de l'unité (10 premiers centimètres) n'est pas assez cimentée pour assurer une bonne cohésion à la roche, alors que les 30 centimètres suivants ont une porosité plus faible que la pierre de référence. Il faut donc veiller à éviter de mettre en œuvre ce niveau car la différence de porosité avec le faciès normal provoquerait peut-être une barrière de porosité nuisible à la durabilité de la roche.

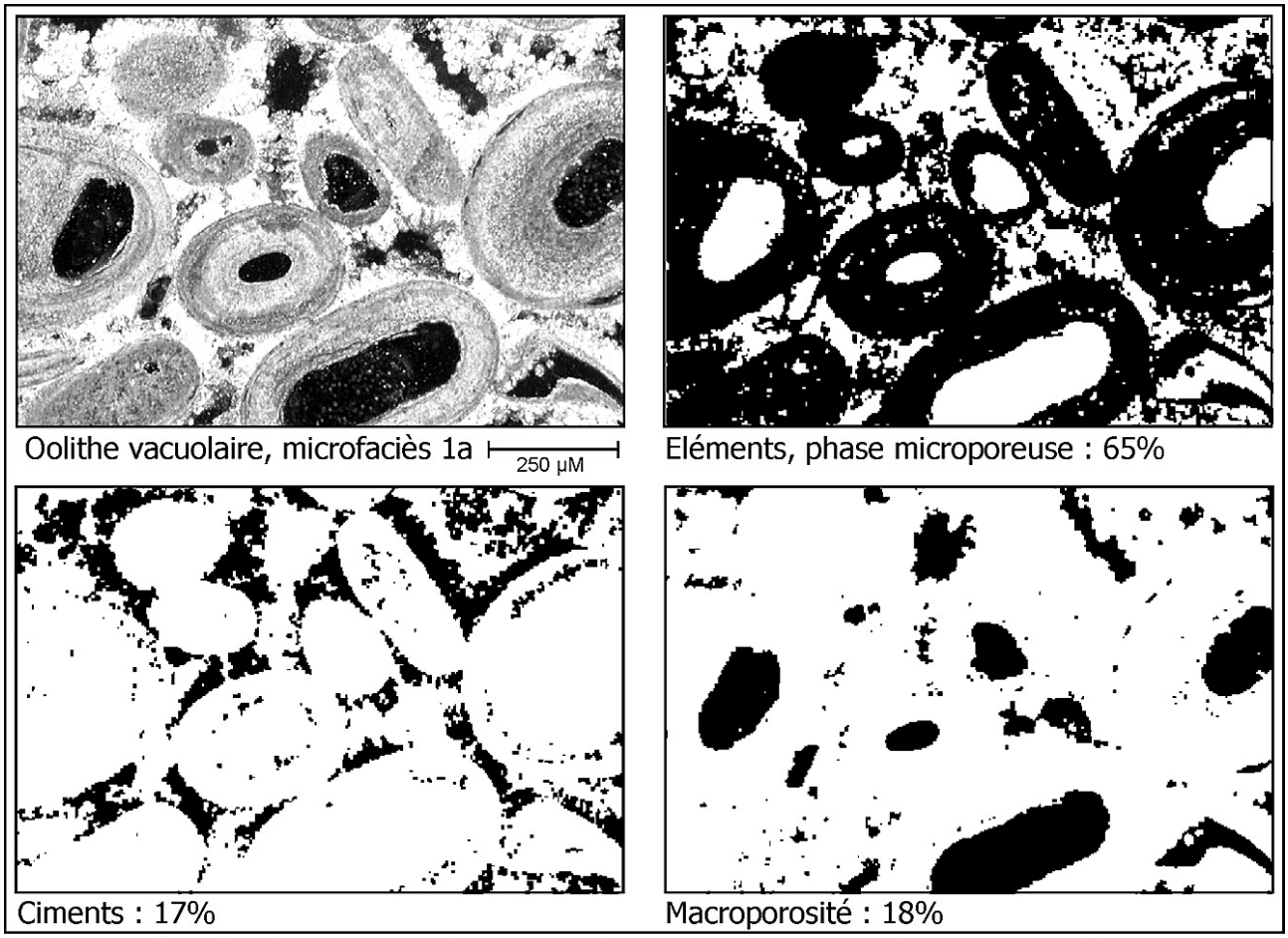


Fig. 32 : Oolithe vacuolaire, quantification des composants du microfaciès :
Eléments, ciments et porosité, phases seuillées et transformées (ouverture puis fermeture)

- d : Analyse morphologique de la porosité

La porosité de l'Oolithe vacuolaire est de trois types (Fig.32) :

- 1/ Macroporosité intergranulaire : en effet, la phase de cimentation n'obture pas totalement la porosité intergranulaire et des vacuoles subsistent entre les grains (entre 25 et 200 µm pour le microfaciès type 1a et 25 et plusieurs mm pour le microfaciès type 2a) ;

- 2/ Macroporosité intragranulaire : la phase de dissolution de la calcite provoque l'apparition d'une macroporosité moldique mal connectée dans le cas des nucléus oolithiques, très bien connectées dans le cas de coquilles de lamellibranches ;

- 3/ Infraporosité intragranulaire : les pellets fécaux subsistants et les cortex oolithiques non touchés par la phase de dissolution contiennent une phase infraporeuse non négligeable. Bousquié (1979) montre par porosimétrie mercure qu'environ 1 tiers de la porosité totale (soit 10% du volume de la roche) est constitué de pores ayant une taille d'accès inférieure à 1µm. C'est à dire que les éléments micritiques (dont la quantité est ici estimée à 65%, Fig. 32) ont une microporosité intrinsèque représentant 20%de leur volume total.

Du fait de la grande taille des pores, la macroporosité de l'Oolithe vacuolaire est facilement observable au microscope en lumière polarisée-analysée (Fig. 32). La mauvaise connexion des pores intragranulaires apparaît nettement, le degré de connexion de la macroporosité intergranulaire étant fonction du développement de la cimentation sparitique (Fig. 33). Le très fort pourcentage de porosité piégée (environ 60% de la porosité totale) s'explique donc par la nature intragranulaire d'une partie de la macroporosité et par la présence d'une phase infraporeuse. Enfin, le coefficient d'absorption très faible (0.5 à 0.67) est lui aussi expliqué par la morphologie de la porosité et principalement par la taille des pores intragranulaires (environ 200µm de longueur moyenne) qui ne se saturent pas en eau, provoquant le piégeage naturel de nombreuses bulles d'air.

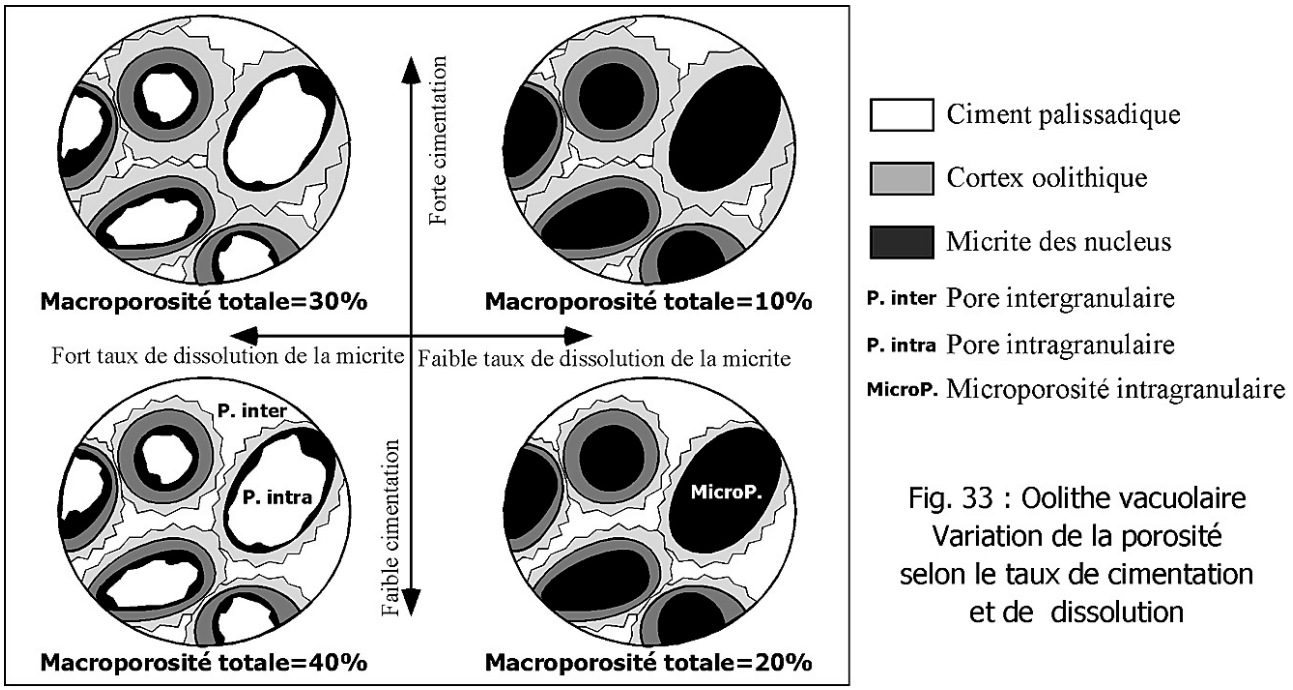


Fig. 33 : Oolithe vacuolaire
Variation de la porosité
selon le taux de cimentation
et de dissolution

e/ Synthèse :

1 : L'oolithe vacuolaire : un calcaire oolithique poreux peu cimenté

Les différents calcaires exploités dans la formation de l'Oolithe vacuolaire ont tous les même caractéristiques globales : ils sont composés majoritairement d'oolithes et sont très macroporeux. Cette forte porosité est principalement liée à deux facteurs : la **cimentation** qui n'obture pas totalement la porosité intergranulaire et une phase de **dissolution** qui a crée une macroporosité moldique.

Le faciès de référence présente un faible taux de cohésion, uniquement fonction du taux de développement du ciment palissadique. Cet indice pouvant être estimé par analyse d'image (Fig. 30, 32 et 34).

Les différentes appellation de pierres à bâtir de cette formation (Pierre de Savonnières, Pierre de Brauvilliers), sont donc des calcaires très granulaires, aux éléments faiblement cimentés.

La morphologie de la porosité est très particulière puisqu'elle est composée à 60% par de grands macropores intragranulaires, mal connectés à l'ensemble du réseau poreux. Mais, notons que les microfaciès à phase de liaison micritiques (1b et 2b) ainsi que les microfaciès à éléments écrasés (5a et 5b) ou dolomitisés (6a à 6c) ne répondent pas à cette logique de composition. Leur comportement en œuvre pourra être différent de celui du microfaciès de référence.

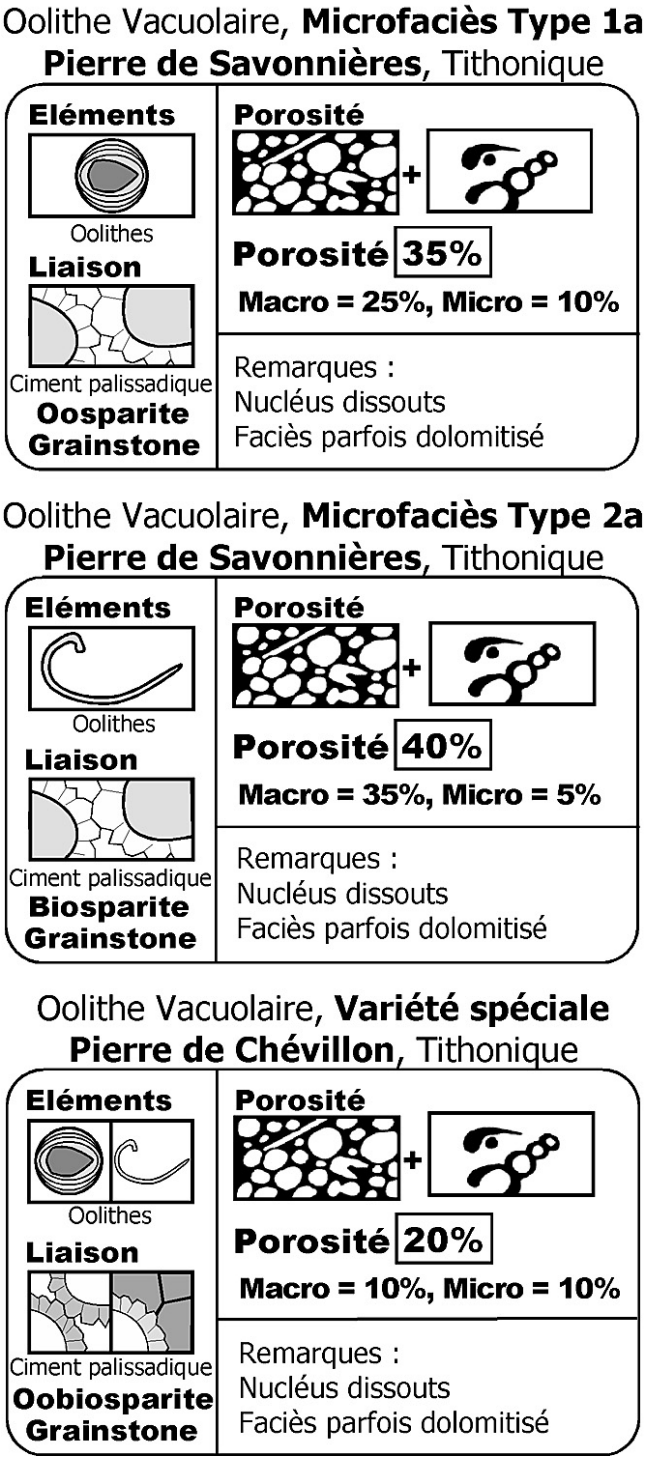


Fig. 34 : Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques de 3 microfaciès d'Oolithe vacuolaire

Les aptitudes d'emploi de l'Oolithe vacuolaire de référence sont étendues, mais ce calcaire est plus particulièrement adapté à une utilisation en élévation, en bandeau et en corniche. Nous avons montré que les échantillons de Pierre ½ fine de Savonnières et de Brauvilliers sont identiques, tant du point de vue sédimento-diagénétique que des propriétés physico-chimiques. Mais s'il apparaît que dans les années 70, la différenciation entre les appellations ½ fin(e) et Liais était justifiée (27% de porosité pour le Liais contre 35% pour les appellations de ½ fin), les échantillons que nous avons étudié ici ne présentent pas de réelles différence entre eux.

2 : Paramètres contrôlant le microfaciès du calcaire

Le nom de la formation (Oolithe vacuolaire) est le terme le plus simple pour caractériser rapidement les diverses pierres à bâtir qu'elle contient. Car ce terme indique l'élément constitutif majoritaire (95% des éléments du microfaciès de référence) ainsi que la principale caractéristique de la roche : **sa forte macroporosité**. Cette porosité est conditionnée par le **taux de dissolution des nucléus des oolithes**, et **l'absence de sparite de blocage**. La macroporosité intragranulaire de forme sub-sphérique et la macroporosité intergranulaire (pore d'une taille supérieure à 100 µm) donnent à la roche sont aspect si particulier ainsi qu'une partie de ses propriétés géotechniques.

Le taux de développement de la phase de liaison (**ciment palissadique isopaque**) conditionne le degré de cohésion granulaire de ce faciès. Et nous avons montré que le taux de dissolution des nucléus est parfois modifié par de faibles variations de ce taux de cimentation (Fig. 29 et Fig. 30).

Le microfaciès de référence (type 1a) est caractérisé par une grande monotonie sédimento-diagénétique (Tab. 10) : 2 types d'éléments (des oolithes et des coquilles de lamellibranches) et un seul type de phase de liaison (un ciment palissadique sparitique).

Composant du microfaciès	Pourcentage représenté	Pourcentage moyen
Eléments : (oolithes, pellets)	60 – 80%	70%
Ciment sparitique	5 – 15%	10%
Macroporosité	10 – 30%	20%

Tab. 10 : Composition du microfaciès de référence de l'Oolithe vacuolaire (type 1a)

Enfin, rappelons que nous avons caractérisé différentes variétés d'Oolithe vacuolaire : bioclastiques (type 2), dolomitiques (type 6), à phase de cimentation supplémentaire (Pierre de Chévillon) ou à Milioles (par exemple dans la Pierre de Combles-en-Barrois). Et que nous avons montré que ces différents types de microfaciès peuvent être reconnus par analyse d'images (méthode des signatures ternaires).

3/ le Calcaire grossier :

Pierre de Courville, Calcaire à *Ditrupa* et autres pierres

a/ Sites d'affleurements

1 : Cadre géographique et géologique

Les affleurements et les carrières de la formation du Calcaire grossier s'observent dans les régions du Tardenois, du Laonnois, du Soissonais, du Valois, du Parisis et du Vexin Français, ce qui correspond à une grande partie du centre du Bassin de Paris. Depuis l'antiquité, ces niveaux calcaires du Tertiaire ont fourni les plus prestigieuses des pierres de taille mais ils sont aussi entrés dans le vocabulaire courant : « Pierre à Liards », « Caillasses d'Ile de France » et l'imaginaire collectif : carrières souterraine de Paris, pierre de taille royale des cathédrales gothiques, abri-refuges et hôpitaux souterrain de la première guerre mondiale… Le Calcaire grossier dépasse donc largement le cadre régional, le nom du Lutétien lui-même fut donné par de A. F. de Lapparent en 1883 aux formations tertiaires de Paris (*Lutetia*) et de ses dépendances (Blondeau, 1965, 1970).

En Champagne-Ardenne, la formation du Calcaire grossier se rencontre, à 15 kilomètres environ à l'Ouest de Reims, à la limite entre les départements de la Marne et de l'Aisne (Fig. 35 et Fig. 36).

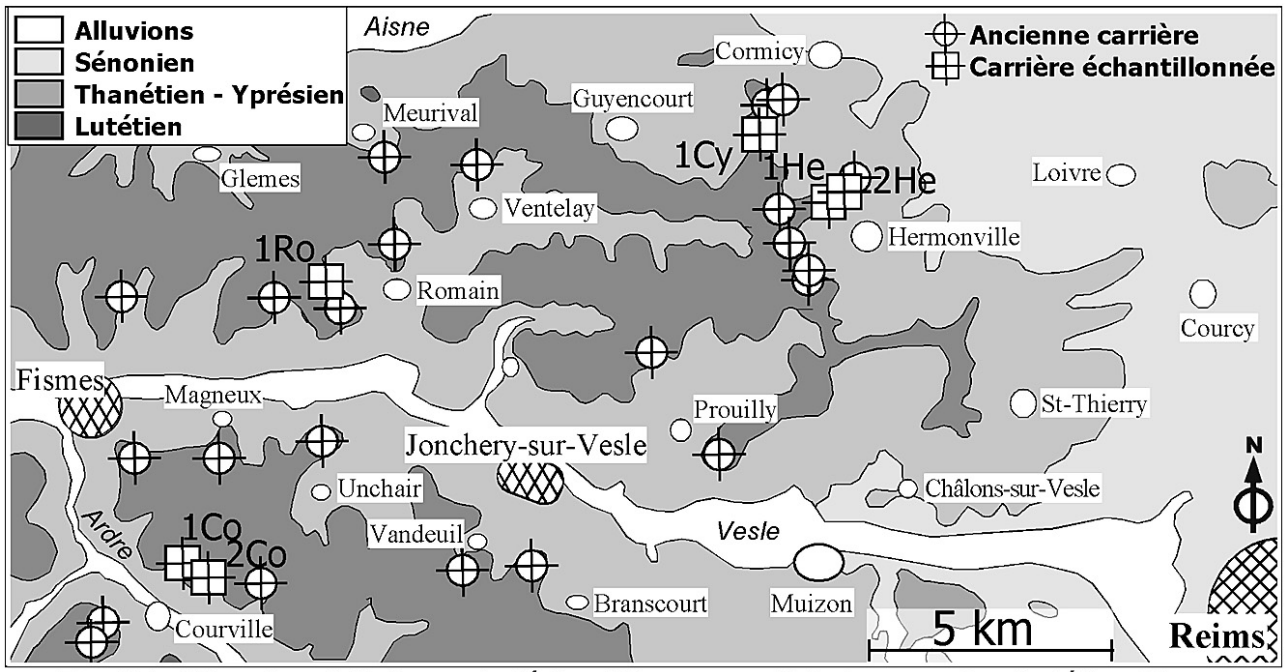


Fig. 35 : Sites d'exploitations et d'échantillonnages, Calcaire grossier, Lutétien Moyen

L'épaisseur de la série lutétienne augmente rapidement vers l'Ouest, la puissance des sédiments marins atteignant environ 40 mètres dans l'Oise (Fig. 38 d'après Blondeau, 1970) alors qu'ils se réduisent à 15-20 mè-

tres à Fismes et à quelques mètres seulement à Chamery (Fig. 36). Ensuite, vers la montagne de Reims, la série marine laisse place à des formations sableuses fluviatiles ou continentales comme les sables du « Tuffeau de Damery » (Hatrival, 1977, Gély, 1996).

Stratigraphiquement, le Lutétien peut être découpé en une succession de formations avec à la base la « Glauconie grossière », un sable glauconieux dont le dépôt est diachrone à l'échelle du bassin (Lutétien inférieur à Paris, Lutétien Moyen vers Reims). Puis le faciès devient carbonaté avec la « Pierre à Liards » à Nummulites dont *Nummulites laevigatus*, et les calcaires à *Ditrupa strangulata* et *Echinolampas calvimontanus* (Paraséquence A6 selon Gély, 1996). Ces « Calcaires à Ditrupa » sont surmontés par les Calcaires à Milioles et *Orbitolites complanatus* qui représentent le véritable « Calcaire grossier » à Milioles. Enfin, la formation des « Marnes et Caillasses » termine le Lutétien avec une alternance marno-calcaire, des faunes de milieux lacustres et des lentilles de gypse (Blondeau, 1965, Gély, 1996).

Ainsi, suivant la position géographique et stratigraphique, les sédiments du Lutétien peuvent provenir d'un dépôt marin, saumâtre ou lacustre (Laurain et Barta, 1973 ; Laurain, 1976 ; Laurentiaux *et al.*, 1972).

Dans la zone étudiée, le Lutétien inférieur ne se rencontre que dans les environs de Fismes et dans la direction de Laon. De même, si les Marnes et caillasses du Lutétien supérieur continental se rencontrent effectivement, les bancs de calcaires à empreintes de Cérithes affleurent rarement. Enfin, notons que géomorphologiquement, les bancs calcaires du Lutétien moyen se situent au sommet des plateaux et forment un talus abrupt si la base de pente comprend les sables cuisiens ou une pente plus douce lorsqu'affleurent les argiles sparnaciennes et les sables thanétiens (Laurain, 1976).

Remarque : les différentes formations du Lutétien ont fait l'objet d'un nombre considérable d'études, signalons particulièrement : Abrard, 1925 et Blondeau, 1965). Pourtant, le « Calcaire grossier » du Bassin de Paris soulèvent encore de nombreux problèmes et motivent toujours des travaux à l'échelle régionale (Tourtebatte, 1995 ; Blanc et Gély, 1997 ; Viré, 1997 ; Mazure et Riveline, 1998 ; Gély 1998 ; Boucheret *et al.*, 1998) ou à celle du bassin dans son entier (Gély, 1996 ; Robin *et al.*, 1998).

2 : Sites d'exploitation

Les anciens sites d'exploitation sont trop nombreux pour être cités individuellement, chaque commune de la zone étudiée (Fig. 35) compte plusieurs carrières et les noms de Pierre à bâtir sont tout aussi nombreux. Ce grand nombre de sites d'extraction et d'appellations commerciales est lié à plusieurs facteurs :

- Dans ces régions, les calcaires du Lutétien constituent souvent le seul matériel réellement exploitable pour la construction ; il est donc naturel que chaque commune tente d'extraire les matériaux dont elle dispose.

Ainsi se justifie l'exploitation artisanale de petites carrières souterraines dont n'était extrait qu'un seul banc de 60 centimètres d'épaisseur : à Fismes, carrière de la Vilette, les carriers travaillaient allongés (Dolfini, 1920) ;

- De plus, les différents niveaux du Lutétien ont été exploités dans des objectifs différents, une même commune peut ainsi compter des carrières de sable glauconieux et de calcaire (Tourtebatte, 1995 ; Blanc, 1998). Ou encore il peut exister des carrières différentes pour exploiter des variétés de calcaires, aux couleurs et aux aptitudes d'emploi distinctes, comme dans la commune de Vandeuil (Zone régionale 1, Fig. 36) ;

- Enfin, les faciès du Calcaire grossier présentent une forte variation latérale, en quelques dizaines de kilomètres. L'épaisseur, la disposition et le nombre de bancs exploitables peuvent évoluer et chaque exploitant les nomme de façon différente. Cette forte hétérogénéité latérale, liée à la nature du milieu de dépôt (notamment au paléo-relief, Gély, 1996) implique une modification du microfaciès sédimento-diagénétique et donc des propriétés géotechniques. Certains bancs issus du même niveau stratigraphique, mais provenant de carrières éloignées de quelques kilomètres seulement auront des caractéristiques pétrophysiques différentes et prendront logiquement des appellations marchandes distinctes. Par contre, l'utilisation de noms différents pour deux Pierres issues du même niveau et ayant les mêmes caractéristiques, mais exploitées dans deux communes voisines trouve son explication d'un point de vue commercial (ou esthétique).

Remarque : cette multiplication des appellations se retrouve aussi au niveau des noms des bancs, avec une évolution complexe de la terminologie suivant les époques, les localités et les méthodes d'extraction (cas du Lutétien des carrières souterraines de Paris : Viré, 1994 et 1997, Blanc et Gély, 1998).

Nous pourrons faire référence, non pas à des communes ou des appellations commerciales, mais à des zones d'affleurements représentées ci-contre (Fig. 36) :

- 1/ Vallée de l'Ardre et de la Vesle : le bassin carrier de Fismes d'où provient un calcaire de couleur gris crème : Pierre de Courville, de Magneux, de Romain… Cette zone comprend d'ailleurs la seule carrière de pierre de taille de la Marne (à Courville).

- 2/ Massif de St-Thierry : sur le bord Est de la Cuesta de l'Ile-de-France, avec très nombreuses carrières situées sur les communes d'Hermonville, le hameau de Marzilly, Cormicy…

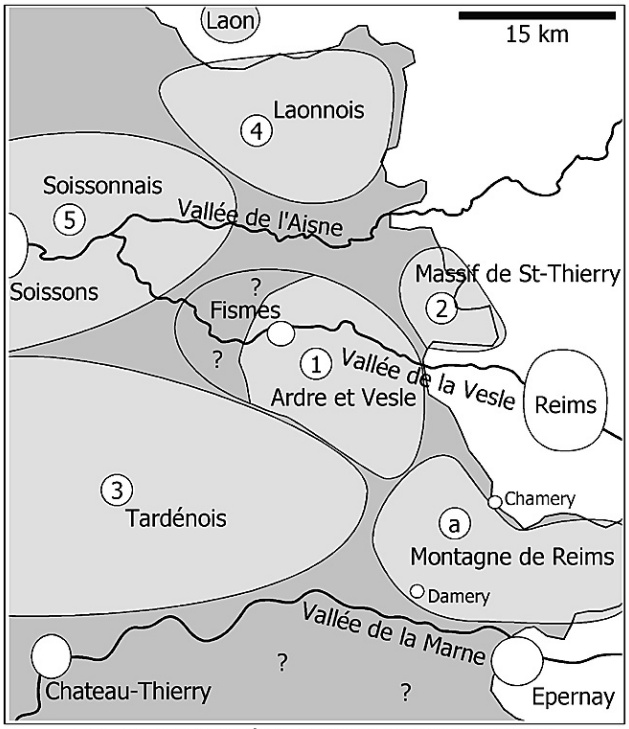


Fig. 36 : Zones régionales du Calcaire grossier

-3/ Tardenois : les environs de Fère-en-Tardenois et les plateaux environnants comptent en effet plusieurs carrières de Lutétien, utilisée pour la construction (Château de Fère-en-Tardenois, Gély, 1994), mais nous n'avons pas exploré plus en avant cette zone.

- 4/ Laonnois, Nord de la Vallée de l'Aisne : de part et d'autre du Chemin-des-Dames et même au sommet du plateau (Caverne des Dragons) se trouvent de très nombreuses carrières de Calcaire grossier. Ces carrières du Laonnois comptent aussi les sites des communes de Colligis, Monthenault, Bièvres, Aisy-Jouy…

- 5/ Soissonnais : autre grand bassin carrier, comprenant encore des carrières en exploitation, nous rassemblerons les sites des environs de Soissons et particulièrement du Sud : Pierre de Noyant, sauf si les propriétés pétrophysiques des calcaires diffèrent trop largement (cas de la Pierre de St-Pierre-l'Aigle).

- a/ Montagne de Reims : ces sables calcaires dont le contenu paléontologique est célèbre (fossiles de Damery) sont peu à pas consolidés, ils ne se prêtent donc pas à une utilisation en œuvre, même s'ils sont ponctuellement contenus dans des constructions : Eglise de Bezannes près de Reims (Restauration Entreprise Noël).

Historiquement, le Calcaire grossier est exploité pour la pierre de taille depuis l'antiquité. Blondeau, 1970 cite le temple Gaulois de Thiverny dans l'Oise (du V^{ème} siècle avant J.-C.). Des textes de Pline-l'Ancien indiquent l'existence du Liais de Senlis. St-Leu d'Esserent fournissait des sarcophages à la Gaule Romaine (Bedon, 1984) : les différents niveaux du Lutétien furent utilisés à Reims pour de nombreux monument gallo-romains (Porte de Mars), ainsi que pour des dalles funéraires sculptées (Fronteau et Paicheler, 1999). Au Moyen-Age, l'exploitation s'intensifiant, l'extraction à flancs de pente et en carrières à ciel ouvert s'est renforcée de carrières souterraines, comme à Laon (Blanc, 1998). Mais la période d'exploitation intensive fut le Second Empire avec les travaux lancés à Paris par le Baron Haussmann.

Dans toute la zone étudiée, de nombreux sites d'extraction furent fermés lors de la Première Guerre mondiale en 1914 et ne rouvrirent plus. Ces nombreuses fermetures de carrières posèrent des problèmes lors de la reconstruction d'après-guerre, notamment à Reims, ville quasiment rasée dont la cathédrale était ravagée (Dolfini, 1920). Pourtant, par rapport à d'autres roches, l'exploitation se maintient, par exemple en 1970, Blondeau cite plus de trente carrières en activité. A l'heure actuelle, les carrières exploitées sont en nombre de plus en plus limité : Courville, St-Pierre-l'Aigle (près de Soissons), St-Maximin, St-Leu et St-Vaast-les-Mello…, ce qui pose de réelles difficultés pour la fourniture du matériel de restauration.

3 : Répartition générale des microfaciès

Les différents niveaux du Calcaire grossier présentent de nombreux faciès avec une nette variation latérale suivant les régions (Fig. 36). Mais aussi avec une évolution verticale (Fig. 37) puisque les dépôts du Lutétien enregistrent une séquence décamétrique de sédimentation, avec du bas vers le haut :

- A la base, une surface ravinante érode les Sables de Cuise d'âge Yprésien ; les premiers sédiments sont sableux, riches en glauconite (Glauconie grossière) et en galets ferrugineux.

- Installation progressive d'un milieu carbonaté et colonisation de l'environnement par les *Nummulites*.

- Agradation des bancs calcaires plus ou moins gréseux contenant des *Ditrupa* et des lamellibranches.

- Quelques bancs de calcaires micritiques fins à Milioles qui marquent le maximum marin de la série avec un niveau repère à *Cerithium giganteum*. Puis des niveaux à chailles et à traces de plantes, qui montrent un retour à des conditions de sédimentation plus restreintes et une tendance à l'émersion.

- A la partie supérieure d'âge Lutétien supérieur, une succession de calcaires micritiques et de marnes dont la faune indique un milieu de dépôt lacustre (fin de la séquence régressive).

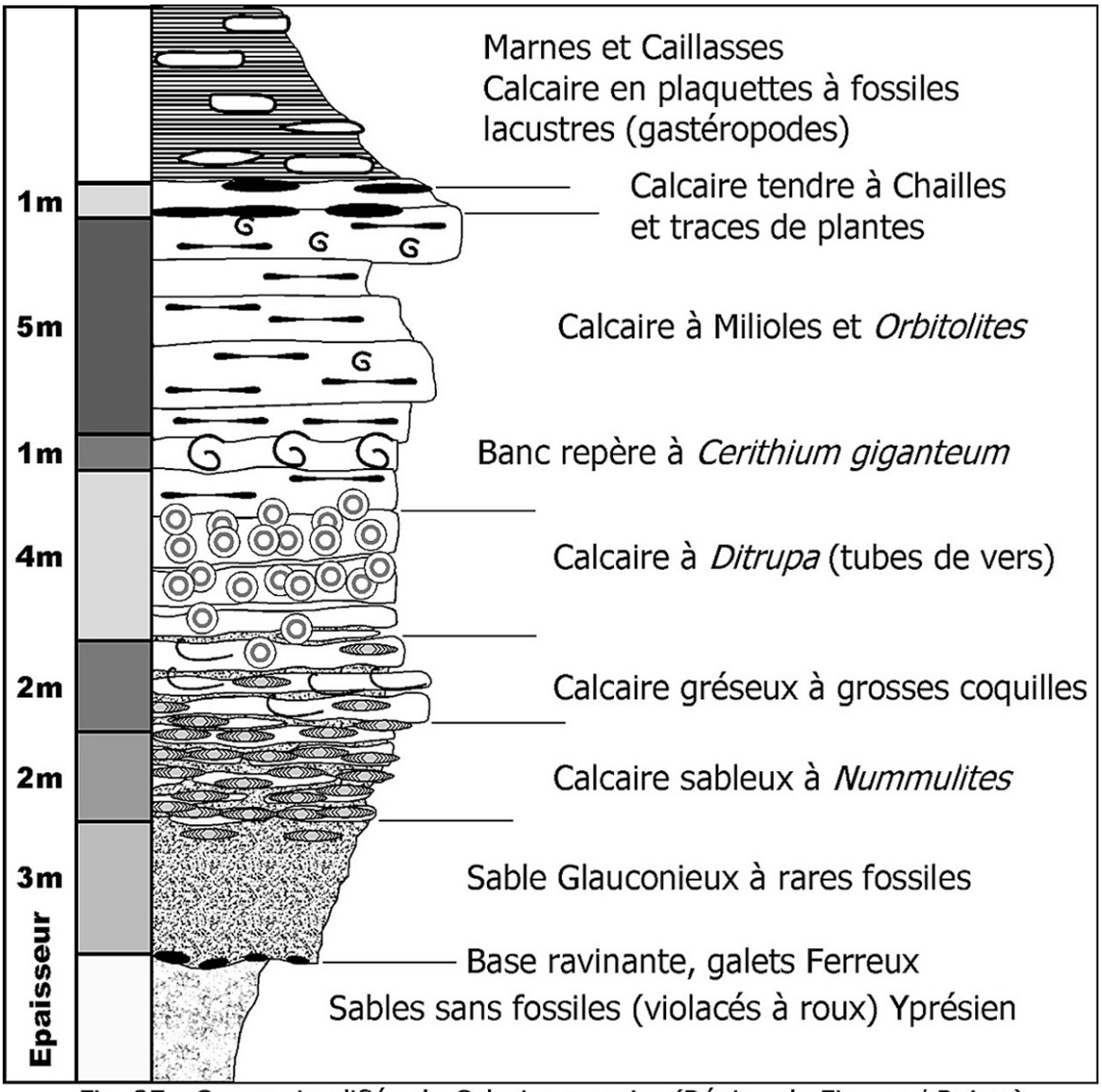


Fig. 37 : Coupe simplifiée du Calcaire grossier (Région de Fismes / Reims)
Unités lithologiques, Epaisseurs moyennes et fossiles caractéristiques

Ces unités lithologiques se retrouvent dans toutes les zones régionales mises en évidence (Fig. 36), sauf dans les faciès continentaux ou littoraux de la Montagne de Reims et de Damery (zone régionale a/). Leur succession et la modification de leur contenu paléontologique (Fig. 37) montrent que les différents niveaux de la série lutétienne contiennent des fossiles caractéristiques, ceux-ci auront donc une valeur stratigraphique locale (voire régionale, Gély, 1996) et permettront l'attribution à un niveau lithologique précis des échantillons recueillis en œuvre.

Le niveau repère dont le caractère stratigraphique est le plus reconnu (Blondeau, 1965 ; Laurain, 1976 ; Gély, 1996) est le banc à *Cerithium giganteum*. De plus, dans la région étudiée *Nummulites laevigatus*, *Ditrupa strangulata* et *Orbitolites complanatus* peuvent être considérés comme des fossiles marqueurs.

Par contre, remarquons que si les différentes unités lithologiques peuvent toutes être reconnues (sauf les sables glauconieux à deux Nummulites et *Eupsammia trochiformis* qui sont absents dans la région rémoise) ; leurs épaisseurs sont nettement plus importantes vers le centre du Bassin de Paris que dans les zones de Fismes, de Laon ou du Massif de St-Thierry (Fig. 38).

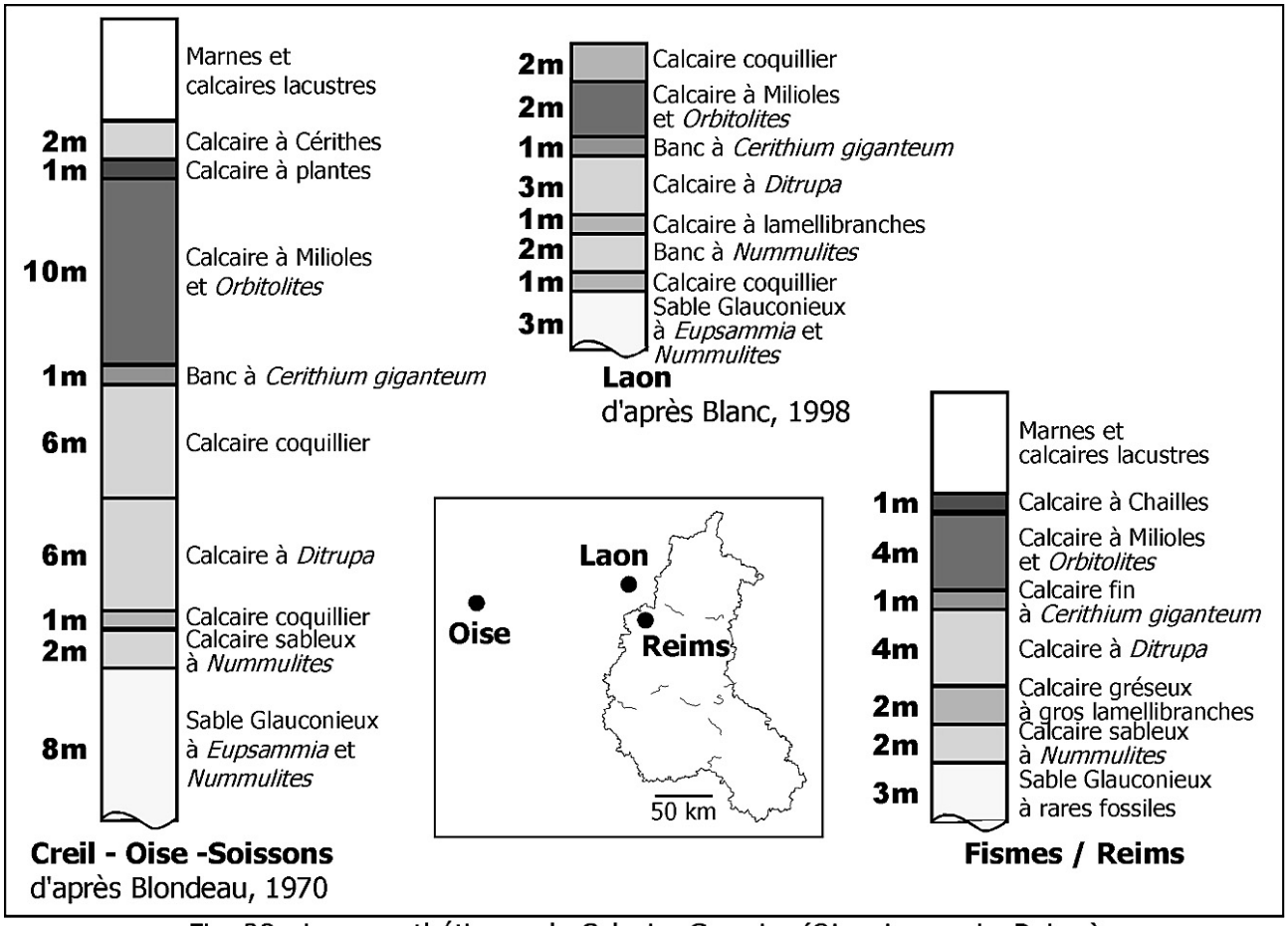


Fig. 38 : Logs synthétiques du Calcaire Grossier (Oise, Laonnois, Reims)
Unités lithologiques, Epaisseurs moyennes et fossiles particuliers

b/ Caractérisation lithologique du Calcaire grossier

Ainsi, une analyse rapide de la formation du Calcaire grossier montre principalement sa grande variabilité verticale et latérale. Nous considérerons donc que ces niveaux contiennent non pas un, mais plusieurs types de pierres à bâtir dont les natures sédimentologiques et pétrophysiques seront différentes. Dans un premier temps, nous utiliserons les différenciations effectuées par les carriers afin de classer globalement cet ensemble hétérogène (Dolfini, 1920 ; Noël, 1970 ; Blondeau, 1970 ; Mausolée, 1976). Puis nous établirons des parallèles ou des différenciations entre ces roches (en les analysant au microscope optique) et regrouperons ainsi les différentes variétés du Calcaire grossier selon leur microfaciès.

1 : Nature

Les variétés de pierres de taille issues du Calcaire grossier peuvent être différenciées selon divers critères :

- La couleur : les différents niveaux du Lutétien (variation verticale) ou les différents types régionaux peuvent présenter de nettes variations chromatiques. Par exemple : la Pierre de Vandeuil est identique à la Pierre de Courville et elles forment, dans la région de Fismes (zone régionale 1 de la figure 36) un ensemble de pierres grises à blanchâtres (Anonyme, 1990). Or, Dolfini, 1920, cite la Pierre grise à Vandeuil, mais il mentionne aussi une « Pierre rousse » à Vandeuil – Irval. De plus, dans d'autres bancs, le faciès peut présenter des teintes allant du gris-vert (lié à la présence de glauconie ?) au brun-orangé (lié à la présence d'oxydes de fer ?).

- La résistance et la tenue de la roche avec globalement :

- les bancs les plus tendres sont inaptes à une quelconque utilisation en œuvre, ils étaient extraits du front de taille à l'aiguille ou à la lance (Noël, 1970, Tourtebatte, 1995) afin de permettre l'extraction des bancs utiles (cas du banc de Four à Courville) ;

- les bancs un peu plus résistants (mais encore de mauvaise qualité) étaient débités afin de combler l'espace vide crée par l'extraction : « piliers à bras » de la méthode dite « de la hague et du bourrage », ou pour être utilisé comme pierre de bas de gamme et en usage local ;

- les bancs les plus résistants, dits bancs nobles, exploités à but commercial ou pour des monuments particulier comme le réputé « Banc Royal ».

- La texture macroscopique : pour les pierres de taille, cette notion est légèrement ambiguë (à la différence de la texture microscopique sensu Dunham, 1962), elle comprend l'aspect global de la roche : homogénéité, rugosité, présence de fils… mais prend en compte d'autres paramètres comme la taille moyenne des grains, la présence d'une pâte fine ou de trous (correspondant respectivement à la taille des éléments figurés, à la matrice micritique cryptocristalline et à la macroporosité).

- Les propriétés pétrophysiques : la porosité , la résistance à l'écrasement, la vitesse de ondes acoustiques… varient très fortement selon les différents faciès.

Ainsi, selon les termes carriers, le Liais de Courville est un « calcaire à grains fins qui présente des trous, petits et nombreux sur un fond blanc- crème uni, parfois veiné de bleu grisâtre » (Tourtebatte, 1995). Les principaux éléments de ce calcaire biomicritique packstone sont des foraminifères (Milioles et *Orbitolites complanatus*) et des mollusques (lamellibranches et gastéropodes). Il contient aussi de nombreux petits grains de quartz et de glauconie. Les Pierres du Laonnois du Soissonnais et de l'Oise sont généralement plus granulaires comme la Pierre de St-Leu ou la Pierre de Noyant-Septmonts. Ces roches sont décrites comme étant des « calcaires tendres à Milioles, à grain rond et moyen comportant des trous petits à moyens, peu nombreux de ton crème uni » (Pierre de Noyant, Noël, 1970).

Selon les bancs et les régions, les éléments peuvent être de natures très diverses :

- coquilles de gastéropodes, sous forme d'empreintes et de moules externes : Pierre de St-Maximin et de St-Pierre-l'Aigle (zone 5 et région parisienne), parfois remplies de silice secondaire : Roche de Courville.

- foraminifères, comme les Nummulites de la « Pierre à Liards » où le calcaire ne se sera formé que par leur accumulation : environs de Noyon et quelques variétés laonnoises (zone 4). Mais il existe aussi des bancs dits de « miliolites », dus à l'accumulation de ces petits foraminifères (Pierre de Colligis, zone 4 sur les plateaux au nord de la vallée de l'Aisne) ;

- tubes de vers : les premiers bancs de calcaires ou de calcaires gréseux du Lutétien moyen contiennent de nombreux tubes de *Ditrupa strangulata*, parfois orientés verticalement (position de vie). Ces organismes peuvent être en proportion très importante (plusieurs centaines pas m^2) et être le principal type d'éléments figuré (le second étant les grains de quartz) : voir Hermonville et Cormicy (zone régionale 2) ;

- coquilles de lamellibranches conservées ou moules externes qui se rencontrent parfois au sommet des bancs ou dans les bancs très coquilliers du Lutétien moyen ;

- gros grains de quartz ou de glauconie (plus d'un millimètre), notamment dans les Calcaires à *Ditrupa*.

Enfin, notons l'existence de silicifications, parfois disséminées ou directement liées aux bancs de chailles qui surmontent les calcaires à *Orbitolites*. Ces silicifications secondaires (calcédonite) affectent particulièrement les tubes de Ditupa (couche externe), les coquilles de mollusques et les tests des foraminifères, mais elles peuvent s'être formées dans la porosité matricielle du calcaire, augmentant alors la dureté de la roche.

2 : Caractéristiques chimiques

Malgré la présence de glauconie et de silice (grains de quartz détritiques et calcédonite des silicifications), les calcaires du Lutétien moyen sont relativement purs : la Pierre de Courville contient plus de 90% de $CaCO_3$ (Tab. 11, Boucheret *et al.*, 1998).

Pourtant, les éléments détritiques peuvent être beaucoup plus nombreux, comme dans le Calcaire à *Ditrupa strangulata* (ancienne zone biostratigraphique III, Abrard, 1925) où le pourcentage de $CaCO_3$ est 75% (Tab. 12).

Echantillon	CaCO3 (%)	% insolubles	ρs (g/cm^3)
Liais	91,2	8,5	2,688
Bousin (Four)	84,4	15,6	/
Roche	92,8	7,2	2,701

Tab. 11 : Pierre de Courville

(Calcimétrie, d'après Boucheret *et al.,* 1998)

	Zone I (à 2 Nummulites)	Zone II (*N laevigatus*)	Zone III (*E. calvimontanum*)	Zone IV (*O. complanatus*)
Colligis	29	40,9	73,9	64,1 et 82,5
Oeuilly	/	61,4 à 69,7	71,9	82,2
Cuissy	62,3	78,2	75,8	58,9
Hermonville	25,2 et 36,9	73,7	82,6 et 84,6	76,2 et 78,1
Ventelay	/	/	/	82,1

Tab. 12 : Pourcentage de $CaCO_3$ (calcimétrie) des différentes zones « biostratigraphiques» du Lutétien Affleurements de la Feuille 1/50 000ème de Craonne (Aisne), d'après Daubenfeld, 1967

Si on considère l'ensemble du Lutétien (Tab. 12), on remarque que l'augmentation du taux de carbonate est progressive avec dans le cas le plus net (coupe de Colligis, Aisne, région 4 de la Figure 36) une augmentation continue depuis les sables calcaires à Nummulites : 29% puis 40,9% (zones I et II, Abrard, 1925) aux Calcaires à *Ditrupa* 73,9% (zone III, Abrard, 1925) et enfin aux calcaires à Milioles avec 82,5% de $CaCO_3$.

On peut aussi remarquer que dans le cas d'Hermonville (Marne, région 2), la zone biostratigraphique 3 à *Echinolampas calvimontanum* présente un taux en carbonates égal à supérieur à celui mesuré pour les Calcaires à Milioles et *Orbitolites*. En effet, dans les différentes carrières entre Hermonville et Cormicy, les bancs à Ditrupa sont très calcaires et relativement bien consolidés ; seule leur épaisseur réduite (20 centimètres) nuit à leur utilisation comme pierre de taille.

Concernant la masse volumique (Tab. 11) : la Pierre de Courville possède une densité réelle légèrement inférieure à 2,71 (masse volumique de la calcite), ce qui confirme la présence d'une fraction siliceuse (masse volumique de 2,65 g/cm^3). Par contre, nous n'avons pas trouvé de données précises quantifiant la glauconie.

3 : Caractéristiques physiques et porosité

Les propriétés pétrophysiques des différentes pierres à bâtir du Calcaire grossier sont aussi variées que les faciès (Fig. 39a/ et Tab. 13). Elles ont une résistance moyenne à l'écrasement d'environ 150 kg/cm^2 (Banc franc de St-Leu-d'Esserent ou de Noyant par exemple). Mais dans le détail, ces indices peuvent aller de 70 kg/cm^2 (Banc Royal de Billy-sur-Aisne) à environ 800 kg/cm^2 (Roche de Courville, Liais très dur de St-Maximin).

Un examen plus approfondi de la répartition de cette diversité permet de constater une forte corrélation entre les facteurs de densité, résistance à l'écrasement, porosité ou vitesse des ondes acoustiques (Fig. 39a/ et 39b/) permettant de différencier 2 ou 3 familles (selon que l'on différencie a, b et c ou a et b + c) :

- a/ des roches solides et compactes : résistantes à plus de 200 kg/cm² et dont la porosité est inférieure à 35%, elle sont généralement appelées par les exploitants banc de Roche, Roche Dure ou ½ Dure ;

- b/ des calcaires intermédiaires : résistance de 150 à 175 kg/cm² et porosité comprise entre 35 et 40%. Ces pierres sont très courantes dans les constructions non monumentales et comprennent divers types de bancs : Ferme ou Franc par exemple ;

- c/ des calcaires très poreux (porosité supérieure à 40%) avec de nombreuses appellations du Banc « Royal » comme celui de St-Leu ou de Noyant-Septmonts.

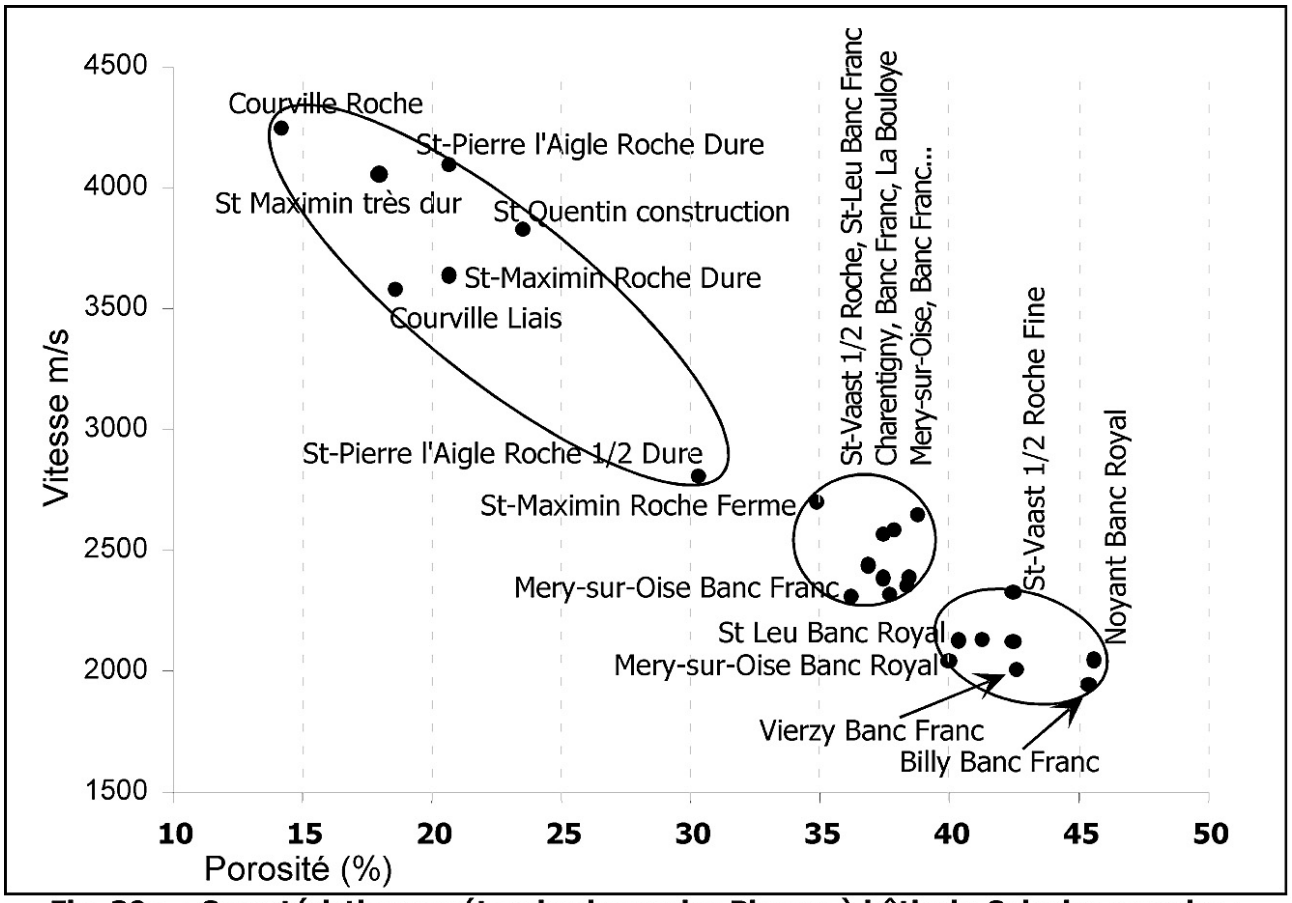


Fig. 39a : Caractéristiques pétrophysiques des Pierres à bâtir du Calcaire grossier : Porosité/Vitesse ondes acoustiques, d'après Blondeau, 1970

		Porosité %	Densité apparente	Vitesse (m/s)	Résistance (kg/cm²)
Liais Courville	Microporeux	22,1 ± 0.8	2,049 à 2,153	3077 à 3529	800
Roche Courville	Microporeux	12,6 ± 1,1	2,247 à 2,402	3733 à 4394	511
Vassens	Macroporeux	39,5	1,6	2519 à 2678	100
Mery-sur-Oise	Macroporeux	41.4	1,5	2301 à 2386	60

Tab. 13 : Caractéristiques pétrophysiques de 4 Pierres du calcaire grossier d'après Blondeau, 1970, Bousquié, 1979 et Boucheret *et al.*, 1998 (Moyennes)

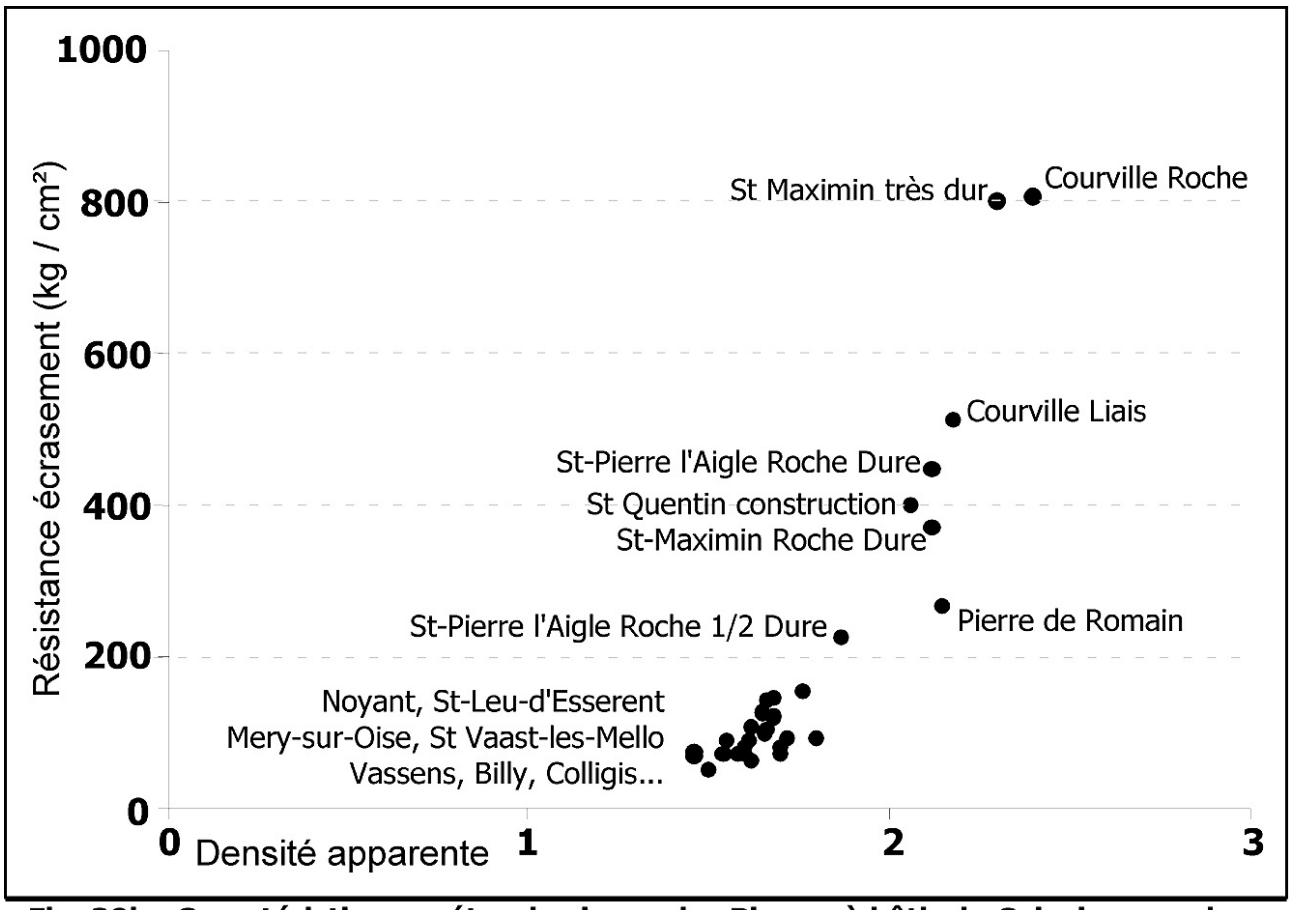


Fig. 39b : Caractéristiques pétrophysiques des Pierres à bâtir du Calcaire grossier : Densité apparente/Résistance écrasement, d'après Blondeau 1970

		Porosité totale %	SR %	Kh	A (g / $cm^2H^{1/2}$)	B (cm / $H^{1/2}$)
Liais	Vertical	22,1 ± 0.8	85 ± 9	0,10 ± 0,036	0,207 ± 0,038	1,105 ± 0,0161
Liais	Horizontal	21,8 ± 1,2	83 ± 3	0,149 ± 0,048	0,253 ± 0,048	1,388 ± 0,161
Roche	Verticale	12,6 ± 1,1	/	0,024 ± 0,007	0, 076 ± 0,013	0,484 ± 0,129
Roche	Horizontale	13,7 ± 2,1	/	0,024 ± 0,007	0,08 ± 0,023	0,521 ± 0,156
Vassens	Direction a	39,5	75	/	2,71	12,2
Vassens	Direction b	39,5	75	/	3,37	14
Mery	?	41.4	81	/	1,45	5,4

Tab. 14 : Prise en eau par capillarité d'après Bousquié, 1979 et Boucheret *et al.,* 1998 (Moyennes)
A = volume d'eau absorbée par cm2 et par unité de temps, B = hauteur atteinte au cours du temps

Pour illustrer cette diversité de faciès, comparons (Tab. 13 et 14), les deux appellations de Pierre de Courville (analyses réalisées à notre laboratoire) avec la Pierre de Vassens de l'Aisne (région 5 au Nord-ouest de Soissons)et la Pierre de Méry-sur-Oise (analyses de Bousquié, 1979). La Pierre de Courville montre une macroporosité très faible et, selon le banc considéré, une porosité totale de 15 à 20% : elle figure dans les roches de type a/ à forte résistance à l'écrasement, porosité totale inférieure à 35% et vitesses d'ondes supérieures à 2750 m/s. Par contre, les Pierres de Vassens et Méry-sur-Oise sont principalement macroporeuses avec une porosité

totale proche de 40%. Ces variétés macroporeuses présentent en plus des indices de capillarité de 5 à 10 fois supérieurs à ceux de la Pierre de Courville (selon que l'on compare le Liais ou la Roche).

Ces grandes différences pétrophysiques sont le reflet de nettes différences de faciès et de réseau poreux, les 2 types de Pierres de Courville ont une matrice micritique importante et les rares macropores se trouvent limités à l'intérieur de quelques bioclastes (Milioles par exemple). Alors que pour les faciès de Méry-sur-Oise et de Vassens, cette micrite intergranulaire est quasiment absente, les éléments n'étant que faiblement liés les uns aux autres par une microsparite et quelques ciments sparitiques (comme les ciments syntaxiaux liés à la présence d'échinodermes).

Cette grande variabilité des propriétés pétrophysiques implique donc que l'analyse du comportement en œuvre d'une Pierre à bâtir du Calcaire grossier (Lutétien moyen) doit comporter une analyse pétrophysique (en particulier la mesure de la porosité totale). Mais dans le cadre de cette étude, nous ne pouvions procéder à tous les échantillonnages et à toutes les mesures ; nous ne pouvons donc pas préciser la nature exacte des différents microfaciès analysés. En effet, les valeurs indiquées dans les précédents graphiques ou tableaux proviennent, pour la plupart, des inventaires de référence des Pierres calcaires comme celui de Noël (1970). Seules les mesures issues de Boucheret *et al*, (1998) ont été réalisées avec notre collaboration. C'est pourquoi, nous ne pourrons pas utiliser véritablement ces différences pétrophysiques pour analyser les variations de comportements en œuvre du Calcaire grossier.

Pourtant, ces mesures, rapportées à la macroporosité intergranulaire, à la proportion Eléments / Phase de liaison sont les clefs qui permettraient de rapprocher objectivement les variétés de Calcaire grossier des comportements d'altérations démontrés dans le chapitre 2. Dans ce travail, nous mettrons donc en évidence les différents comportements télogénétiques et les différences de microfaciès, laissant momentanément en suspens la mise en relation des modes d'altération avec les caractéristiques pétrophysiques. En effet, dans l'idéal, seule une étude complète des différentes pierres du Lutétien moyen avec caractérisation pétrophysique, analyse du microfaciès et caractérisation par analyse d'images serait souhaitable pour en relation les échantillons altérés et les échantillons sains.

4 : Aptitudes d'emploi

Les diverses variétés de Calcaire grossier auront des aptitudes d'emploi aussi variées que leurs microfaciès ou leurs caractéristiques pétrophysiques. On distingue ainsi des roches se prêtant uniquement à une utilisation en élévation (Liais de Courville ou Pierre de St-Leu-d'Esserent), ou permettant la réalisation de corniches, balcons et gargouilles (Pierre de St-Maximin), ou encore utilisé en soubassements (Calcaire à Nummulites, Calcaire à Ditrupa bien consolidé).

Curieusement, malgré une macroporosité très limitée et des indices de capillarité faibles, la Pierre de Courville présente une porosité à fort taux de saturation en eau : entre 78 et 90% soit un coefficient moyen de saturation estimé à 0,75 pour la Roche et 0,85 pour le Liais. Le Liais de Courville se trouvera donc dans la zone 3 des aptitudes d'emploi (voir a, Fig. 40), alors que la Roche de Courville présentera des possibilités plus importantes. Sa faculté à prendre un adouci (poli ?) lui permet même d'être une pierre valorisée en dallages intérieurs et en marches d'escaliers (cf Carrières et Scieries de l'Ardre).

A l'opposé, les faciès à forte macroporosité intergranulaire auront des coefficients de saturation plus faibles : entre 0,65 et 0,8 pour le groupe des bancs Francs, Fermes et Royaux du type St-Leu, Vassens, Méry-sur-Oise ou St-Vaast-les-Mello. Mais, comme ces roches ont des porosités totales beaucoup plus élevées que celles de Courville, elles se retrouvent toutes en zone 4 d'utilisation, leur usage conseillé étant limité à l'élévation de murs (voir d, Fig. 40).

Enfin, les roches issues de St-Pierre-l'Aigle et de St-Maximin sont dans la zone d'aptitudes 2 (voir c et b, Fig. 40), car elles présentent en effet des coefficients de saturation inférieurs à 0,7 pour le St-Maximin et à 0,5 pour le St-Pierre-l'Aigle. Leurs aptitudes d'emploi sont alors beaucoup plus importantes et elles sont même parfois utilisées pour la restauration de corniches et gargouilles (cathédrale de Reims) alors que normalement cette utilisation est réservée aux roches de la zone d'aptitudes 1.

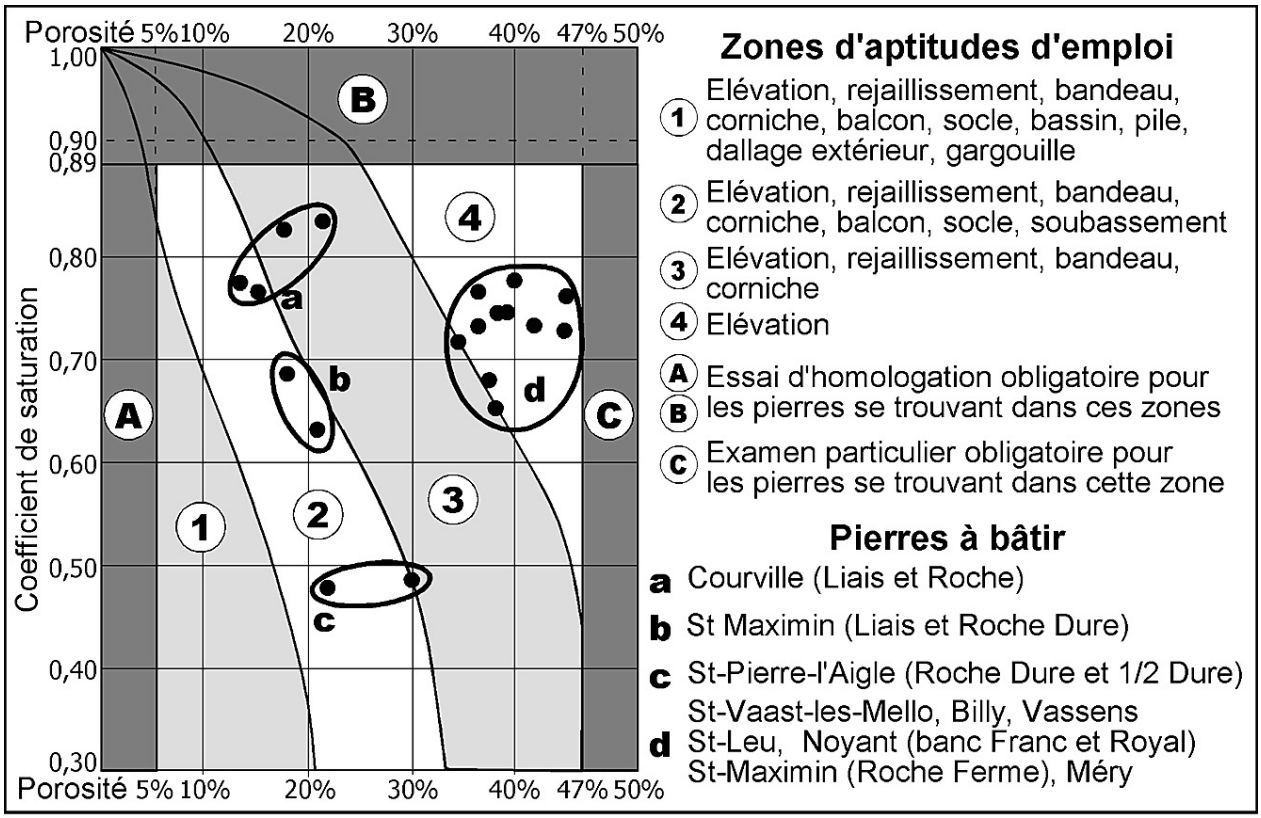


Fig. 40 : Aptitudes d'emploi des différentes pierres de taille extraites du Calcaire grossier (Lutétien Moyen), d'après Blondeau, 1970, Bousquié, 1979 et Boucheret *et al.*, 1998

c/ Description d'un affleurement type :

La carrière St Julien (Courville)

Généralités

La série lutétienne peut être observée en plusieurs sites, mais nous nous intéresserons principalement à la seule carrière de pierre de taille exploitée dans la Marne (et en Champagne-Ardenne ?) : la Carrière St-Julien à Courville. Pourtant la commune offre d'autres sites intéressants comme la Carrière Vauthier, toute proche de celle de St-Julien et d'autres carrières abandonnées de part et d'autre de la vallée de l'Ardre (Tourtebatte, 1995) :

- Le fond de Chenay, au sud du village, est une sablière où affleure la Glauconie Grossière, base transgressive diachrone du Lutétien avec des sables plus ou moins fossilifères : nombreuses *Turitella* et *Cardita planicosta* plus ou moins bien conservées (Laurain et Barta, 1973).

- la carrière Vauthier, entièrement exploitée selon la méthode de « hagues et bourrages », permet d'observer la formation des Marnes et Caillasses (Lutétien supérieur) avec une alternance de bancs de calcaires lacustres micritiques et de marnes beiges ou vertes (Laurain et Barta, 1973). A l'intérieur de la carrière, l'ancien puits d'extraction, profond d'une vingtaine de mètres, permet de voir l'épaisseur réelle de cette formation ; la succession des bancs et inter-bancs fut d'ailleurs relevée par Mr Tourtebatte de Courville (Tourtebatte, 1995). La série calcaire exploitée paraît être identique à celle de la carrière St-Julien, toute proche.

Le contenu paléontologique des divers bancs de la carrière St-Julien est très varié et comprend principalement diverses espèces de foraminifères : principalement des Milioles (Quinqueloculines et quelques Triloculines), des *Rotalidae*, des Alvéolines, mais surtout de nombreux *Orbitolites complanatus* (parfois près d'une dizaine d'individus entiers par lame mince). On peut aussi remarquer la présence de débris de lamellibranches et de gastéropodes, parfois silicifiés et en microfaciès de très nombreux débris d'algues calcaires (Dasycladales).

Description générale

Cette carrière est encore exploitée, la méthode d'extraction traditionnelle ayant été remplacée en 1975 par l'utilisation d'une haveuse. Deux types de pierres à bâtir sont différenciés : le Liais et la Roche, ces deux calcaires relativement durs pour le Calcaire grossier sont comparables aux pierres auparavant extraites de Vandeuil, Magneux et Romain (voir localisation de ces communes, Fig. 35), même si dans ces différentes carrières, les pierres étaient plus blanches et les bancs moins épais (Dolfini, 1920).

Actuellement, l'exploitation du Liais se fait essentiellement pour la restauration de monuments historiques et pour le parement de bâtiments de « prestige », alors que le banc de Roche est plutôt utilisé comme dallage ou marches d'escalier intérieur. Ces deux Pierres ont une distribution internationale et sont toujours commercialisée soutre atlantique. Le volume estimé de calcaire utile extrait est d'environ 500 m^3 / an.

Description de la série : log voir figure 41

Unité 1 : Les deux pierres extraites, le banc de Liais et le banc de Roche sont constitués par le Calcaire à Milioles et *Orbitolites complanatus* du sommet du Lutétien moyen. Le banc de Liais (ou ½ Roche) se trouve à la base de la coupe (le banc ou niveau de marche étant la base du banc), la Roche se trouve au sommet de la zone exploitée (le toit de la carrière étant plus ou moins au sommet de ce banc, Fig. 41).

Les différents bancs diffèrent peu par leur contenu (sauf le niveau à chailles), par contre leur dureté et leur consistance sont très dissemblable et permettent de repérer la différenciation opérée par les carriers.

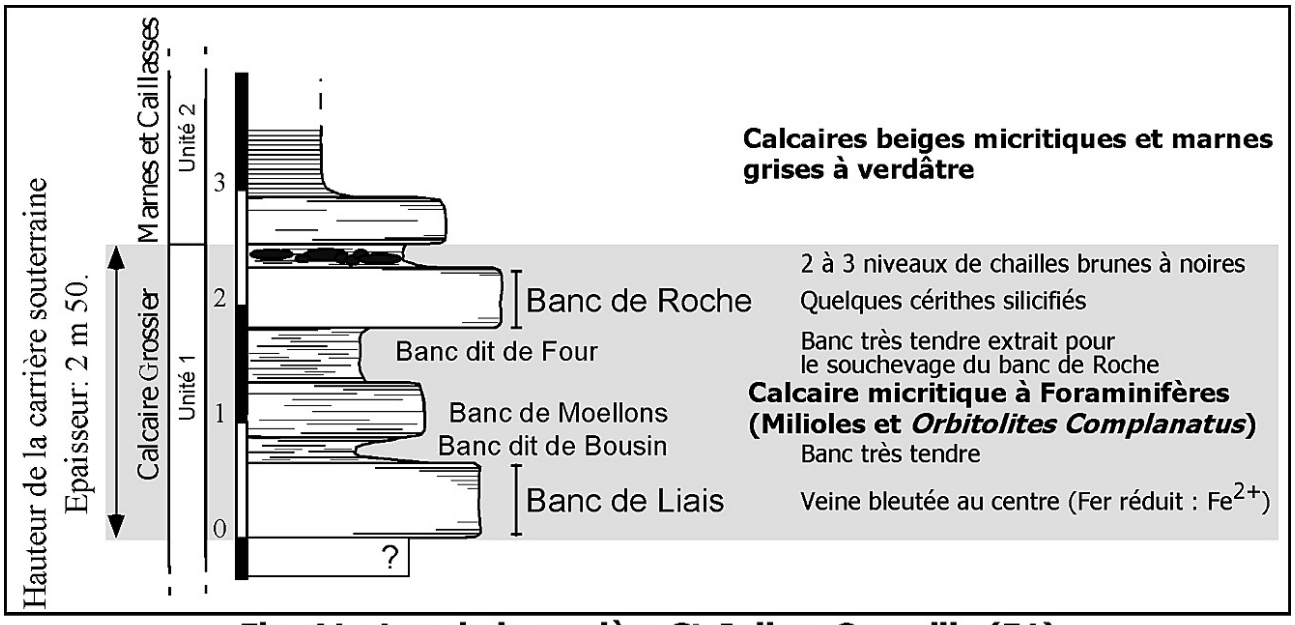


Fig. 41 : Log de la carrière St-Julien, Courville (51)
Pierre de Courville, Calcaire grossier, Lutétien moyen, Affleurement 1Co

Ainsi, à la base se trouve le banc de Liais, d'une épaisseur apparente de 70-80 centimètres, son faciès est latéralement homogène malgré la présence par endroit d'une bande bleutée (oxydo-réduction différencielle). Le microfaciès est franchement micritique mais avec une tendance à la recristallisation de la matrice en microsparite. Il contient de très nombreux bioclastes (lamellibranches, gastéropodes, algues calcaires) et divers foraminifères : Milioles, *Rotalidae, Orbitolites complanatus,* les Alvéolines sont présentes mais assez rares ; les débris d'échinodermes sont très peu nombreux et ne présentent pas de véritables ciments syntaxiaux.

De nombreux pores intragranulaires (loges de foraminifères) sont obturés par des cristaux de sparite. De même, les fragments de coquilles de gastéropodes sont dissouts et la porosité moldique est totalement colmatée (a, Fig. 42 et Fig. 44), ce qui indique une phase de recristallisation sparitique postérieure à l'induration du sédiment et à la disparition de l'aragonite. Parfois même, la micrite matricielle est entièrement remplacée par une microsparite bien cristallisée, passant localement à de véritables plages de sparite.

Enfin, le Liais et la Roche contiennent des petits grains de quartz et de glauconite détritique d'une taille moyenne de 100µm ±20.

Observé en coupe fraîche (dans la zone exploitée actuellement), le banc de Liais montre de nombreuses traces de bioturbations, soit diffuses, soit très nettes et globalement verticales. Les bioturbations contiennent un sédiment interne (mudstone à wackestone) nettement plus fin que le reste de la roche (packstone) et qui ne contient quasiment pas d'organismes (a, Fig. 42).

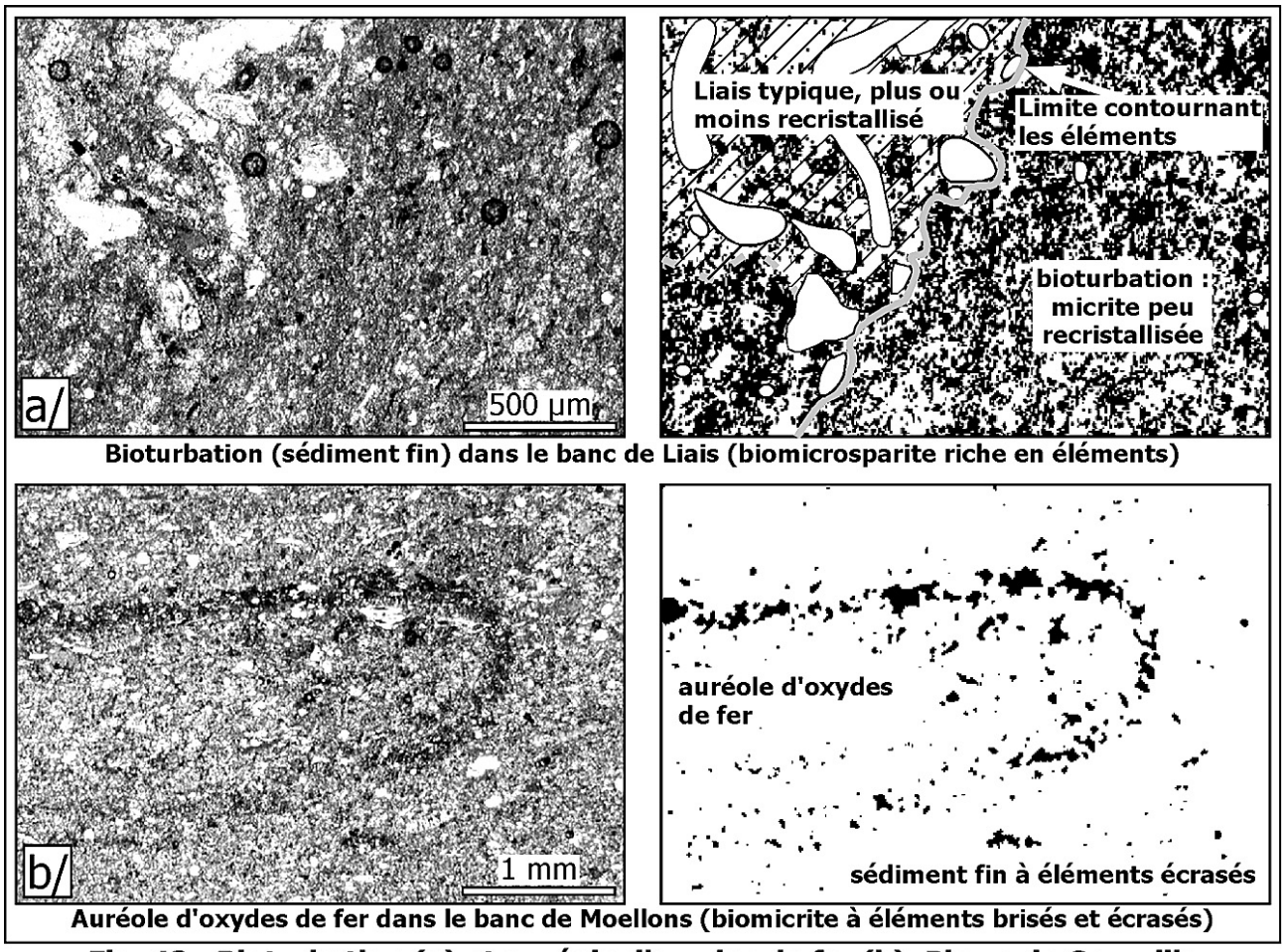


Fig. 42 : Bioturbation (a) et auréole d'oxydes de fer (b), Pierre de Courville
Courville (51), Calcaire Grossier, Lutétien moyen

La périphérie et les contours des bioturbations sont souvent soulignés par des oxydes de fer. Dans les bancs dont le sédiment est plus fin tels le « Bousin », les zones d'accumulations forment des auréoles colorées à structure ellipsoïdale (b, Fig. 42) qui ne peuvent être directement rapportées à la présence de traces de bioturbation du fait de l'homogénéité du sédiment. Comme dans le cas des grès (anneaux de Liesegang, Nion, 1997), nous pouvons supposer que ces auréoles colorées se forment par migration et accumulation des oxydes et hydroxydes de fer, que l'on trouve par ailleurs en zones très localisées dans la matrice et dans les loges des foraminifères. Ces accumulations d'oxydes de fer mettent donc en évidence des circulations de fluides au sein du Calcaire grossier, pouvant être mise en relation avec une nappe phréatique ou être d'une origine plus récente.

La présence de ces auréoles d'oxydes de fer à la périphérie de certaines bioturbations indique que les circulations de fluides qui ont provoqué la migration du fer ont été influencées par le réseau de bioturbation. Donc ces zonations matérialisent (et amplifient ?) la différence de porosité liée à la nature plus fine du sédiment interne des terriers ; elles indiquent que le Liais présentant des traces de bioturbation possède une porosité hétérogène qui modifie la circulation des fluides.

A l'intérieur du Liais se trouve une « veine » bleue, liée à la présence de fer réduit ; l'épaisseur de cette bande varie fortement : elle mesure 10 centimètres de moyenne, mais peut être totalement absente ou mesurer plus de 30 centimètres. Le Liais au niveau de la bande bleutée est globalement plus cristallisé (ou recristallisé) que le Liais de couleur gris-crème, mais il ne présente aucune différence sédimentologique franche.

Remarque : de comportement plus dur et plus résistant que le reste du banc de Liais (d'après le contremaître de l'exploitation), le Liais qui présente cette veine bleue est souvent difficile à commercialiser et oblige les carriers à orienter leur exploitation dans une autre direction.

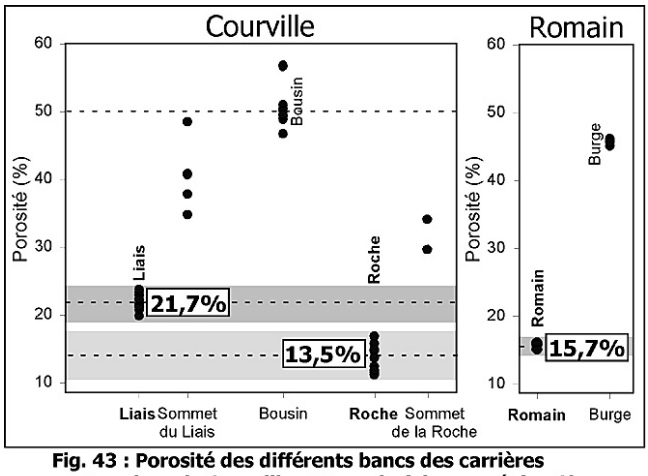


Fig. 43 : Porosité des différents bancs des carrières souterraines de Courville et Romain (Fismes, région 2) d'après Blanc, 1982 et Boucheret *et al.*, 1998.

Surmontant le banc de Liais, se trouve un niveau beaucoup plus tendre, d'environ 10-20 centimètres d'épaisseur, que les carriers appellent « Bousin ». Ce calcaire est très gélif et totalement inapte à une mise en œuvre.

Il présente une porosité très supérieure à celle du Liais : 50% au lieu de 21% (Fig. 43), composée essentiellement de micro et d'infrapores ; et une résistance à l'écrasement quatre fois plus faible.

L'évolution de la porosité aux limites inférieures et supérieures des bancs extraits est progressive (Fig. 43). Cette variation est plus ou moins rapide : en quelques centimètres pour la roche et plus de 10 centimètres pour le passage du Liais au Bousin. C'est pourquoi après l'extraction du banc de Liais (70 à 80 centimètres) celui-ci doit être débarrassé des deux niveaux de Bousin gélifs qui l'entourent, ce qui réduit le banc à une épaisseur utilisable de 50 à 55 centimètres maximum. Cette action que les carriers nomment « ébousiner » se fait soit manuellement, soit naturellement en laissant le bloc geler à l'air libre, le Bousin se desquamant très rapidement (parfois en un seul cycle de gel-dégel). Le contenu des bancs tendres très poreux (Fig. 43) est moins diversifié que celui du banc de Liais : de nombreux grains de quartz (plus de 15% du volume total, Tab. 11) et des foraminifères déformés (Milioles et *Orbitolites complanatus*), écrasés et entassés dans le sens du litage. La phase de liaison est micritique sans traces de recristallisation en microsparite et, tout comme dans le Liais, des oxydes de fer sont accumulés dans certaines zones (auréoles, b, Fig. 42) ou à l'intérieur de loges de foraminifères.

Surmontant le Bousin, se trouve un banc épais d'un cinquantaine de centimètres dit de « Moellons », ce banc biomicritique était débité pour servir de piliers et maintenir le ciel de la carrière en place. Il fut peut-être utilisé localement pour la construction. La recristallisation de la matrice est moins fréquente que dans le Liais, mais elle ne s'observait pas dans le banc de Bousin. Au-dessus du banc de Moellons, se trouve le banc de Four. En effet celui-ci, relativement tendre, était extrait en premier et défourné afin de permettre l'extraction du banc de Roche (qui s'effondrait par gravité : souchevage). Analysé au microscope optique, sa nature se révèle identique à celle du banc dit de Bousin : biomicrite à petits éléments écrasés et nombreux petits grains de quartz (60µm ±20).

Le banc de Roche sus-jacent (40 cm d'épaisseur) est le plus résistant de la série, il s'agit d'une biomicrite de texture packstone riche en foraminifères (dont *Orbitolites complanatus*) et contenant légerement plus de gastéropodes que le Liais. La matrice micritique est très recristallisée et se présente généralement sous la forme de cristaux de microsparite (à sparite) même si les grands cristaux de sparite sont moins développés que dans le banc de Liais. Les macropores intragranulaires ou moldiques semblent être plus nombreux (dissolution de certains bioclastes), même si la porosité totale est plus faible : 13,5% (Fig. 43). Par contre, la silicification est plus importante que dans le Liais, certainement en relation avec la présence des chailles du banc supérieur.

Le dernier banc de cette unité, d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, est constitué d'un calcaire très tendre à rares Milioles. Dans ce banc se situent 2 niveaux de chailles brunes fusionnant parfois en un seul ou se dissociant en trois, la morphologie de ces chailles fait penser qu'il s'agit de la silicification de terriers sans doute indurés. Nous considérons donc que le toit de ce banc est une surface de ralentissement de la sédimentation et une limite de séquence (fin de l'unité 1).

Unité 2 : les premiers bancs de cette unité contiennent encore des indices de milieux marins, comme des Milioles, par contre, les marnes beiges qui les surmontent appartiennent déjà à la formation des Marnes et Caillasses. Cette formation (épaisse de plus de 20 mètres) est constituée d'une alternance marno-calcaire, devenant de plus en plus argileuse vers le haut. Les bancs de calcaires micritiques sont généralement sub-lithographiques et les interbancs contiennent parfois une faune de milieu saumâtre à lacustre : *Potamides*, Limnées, Planorbes, ainsi que des oogones de *Chara* (Laurain, 1976). Certains niveaux calcaires contiennent des Cérithes et indiquent de légères influences marines. Ces bancs, de 10 centimètres d'épaisseur maximum, sont appelés « Cliquart » et ont été utilisés localement pour la construction et la couverture (Tourtebatte, 1995).

Environnements de dépôts et cadre séquentiel

La série du Lutétien montre une très belle séquence de sédimentation avec une limite inférieure ravinante et une très belle unité lithologique transgressive diachrone à Glauconie : la « Glauconie grossière » suivi d'une colonisation du milieu par les organismes avec enrichissement en carbonates « Pierre à Liards » et « Calcaires à Ditrupa ». Ensuite, l'unité des « Calcaires à Milioles et *Orbitolites* » marque le maximum d'inondation de la séquence. Ces calcaires sont nettement marins mais avec une différenciation entre les sédiments micritiques de milieu calme type Courville et les calcaires plus granulaires du centre du bassin de Paris. Enfin, le niveau à chailles et à plantes marque un premier retour à des conditions de sédimentation plus continentales, uivis par la formation des « Marnes et Caillasses » qui contient des calcaires micritiques lacustres avec des gastéropodes d'eau douce et parfois même des faciès de type sebkha (St-Vaast-les-Mello par exemple). Les différentes unités lithologiques contiennent des organismes marqueurs d'environnements ou à valeur biostratigraphique. Ils permettent donc la corrélation à l'échelle du bassin et affine et contraignent le découpage lithologique en une véritable analyse séquentielle (Gély, 1996 ; Robin *et al.*, 1998).

d/ Inventaire et caractérisation des variétés de microfaciès

1 : Généralités

La grande variabilité des microfaciès du Lutétien peut être ordonnée selon trois variables :

- 1/ La texture : le microfaciès peut être très granulaire, sans matrice micritique ni véritables ciments sparitiques, comme la Pierre de Vassens ou de Méry-sur-Oise dont la porosité totale dépasse parfois 40% (Tab. 13 et Tab. 14). La texture est de type grainstone, même si les ciments précoces et les ciments palissadiques sont très peu développés, à l'inverse d'un calcaire comme l'Oolithe vacuolaire. Les ciments sparitiques nets sont donc rares, hormis les ciments syntaxiaux liés aux échinodermes.

D'autres microfaciès seront nettement micritiques et auront une texture packstone voire parfois wackestone. Mais en plus de ce caractère textural, lié à la quantité d'éléments, nous décrirons la taille moyenne des cristaux de la matrice micritique. En effet, au microscope optique, la micrite peut se présenter sous la forme d'une pâte grise à brune sans cristaux visibles, ou être moins typique et contenir des plages plus claires de calcite mieux cristallisée. Cette recristallisation de la matrice en microsparite, voire en sparite est généralement accompagnée de cristallisations secondaires dans les macropores (grand cristaux sparitiques). Cet aspect mieux cristallisé de la matrice indique un plus fort degré d'induration qu'il est important de mentionner. Par exemple, à Courville, il s'agit de la principale différence entre les bancs de Bousin (très micritiques avec près de 50% de porosité) et les bancs utilisés pour la construction (avec une matrice recristallisée et des plages de sparite dans les macropores : porosité 10 à 25%).

Nous utiliserons donc des termes correspondant :

- Aux textures décrites par Dunham, 1962 (et représentées à la figure n°12 de l'introduction). Soit M = mudstone, W = wackestone et P = packstone pour les calcaires contenant une matrice et G = grainstone pour les calcaires granulaires, même s'ils sont ici très peu cimentés.

- A la taille moyenne des cristaux de la matrice, indiquant son état de recristallisation et la présence de cimentation sparitique secondaire : micrite non recristallisée (0), micrite avec quelques plages de microsparite (1), micrite très recristallisée en microsparite avec quelques plages sparitiques (2). La mention d peut aussi être ajoutée au descriptif du microfaciès quand celui-ci présente des traces de dolomitisation.

- 2/ Le contenu paléontologique : les différentes pierres de tailles extraites du Calcaire grossier, proviennent des différents niveaux du Lutétien et contiennent généralement des organismes marqueurs dont la valeur biostratigraphique est reconnue (Abrard, 1925 ; Blondeau, 1965). C'est pourquoi, nous déterminerons la nature des différents éléments figurés organiques et mettrons en avant ceux qui attribuent l'échantillon à un niveau biostratigraphique. Ainsi :

- F : Foraminifères avec Fn : *Nummulites sp,* Fo : *Orbitolites Complanatus,* Fa : Alvéolines…

Le cas des Milioles est un peu particulier car celles-ci se rencontrent dans pratiquement tous les niveaux du Calcaire grossier, nous ne préciserons donc que leur extrême abondance ou à l'inverse, leur absence.

- P : pelletoïdes, incluant les organismes micritisés et non identifiables ;

- L : Lamellibranches en précisant parfois leur nature comme Lh : Huîtres ;

- G : Gastéropodes avec Gc : Cérithes, Gl : Limnées, Gcg : *Cerithium giganteum ;*

- D : *Ditrupa strangulata* ;

- A : Algues calcaires ;

- E : Echinodermes.

- 3/ La part d'éléments détritiques : nous estimerons la quantité de grains de quartz en indiquant : Q0 : peu à pas de quartz, Q1 : quelques petits grains (inférieurs à 250 µm, taille moyenne 100 - 150 µm) ; Q2 : présence de gros quartz (supérieurs à 250µm, taille moyenne 400 – 500 µm) ; Q3 : très nombreux grains de quartz et Q4 : grès calcaire. L'abondance de glauconie (Gl) ou son absence sera aussi précisée.

2 : Inventaire des principaux microfaciès du Calcaire grossier

Groupe 1 : Microfaciès à matrice micritique importante

Ces microfaciès contiennent une matrice micritique plus ou moins recristallisée qui supporte ou englobe les éléments figurés, généralement des Milioles et des bioclastes (Lamellibranches et Gastéropodes). Ces calcaires sont très abondants dans la région rémoise (Zones régionales 1 et 2) où ils sont majoritaires.

Type 1a : Biomicrite à microsparite à Milioles et *Orbitolites* (P2 – Fo.a.LGA – Q1)

Ce type de calcaire, dont l'exemple type est la Pierre de Courville, est très abondamment mis en œuvre à Reims : reconstruction de Reims dans les années 1920-1925. Les sites d'extraction se situent principalement dans la Zone régionale 1 (Fig. 36) : Romain, Vandeuil, Fismes, Courville…

Il s'agit d'une biomicrite de texture packstone à matrice hétérogènement recristallisée en microsparite et sparite. Certaines zones peuvent être nettement micritiques (m de la Figure 44) comme le sédiment interne des bioturbations (voir a/ Fig 42), alors que dans d'autres endroits la matrice sera très recristallisée (ms et s, Fig. 44) . Ceci implique une hétérogénéité de porosité entre des zones micritiques essentiellement microporeuses (à infraporeuses suivant la taille des pores entre les nanograins de la micrite) et des zones à porosité totale plus faible mais principalement composée de macropores intercristallins. En effet, entre les cristaux de sparite ou de microsparite, les pores mesurent fréquemment plus de 10µm (voir Fig. 47a et 47b), cette dimensions classant ces pores comme étant des macropores (voir pages 24et 25 de l'introduction).

De la même façon, le colmatage des macropores moldiques (dissolution de certains organismes) est lié à ce fort taux de recristallisation de la matrice. En effet, cette phase diagénétique se produisant après l'induration du sédiment et la disparition des coquilles en aragonite (porogenèse par dissolution), des cristaux de sparite cristallisent en périphérie des macropores à la façon d'une calcite de blocage (poronécrose par cristallisation centripète de ciment sparitique). Les macropores moldiques résiduels (PM de la Figure 44) seront donc très peu nombreux et généralement mal connectés à l'ensemble du réseau poreux. Ceci explique pourquoi la porosité totale de ce microfaciès est plus faible que dans les autres variétés du Calcaire Grossier : moins de 25% et la résistance à l'écrasement importante : plus de 250 kg/ cm².

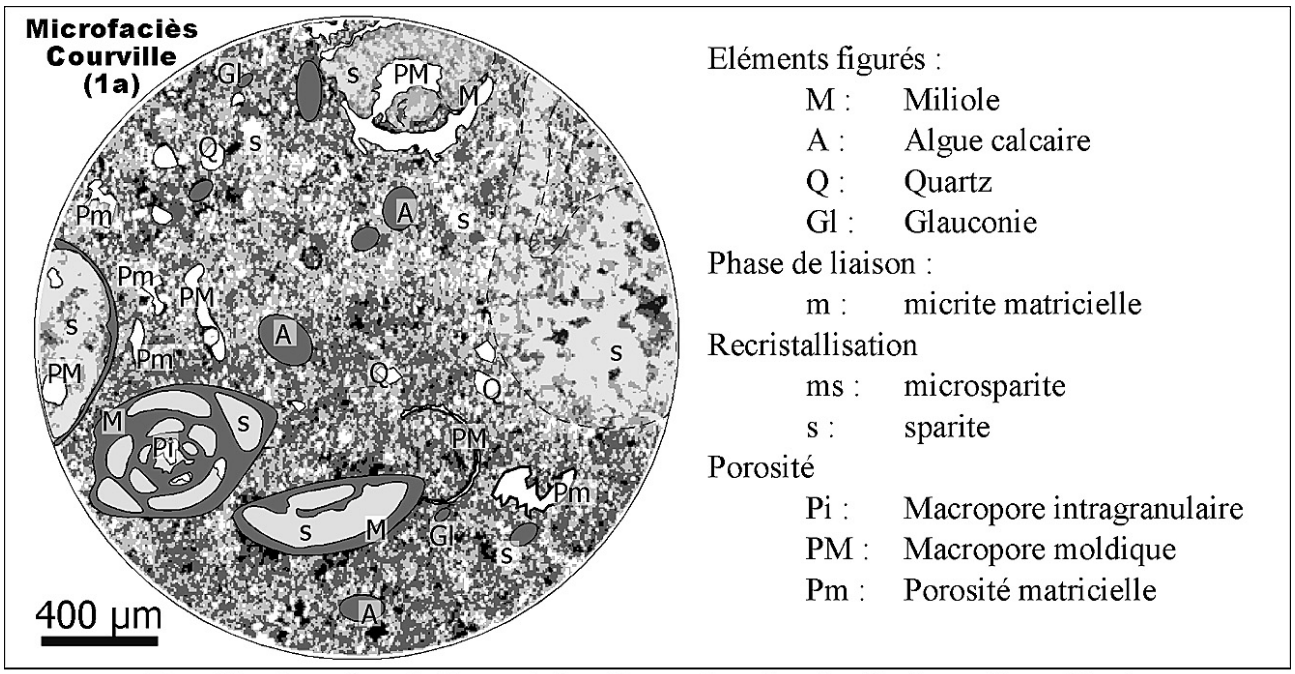


Fig. 44 : Représentation schématique du microfaciès type Courville 1a

Les éléments figurés sont très nombreux (sauf dans les bioturbations) et de nature très variée : principalement des foraminifères (Milioles : biloculines, triloculines et quinqueloculines, *Orbitolites, Rotalidae,* Alvéolines, Textulariidés…) et des sections circulaires d'algues calcaires (Dasycladacées) à pores tubulaires verticaux. Mais on trouve aussi des débris de coquilles de lamellibranches et de rares éléments d'échinodermes ; les coquilles de Gastéropodes sont toutes totalement dissoutes.

Les microfaciès du banc de Liais et du banc de Roche de Courville sont relativement identiques, le banc de Roche étant légerement plus recristallisé, même si les macropores moldiques ou intragranulaires sont moins oblitérés par de la sparite. En plus de cette légère différence de taux de recristallisation, on peut noter que la Roche contient plus de moules externes de Cérithes que le Liais, mais ces différences sont toutefois suffisamment mineures pour que les deux microfaciès soient considérés comme identiques.

Type 1b : Biomicrite à microsparite à Ditrupa et lamellibranches (P0 à P2 – DLh.E – Q1 - 2 à 3g)

Les calcaires à *Ditrupa strangulata* forment l'autre principal groupe de microfaciès micritique. Stratigraphiquement, ils se placent en dessous des calcaires à *Orbitolites* et sous le banc repère à *Cerithium giganteum*. Le faciès le plus commun de ces calcaires est composé par un packstone brun - crème, riche en débris d'organismes. Il contient des tubes de *Ditrupa* en très grand nombre, visibles à l'œil nu et souvent orientés verticalement (en position de vie).

La fraction détritique est plus importante que dans les calcaires à *Orbitolites* mais par endroits, les niveaux à Ditrupa sont très carbonatés et ont fourni une pierre de taille de bonne durabilité. Dans la région d'Hermonville - Cormicy, les bancs sont relativement peu épais (20 – 25 centimètres environ) et les constructions locales sont bâties en petits appareillages, les blocs liés par du mortier ; alors que les calcaires à *Orbitolites* permettent le sciage de gros moellons.

A l'intérieur de ces calcaires à Ditrupa, nous avons différencié plusieurs types de microfaciès.

La première distinction est sédimentologique et liée au contenu du faciès. En effet, à la base de l'unité les bancs sont très riches en éléments détritiques : grains de quartz allant de 100µm à plusieurs millimètres (avec nombreux grains entre 500µm et 1 mm) et de nombreux grains de glauconie détritique. Le microfaciès de ces bancs est relativement grossier et peut contenir quelques Nummulites, des débris d'Echinodermes et des coquilles de mollusques. Les bancs supérieur de l'unité des calcaires à Ditrupa sont plus fins, les gros quartz sont absents, tout comme les Nummulites, par contre, les débris d'échinodermes seront toujours présents avec même parfois des débris d'étoiles de mer comme à Noyon (ou au 57 rue de Metz, à Reims). Enfin, un troisième type de calcaire à Ditrupa peut être différencié, certains bancs sont en effet très riches en coquilles de lamellibranches (voir Fig. 38) qui peuvent être conservées ou dissoutes, et dans ce cas, la macroporosité moldique est très importante. Ces bancs coquiller s'observent généralement à la base de l'unité à *Ditrupa*, où ils seront alors très gréseux, ou au sommet, où ils seront plus fins, et contiendrons parfois les premiers *Orbitolites complanatus*.

La deuxième distinction que nous avons faite est diagénétique et du même ordre que pour les calcaires à Milioles et *Orbitolites* de Courville : il s'agit de l'aspect cristallin de la matrice micritique et de la présence de cristallisation secondaire de sparite (Fig. 45).

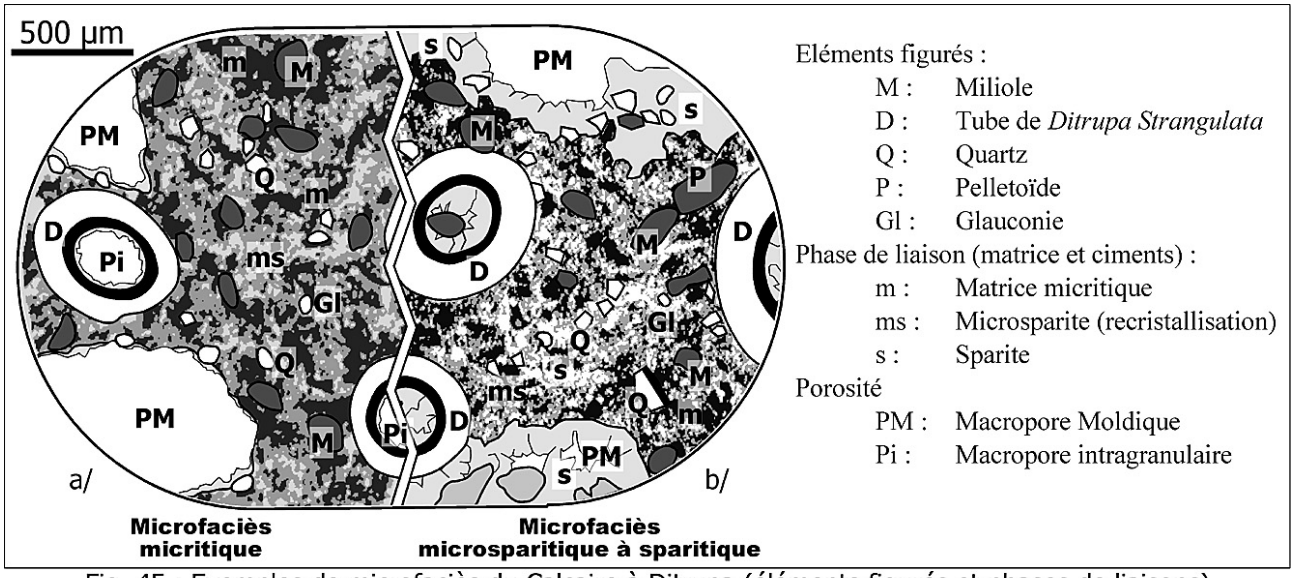


Fig. 45 : Exemples de microfaciès du Calcaire à Ditrupa (éléments figurés et phases de liaisons)

Nous avons reconnu deux types de microfaciès, les uns plutôt micritiques sans cristallisation de sparite dans la macroporororosité constituée de grands macropores moldiques et de macropores intragranulaires à l'intérieur des tubes de Ditrupa : Pi de la figure ci-dessus. Les autres (b de la Figure 45) sont plutôt microsparitiques avec des macropores réduits ou totalement obturés par la sparite secondaire ; il peut subsister des macropores résiduels mais ils sont de taille et d'importance limitée par rapport à ceux des microfaciès sans recristallisation.

Les différents microfaciès de l'unité des calcaires à Ditrupa peuvent donc s'organiser ainsi :

- Calcaire à Ditrupa micritique à microsparitique : (P1 – DLE – Q1)
- Calcaire à Ditrupa microsparitique à sparitique : (P2 – DLE – Q1)
- Calcaire à Ditrupa à nombreuses coquilles dissoutes : (P1 à 2 – DLh.GE – Q1 à 2)
- Calcaire à Ditrupa à fraction détritique importante : (P1 à 2 – Fn ?DLE – Q2 à 3g)

Type 1c : Biomicrite à nombreux petits quartz et empreintes de Cérithes (P0 – Fm.Gc. – Q3)

Ce microfaciès, rencontré en œuvre dans divers bâtiments de Reims (notamment le long du boulevard Lundy, place Aristide Briand), se compose d'une matrice micritique très peu recristallisée comprenant seulement trois types d'éléments : de petits grains de quartz (inférieur à 200µm) et des empreintes de Cérithes et des foraminifères (dont quelques Milioles). Par contre, au moment de la rédaction de cet ouvrage, nous n'avons toujours pas trouvé ce faciès dans les carrières des environs de Reims (Zones régionales 1 et 2). Nous ne pouvons donc pas indiquer sa provenance, même si le contenu paléontologique indiquerait une appartenance au sommet du Lutétien moyen voire au Lutétien supérieur.

Variété spéciale : Niveau à Cerithium giganteum

Ce calcaire contient des moules externes et internes de Cérithes géants qui peuvent atteindre plus de 20 centimètres de long et plus de 5 centimètres de diamètre, ils ont été observés dans divers blocs d'un site archéologique gallo-romain de Reims (Fronteau et Paicheler, 1999). Ce faciès micritique à microsparitique relativement fin est surtout anecdotique par la présence du niveau repère à *Cerithium giganteum*. En effet, ce banc n'a pas été observé dans d'autres sites de la région rémoise et sa mise ne œuvre n'est pas mentionnée dans la bibliographie (par exemple, Blanc et Lorenz *in* Pomerol, 1992).

L'épaisseur des bancs (plus de 50 centimètres de roche homogène) laisse supposer que ces blocs proviennent des régions 3 ou 4 (Fig. 36).

Groupe B : Microfaciès granulaires à forte macroporosité intergranulaire

Ces microfaciès ne contiennent pas de matrice micritique, les éléments sont jointifs et cimentés plus ou moins nettement par une microsparite mal cristallisée ou des cristallisations sparitiques. Les éléments figurés sont aussi diversifiés que dans les microfaciès micritiques, les foraminifères étant toujours abondants. Ces calcaires sont très fréquents dans les régions de Laon, Soissons (Zones régionales 4 et 5) et vers le centre du Bassin de Paris notamment dans l'Oise où ils sont majoritaires.

Type 2a : Biopelmicrosparite à foraminifères et échinodermes (G – Fo.a.PE – Q1)

Ce type de calcaire correspond à plusieurs faciès de Pierres de St-Leu-d'Esserent et de St-Vaast-les-Mello, il est nettement granulaire et la macroporosité intergranulaire est très importante, près de 20% du volume soit la moitié de la porosité totale. Les éléments sont principalement de deux types : des foraminifères (Milioles, *Orbitolites complanatus,* Alvéolines, Textulariidés…) et des éléments micritiques sans structure interne (pelletoïdes et éléments micritisés). La texture est grainstone, même si les seuls ciments sparitiques nets sont liés à la présence de débris d'échinodermes, ici relativement nombreux. En effet, la principale phase de liaison est composée d'une microsparite d'aspect « sale », mal cristallisée (notée Cm sur la Figure 46), qui enveloppe les éléments jointifs. Des ciments syntaxiaux bien cristallisés s'observent en de nombreux endroits, ce microfaciès était initialement à support granulaire et ne contenait pas de micrite matricielle (même si les autres ciments sont mal développés). Les éléments sont souvent difficilement reconnaissables, on peut pourtant distinguer des foraminifères pris dans de la micrite, des pelletoïdes totalement micritiques et des éléments bioclastiques micritisés. Les quartz sont présents mais peu nombreux et de petite taille, la glauconie est quasiment absente.

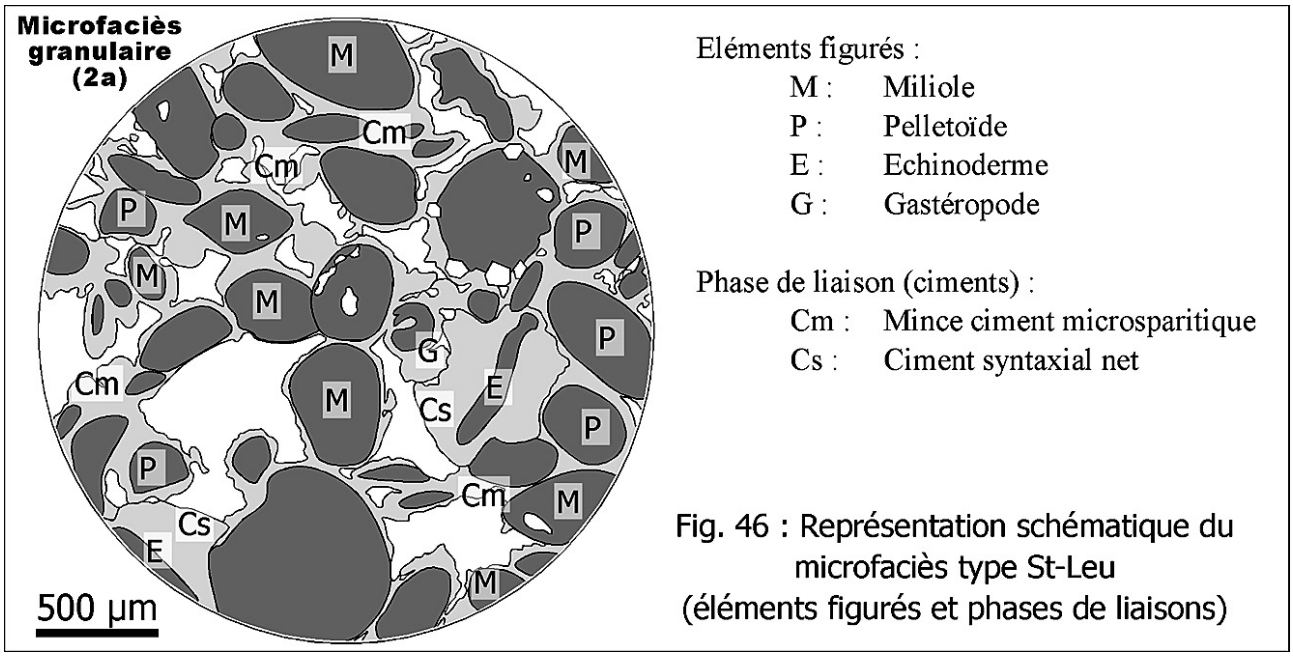


Fig. 46 : Représentation schématique du microfaciès type St-Leu (éléments figurés et phases de liaisons)

Type 2b : Biopelmicrosparite à quartz et bioclastes (G – FPE – Q3)

Comme le précédent, ce microfaciès contient principalement des Milioles, des débris d'échinodermes et de petits débris d'organismes micritisés, mais il contient en plus de très nombreux grains de quartz d'une taille moyenne de 150µm ± 35. Globalement, la taille des éléments est inférieure à celle du microfaciès 2a, ce qui explique certainement l'absence des gros éléments bioclastiques comme les fragments *d'Orbitolites* et d'Alvéolines. La macroporosité intergranulaire est très importante : près de 20% du volume soit la moitié de la porosité totale (les ciments sparitiques sont peu développés, même les ciments syntaxiaux). Enfin le degré de micritisation des éléments est important et identique à celui du microfaciès 2a.

Type 2c : Biomicrosparite à quartz et bioclastes (G – Fa.LGE – Q2)

Ce microfaciès apparaît très particulier du fait de la taille des éléments figurés. En effet, de nombreux bioclastes mesurent plus de 2mm de long, ce microfaciès grossier est donc une calci-rudite à Foraminifères (selon la classification de Folk). Il contient des Milioles et des Alvéolines, ainsi que divers autres types de bioclastes (Lamellibranches et Gastéropodes parfois entiers) et des grains de quartz. Les échantillons observés (site 2He à Hermonville) présentaient de nombreuses cristallisations siliceuses intergranulaires et des recristallisations intragranulaires en calcédonite (échantillon 2he-v2). Ce microfaciès possède une forte macroporosité intergranulaire, liée à l'absence de matrice et de poronécrose par cimentation.

Type 2d : Biomicrosparite à Nummulites (G – Fn. – Q2)

Ces faciès à Nummulites de la base du Lutétien constituent la formation de la « Pierre à liard », fréquemment utilisée dans les constructions comme pierre de soubassement (Noyon, Laon mais aussi quelques bâtiments de Reims). Les Nummulites, foraminifères de grande taille (plus de 2mm) composent la plus grande partie du volume de la roche, ils sont faiblement cimentés les uns aux autres par un ciment microsparitique peu épais. Les autres éléments sont des Milioles, de petits grains de quartz et des grains de glauconie ; les macropores intergranulaires ou intragranulaires n'étant pas obturés, la porosité résiduelle est donc importante.

Les microfaciès présentés ici ne représentent qu'une partie de la diversité du Calcaire grossier, nous pourrions multiplier les exemples et ajouter de nombreuses autres variétés. Pourtant dans ce travail, notre but n'est pas de faire un inventaire complet de ces microfaciès du Lutétien, mais d'en indiquer les types les plus courants et de les caractériser. Mais surtout, nous organisons cette variabilité microfaciologique autour de deux pôles principaux : la quantité d'éléments figurés et la nature de la phase de liaison.

De plus, nous mettons en avant l'hétérogénéité du taux de recristallisation de la matrice micritique qui peut varier rapidement d'un banc à l'autre, variabilité que nous caractériserons et estimerons par analyse d'images.

3 : Discrimination des microfaciès par quantification de phases (signatures ternaires)

La détermination de signatures ternaires en lumière polarisée permet des discriminations performantes car elle permet d'estimer la quantité de macroporosité et la présence de calcite bien cristallisée (principales caractéristiques montrées précédemment).

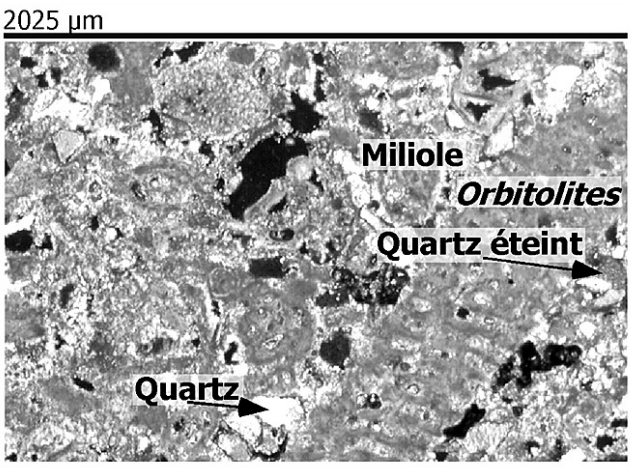
La présence d'oxydes de fer est assez faible, par contre en lumière polarisée-analysée, les grains de quartz posent des problèmes du fait de leur teintes de biréfringence (gris à blanc), passant au noir par extinction. Quand il est éclairé, le quartz pourra donc être confondu avec la sparite (phase C, couleur blanche, niveaux de gris supérieur à 200), et quand il est éteint, il pourra se confondre avec la micrite (phase B, teinte grise, niveaux de gris entre 125 et 150). Mais nous montrerons que cette erreur de mesure ne modifie pas réellement la réponse ternaire d'un échantillon, car nous ne quantifions pas le pourcentage de grain de quartz, mais caractérisons globalement un échantillon. Alors que les variations d'épaisseur augmentent largement la marge d'erreur de la mesure.

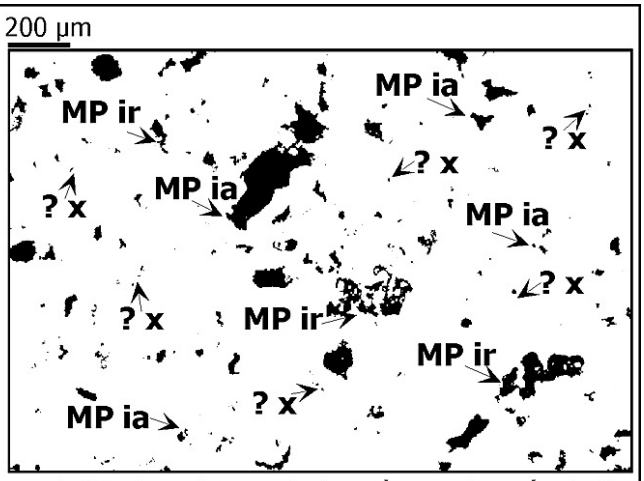
Paramètres d'éclairage et d'acquisition vidéo pour les microfaciès du Calcaire grossier :
- Lumière polarisée avec lentille condensatrice, Luminosité bloquée réglage photographique (indice 9).
- Faisceau lumineux dérivé vers utilisateur et caméra tri-CCD.
- Filtre bleu, Pas de filtres gris.
- Réglage caméra : Gain 08 DB, G. rouge –20, CCD iris 1/250ème.

Réglages des seuils des trois phases mesurées :
- 01 - 95 : Phase A : macroporosité, micrite sombre, oxydes de fer (phase noire)
- 96 - 165 : Phase B : micrite, bioclastes bruns, quartz éteints et pelletoïdes, glauconie.
- 166 – 255 : Phase C : microsparite et sparite, quartz clairs (phase claire à blanche).

a : Remarque sur la porosité du Calcaire grossier

Au microscope, l'analyse de la porosité des différents microfaciès du Calcaire grossier s'avère imparfaite, car elle ne prend en compte que la macroporosité, qui dans le cas des calcaires micritiques type Courville est très faible (quelques pour-cent pour une porosité totale de 15 – 20%). Dans un premier temps, nous avons donc tenté de déterminer des signatures ternaires à un grossissement élevé. Mais la présence de grands macropores intragranulaires nuit à ce mode d'analyse car ils entraînent l'acquisition fréquente d'images dont la porosité représente plus de 75% de la surface mesurée. Comme pour les autres microfaciès, nous avons donc procédé à des acquisitions sous un grossissement de *40 en lumière polarisée.

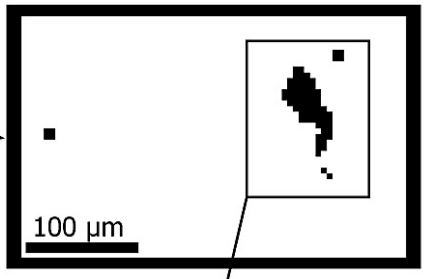


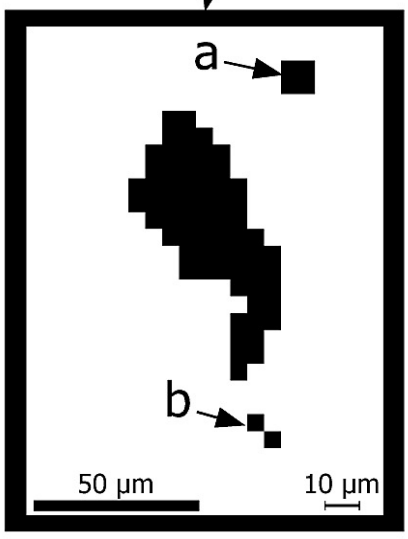


Calcaire microsparitique à sparitique à Milioles et *Orbitolites* (Noyon), lumière polarisée *40

Macropore intragranulaire : MP ia
Macropore intergranulaire : MP ir
Micropore ou Macropore ? : ? x

Fig. 47a : Porosité du Calcaire grossier
Image et image analysée binaire non transformée





L'agrandissement artificiel d'une image binaire (760*512), dont la porosité a été seuillée puis transformée (Opening), permet de déterminer la nature des plus petits pores observés (classification selon la taille des pores, voir page 24-25).

Sur cette image seuillée, le pore a/ a une taille isométrique de 10 µm (en fait 4 pixels soit 10,65 µm). Le pore b/ apparaît ici sous la forme de 2 points connexes, il se trouve à la limite d'observation qui est donc 10 µm Les plus petits pores discernés ont donc une taille supérieur à 10 µm. A ce grossissement, la microporosité (pores d'une taille inférieure à 7,5 µm) n'est donc ni observée, ni mesurée.

Fig. 47b : Porosité du Calcaire grossier, image binaire transformée puis agrandie
(Objectif microscope utilisé : *4, lumière polarisée)

Dans de but de déterminer la taille minimale des pores significatifs (macropore ou micropore ?), nous avons agrandi une image analysée transformée par un processus d'ouverture (Fig. 47a et Fig. 47b). La transformation par ouverture supprime les objets dont la taille n'est que de 1 pixels (qui peuvent être des artefacts d'acquisition vidéo). Les échantillons de Calcaire grossier ont été analysés à partir d'images de 760*512 pixels acquises à un grossissement de *40. Le champ mesure 2025 µm de long pour 1370 µm de large, pixel représente donc 2,66µm de large. Les plus petits objets discernés ont une taille théorique de 2*2,66µm soit 5,3µm, mais l'examen d'une image agrandie montre que la taille des plus petits pores est de 4 pixels soit environ 10µm. Nous ne « quantifierons » donc que la macroporosité, le grossissement ne permettant pas visualiser la microporosité (moins de 7,5 µm) ni l'infraporosité (inférieure à 1µm). Mais comme cette macroporosité est une des principales différences entre les faciès granulaires peu cimentés type St-Leu et les microfaciès micritiques type Courville, son estimation permettra de discriminer les deux groupes de microfaciès.

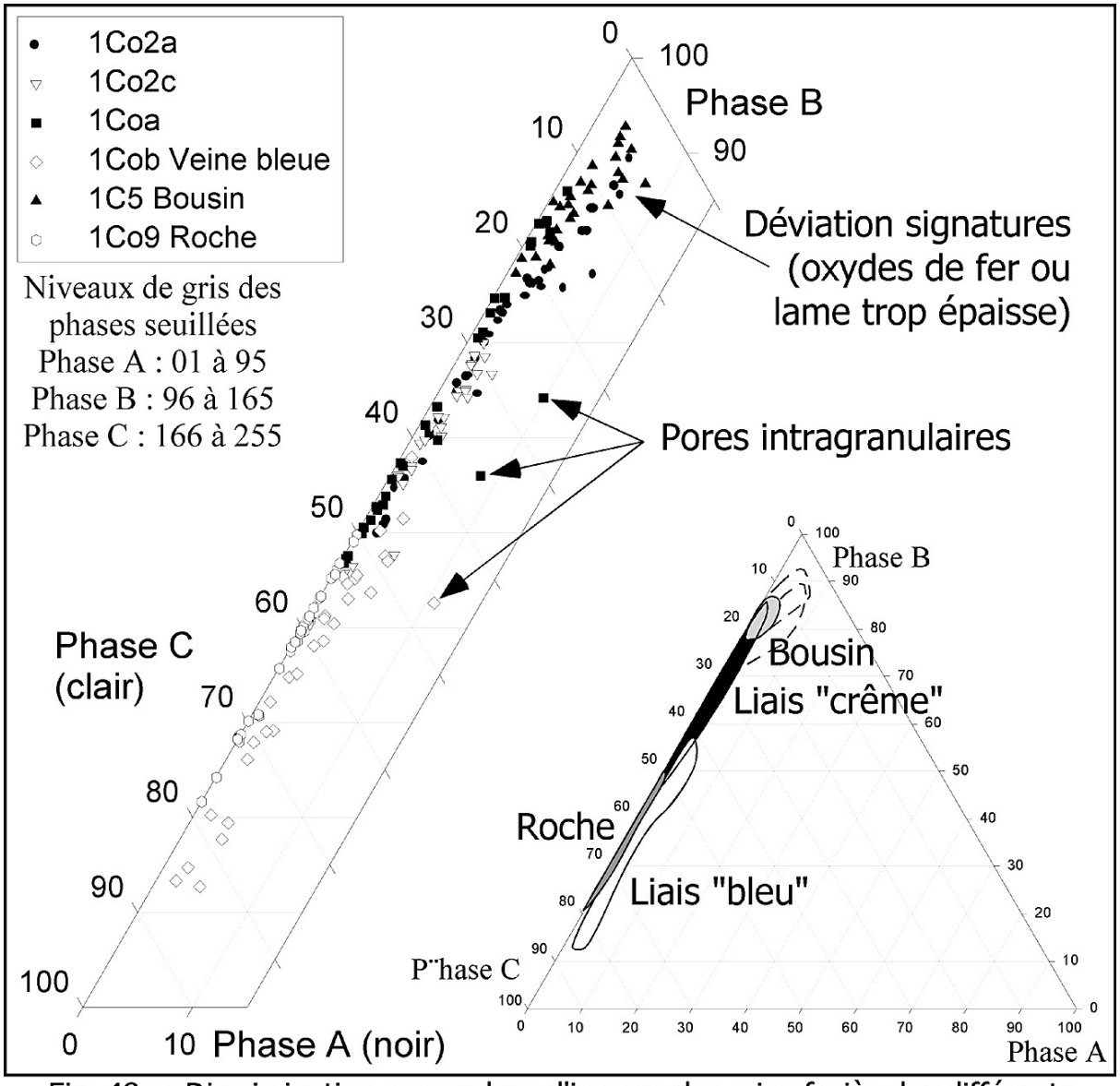


Fig. 48a : Discrimination par analyse d'images des microfaciès des différents bancs de la carrière St-Julien, Courville (Nuages de points et signatures ternaires)

b : Discrimination des microfaciès micritiques de Courville

Nous avons montré que les différents bancs de la carrière de Courville ont des microfaciès relativement semblables (éléments et texture) principalement différenciés par la taille des cristaux de la matrice micritique, plus ou moins recristallisée. Or, la caractérisation des microfaciès de l'Oolithe vacuolaire, avec la séparation des nucléus micritiques et des ciments palissadiques sparitiques, nous a montré que l'analyse d'images en lumière polarisée permet d'estimer la présence de ces deux phases avec une grande précision. Nous avons donc appliqué cette méthode à divers échantillons de la série de Courville dans le but de matérialiser les différences d'aspect cristallin. Pour cela, nous avons utilisé quatre types d'échantillons : le Liais de Courville gris-crème (1Co2a, 1Co2c, 1Coa), le Liais de la veine bleue centrale (1Coa), le Bousin (banc tendre gélif, 1C5) et la Roche de Courville (1Co9), voir diagrammes ternaires Fig. 48a (nuage de points) et 48b (moyennes des mesures).

Nous remarquons que les signatures ternaires des différents niveaux apparaissent toutes plaquées contre un bord du diagramme triangulaire, le pourcentage de phase noire mesuré est en effet très faible : 2% en moyenne pour le Liais et le Bousin, 0,2% pour la Roche.

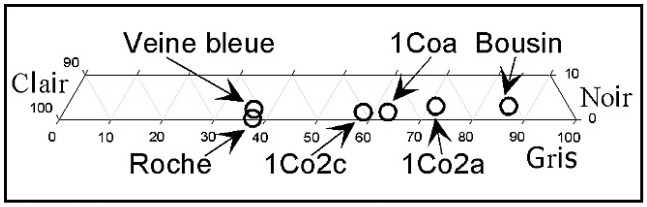


Fig. 48b : Signatures ternaires moyennes des différents bancs de Courville

Pourtant, certains points montrent un pourcentage de phase noire proche de 10% : un retour aux échantillons montre qu'il s'agit d'images contenant de grosses Milioles aux loges non obturées par de la sparite. Nous avons donc la confirmation que les signatures ternaires caractérisent bien la macroporosité du microfaciès et que dans le cas de Courville cette macroporosité est rare et fait plutôt figure d'exception (ici 3 cas sur 240 mesures).

La différenciation entre les différents bancs est très nette :

- Le banc de Bousin (1Co5), peu à pas recristallisé apparaît comme très homogène avec plus de 80% de phase grise (qui mesure principalement la micrite) et moins de 20% de phase claire (qui mesure principalement la quantité de sparite).

- Les nuages de points des différents échantillons du banc de Liais de couleur crème (Fig. 48a) apparaissent hétérogènes avec des valeurs en phase claire comprises entre 7 et 52%. Pourtant, les mesures sont principalement comprises entre 20 et 50% de phase claire, les moyennes par échantillon (Fig. 48b) sont toutes trois entre 25 et 40% et la moyenne globale est de 35%.

- L'échantillon du banc de Roche contient encore plus de phase claire (sparite) et réciproquement moins de phase grise (micrite), le nuage de point se situe entre 50 et 80% de phase claire pour une moyenne de 62,5%.

- L'échantillon de Liais, pris au centre de la veine bleue, montre des pourcentages de phase claire identiques à l'échantillon de Roche (de 40 à 85% avec une moyenne de 60,1) pour des valeurs de phase noire égale à celle des autres échantillons de Liais (moyenne de 2,9% alors que la roche n'en contient que 0,1%).

Nous matérialisons ainsi trois observations formulées lors de la description de la carrière de Courville :

- Les bancs aptes à une mise en œuvre (Liais et Roche) se différencient des bancs gélifs, tels le Bousin, par une recristallisation de la micrite matricielle en microsparite et sparite.

- Le banc de Roche , très résistant et moins poreux que le banc de Liais, est encore plus recristallisé que lui. La porosité est bien proportionnelle au taux de micrite matricielle conservée à l'état non recristallisée (Tab. 15).

- Le Liais de couleur bleu-gris du centre du banc présente un pourcentage de phase sparitique quasiment similaire à celui du banc de Roche, or les carriers considèrent que ce niveau est plus résistant que le reste du Liais. Nous montrons donc ici que cette dureté est liée à une recristallisation de la micrite aussi intense que celle du banc de Roche.

Nom du banc	Porosité totale (%)	Phase « micritique »	Phase « sparitique »
Bousin	**50,2** ± 2,6	77 à 93% : **85%**	5 à 22% : **11%**
Liais	**21,7** ± 2,6	43 à 86% : **60%**	11 à 59% : **35%**
Roche	**13,5** ± 2,0	21 à 50% : **37%**	50 à 78% : **62%**

Tab. 15 : Porosité totale des différents bancs de Courville, relation avec le caractère micritique de la matrice (Ecarts de valeurs et moyennes)

c : Analyse des différents types de microfaciès par analyse d'images (signatures ternaires)

Nous avons montré que l'acquisition d'images à un grossissement de *40 en lumière polarisée permet d'observer et d'estimer la quantité de macropores de taille supérieure ou égale à 10µm ainsi que le taux de recristallisation de la matrice micritique. En conséquence, nous avons analysé différents échantillons de différents microfaciès de Calcaire grossier, afin de les discriminer et vérifier la validité de nos analyses sédimento-diagénétiques.

Nous avons particulièrement tenu à vérifier que la grande différence entre les Pierres de Courville et les autres Pierres à bâtir du Lutétien se matérialisent bien par les signatures ternaires. En effet, le Liais et la Roche de Courville sont des calcaires micritiques et peu macroporeux, alors que de nombreux faciès du Calcaire grossier sont plutôt granulaires et très macroporeux. Pour vérifier cette discrimination, nous avons analysé divers échantillons, provenant de St-Leu-d'Esserent, de Noyon, de la région Laonnoise et de la zone régionale 2 (Hermonville – Cormicy).

Afin de faciliter leur compréhension nous n'avons comparés ici que quelques échantillons dont les signatures ternaires sont très représentatives (Fig. 49).

Deux échantillons venant de Courville ont été reportés afin de les comparer avec les autres types de microfaciès, ils ont tous les deux une morphologie allongée parallèlement à l'axe de la phase noire (qui estime la quantité de macroporosité). Le Liais de Courville possédant moins de 50% de phase claire est principalement micritique à microsparitique, alors que l'échantillon de Roche est à tendance sparitique (plus de 50% de phase claire). Tous deux possèdent très peu de phase noire et sont donc très peu macroporeux.

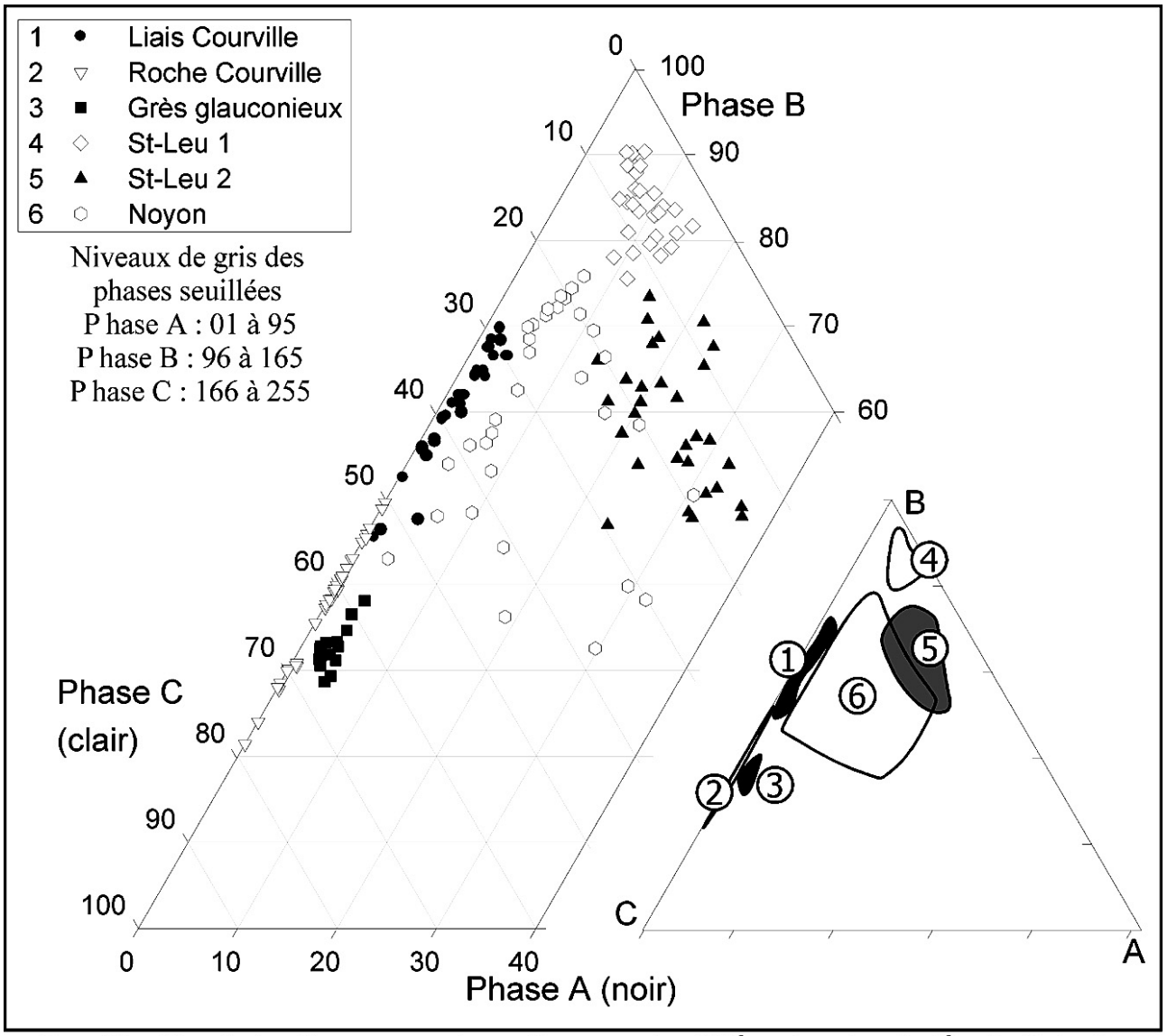


Fig. 49 : Discrimination par analyse d'images de différents microfaciès du Calcaire grossier (nuages de points et signatures ternaires)

L'échantillon 3/ de grès glauconieux, récolté dans des débris de construction à Reims, possède une signature ternaire très peu étendue, il est donc très homogène. En effet, cet échantillon ne contient que des grains de glauconie, des grains de quartz et un ciment calcitique, il est peu macroporeux et ne présente pas de structura-

tion à l'échelle de la lame mince. Les grains de quartz sont les éléments majoritaires et malgré leur état plus ou moins éclairé, nous pouvons considérer que le fait de travailler sous lumière polarisée-analysée ne fausse pas l'analyse, même dans le cas de ce sédiment gréseux. En effet, celle-ci n'a pas pour but de quantifier un paramètre, mais de visualiser et matérialiser des microfaciès afin de le comparer. Remarquons que nous utilisons cet échantillon de grès homogène comme lame-mince de référence pour vérifier les réglages de l'acquisition vidéo afin que nos analyses se déroulent toujours dans des conditions identiques.

Les échantillons 4/ et 5/ de St-Leu-d'Esserent sont intéressants car ils apparaissent à la fois nettement différents des échantillons de Courville mais relativement semblables entre eux. Ils contiennent plus de phase grise que le Liais ou la Roche (environ autant que le Bousin de Courville) ce qui montre qu'ils sont essentiellement micritiques. Ici, la micrite n'est pas matricielle mais granulaire, puisque les éléments de ces microfaciès (voir type 2a) sont très micritisés ou totalement micritiques. De plus, la macroporosité plus importante se visualise elle aussi très nettement puisque ces deux échantillons contiennent entre 5 et 35% de phase noire contre 0,1 à 2% pour Courville.

Si on compare entre eux ces deux échantillons, on observe que St-Leu 1 est plus micritique, moins macroporeux et plus homogène que St-Leu 2. Ce dernier contient plus de sparite ou de microsparite et plus de macropores que St-Leu 1.

L'échantillon de Noyon complète bien ces différents types de signatures ternaires car il montre un nuage de points très étendu, avec de nombreux points à moins de 10% de phase noire, alors que d'autres dépassent largement cette valeur pour atteindre 30% et plus. Avec sa dominante microsparitique (entre 20 et 50% de phase claire), il possède donc une macroporosité hétérogène, liée sans doute à la présence de très grands macropores. En effet, cette signature ternaire est typique de certains microfaciès à macroporosité moyenne assez faible (du moins par rapport à un microfaciès type St-Leu 2) mais qui présentent des éléments creux non obturés. Ainsi, quand la visée du microscope passe sur un de ces éléments à macroporosité intragranulaire, comme l'intérieur d'un tube de Ditrupa ou les loges d'une Miliole, la mesure indique une très forte porosité, mais qui ne s'observera que ponctuellement.

A travers ces exemples, nous montrons la validité de cette méthode de discrimination par analyse d'images appliquée ici à des échantillons de calcaires complexes : à matrice micritique et à grains de quartz. Elle permet en outre la matérialisation de paramètres sédimento-diagénétiques comme l'importance et l'hétérogénéité de la macroporosité et l'aspect cristallin de la matrice micritique. Concernant notre caractérisation des microfaciès du Calcaire grossier, nous confirmons et matérialisons graphiquement la grande différence entre les microfaciès

micritiques peu macroporeux (type 1a : Courville), les microfaciès micritiques à macroporosité hétérogène (type 1b : Calcaire à Ditrupa) et les microfaciès granulaires macroporeux (type 2a : St-Leu).

Ces trois grands types de microfaciès pourront donc être reconnus et comparés grâce à la détermination de leur signature ternaire, en conséquence nous pourrons faire appel à ce moyen d'analyse pour préciser l'origine ou différencier objectivement des échantillons récoltés en œuvre et donc hors de leur unité géologique.

e/ Synthèse :

1 : Le Calcaire grossier ou plutôt LES Calcaires grossiers

Nous avons montré que le Calcaire grossier est composé de nombreux microfaciès parfois très différents. Ceux-ci peuvent provenir des différentes unités lithologiques du Lutétien : « Pierre à Liards », « Calcaire à Ditrupa » et « Calcaire à Milioles et *Orbitolites* », mais présentent des variations latérales importantes suivant les régions : par exemple la Pierre de St-Leu-d'Esserent et le Liais de Courville. Suivant ces différenciations, les éléments figurés sont de nature très diversifiée mais comptent principalement des bioclastes et des éléments détritiques. Les oolithes ne sont jamais observées tout comme les débris de crinoïdes, en effet, il s'agit plutôt de fragments d'oursins ou d'étoiles de mer. Les calcaires lutétiens seront généralement caractérisés par la présence de Milioles, de petits grains de quartz et de glauconie.

La nature et l'importance de la phase de liaison varie elle aussi depuis une micrite nette très peu recristallisée à un ciment microsparitique peu développé. Cette phase de liaison influence le taux de cohésion entre les différents éléments, qui est faible dans le cas des calcaires granulaires type St-Leu et nettement importante pour les faciès micritiques. La porosité est généralement très importante : souvent plus de 30%, les Pierres de Courville faisant figure d'exception avec une porosité totale maximale de 25%.

Les aptitudes d'emploi du Calcaire grossier sont très étendues ou très limitées, certaines Pierres peuvent être utilisée en soubassement, d'autres pour la sculpture ou pour la mise en balcon ou en gargouilles ; d'autres roches enfin ont un usage limité à l'élévation.

Nous n'avons donc pas un, mais de très nombreux types de calcaires, cette diversité faisant la richesse de cette formation du Lutétien et la rendant particulièrement intéressante à étudier. Mais elle causent de nombreux problèmes, en particulier pour la restauration de monument historiques. En effet, avec la disparition de certaines carrières de pierre de taille, les pierres de substitution ont parfois été sélectionnées plus en fonction de la couleur du bloc que selon la nature du microfaciès, provoquant plus de dégâts que de réparations.

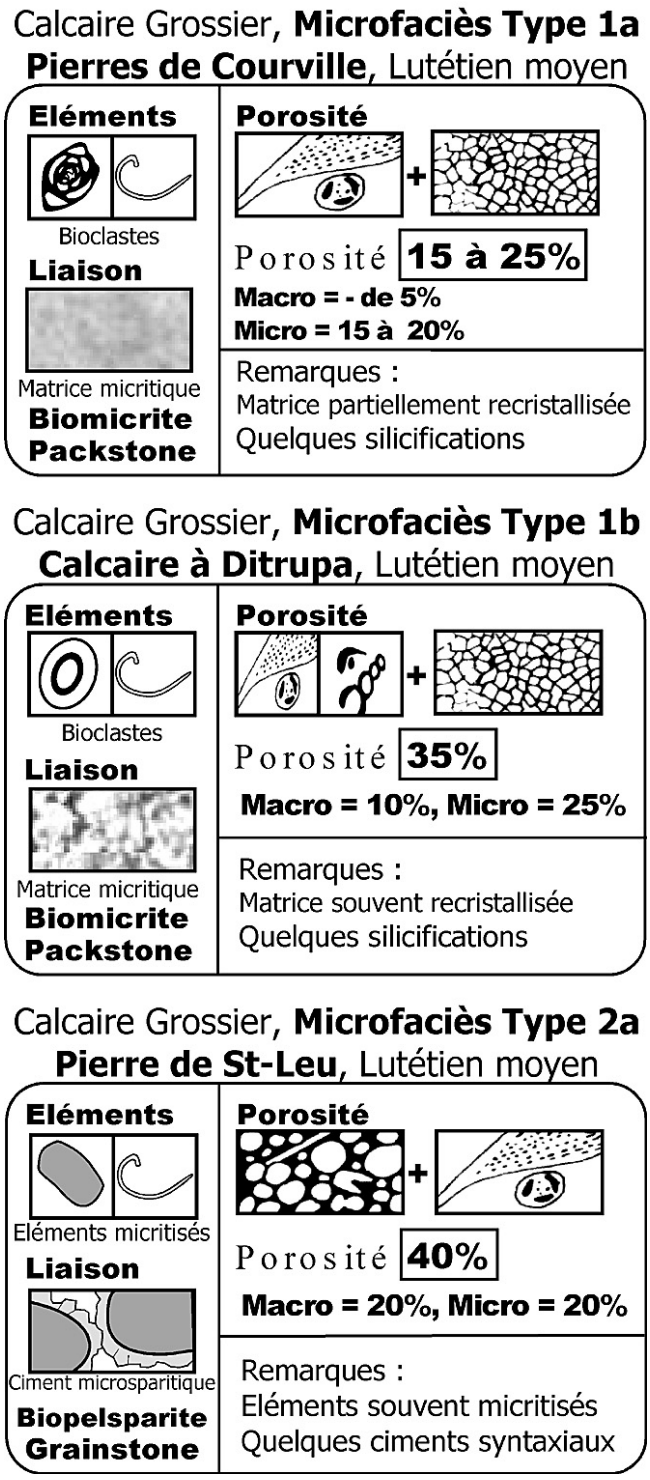


Fig. 50 : Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques de 3 microfaciès de Calcaire grossier

2 : Facteurs caractéristiques du Calcaire grossier

Alors que pour les deux familles de pierres de taille précédentes : le Calcaire à débris et l'Oolithe vacuolaire, le nom de la formation étaient le meilleur descriptif du microfaciès, dans le cas du Calcaire grossier, nous devons préciser quelques points :

Malgré son nom de Calcaire grossier, les microfaciès sont généralement assez fins, soit par présence d'une matrice micritique, soit par la taille des éléments qui dépasse rarement le millimètre. Les cas où le calcaire devient véritablement grossier sont plutôt rares, par exemple : les bancs à Nummulites, les bancs coquilliers à *Ditrupa* et les niveaux à quartz et glauconie de la base des calcaires à *Ditrupa*

Dans le cas des calcaire micritiques type Courville, le taux de cohésion entre les éléments est important, lié à la présence de la matrice micritique. Celle-ci est donc le principal composant du microfaciès qui contrôle ses caractéristiques, d'autant plus qu'il apparaît que le taux de recristallisation de la matrice est directement lié à la porosité totale de la roche.

Dans le cas de calcaires granulaires comme ceux du Val d'Oise, le microfaciès présente un taux de cohésion plus faible lié à la quantité d'éléments, à leur taille et à l'importance de la phase de liaison (généralement un ciment microsparitique peu et mal cristallisé).

4/ Autres calcaires :

a/ Pierres d'Euville et pierres assimilées

1 : Cadre géographique et géologique, sites d'exploitations

Les grandes carrières de la région de Commercy, dans la Meuse , ont fourni quelques unes des plus belles pierres de taille calcaires de France, dont les deux plus connues sont la Pierre d'Euville et la Pierre de Lérouville (qui comprend l'appellation dite du Moulin à Vent, Noël, 1970). Elles furent longtemps exploitées de façon artisanale et ne connurent qu'une utilisation régionale ; la plus ancienne trace d'exploitation remonterait aux environs de 1560 (Noël, 1970 ; Hilly et François, 1991). Mais après 1860, avec l'industrialisation des moyens d'extraction et de transport, ces pierres de taille furent utilisées massivement, de façon régionale, nationale et internationale (Petit Palais à Paris, Palais du Roi à Bruxelles…). Avant la première guerre mondiale, le bassin carrier, employait plus de 1000 ouvriers, mais maintenant, il est beaucoup plus réduit. L'exploitation se fit selon différents modes d'extraction : à ciel ouvert avec tranchée préliminaire au pic, en souterrain à partir de 1918 et actuellement à ciel ouvert (Hilly et François, 1991). Les carrières ne sont pas très nombreuses mais de grandes dimensions avec des fronts de taille dépassant les 10 mètres de puissance, certains sites sont toujours en exploitation, notamment à Euville par la ROCAMAT.

Stratigraphiquement, les Pierres d'Euville et Lérouville appartiennent à de la formation oxfordienne récifale de Lorraine dont elles constituent les unités lithologiques dites d'Entroquites. Elles se rencontrent sur les plateaux du bords de Meuse entre Haudainville (au Nord, près de Verdun) et Foug (au Sud, près de Toul). La formation, datée de l'Oxfordien moyen (Enay et Boullier, 1981), se compose d'une succession complexe de biohermes coralliens, séparés par des de zones inter-récifales (Humbert, 1971).

Les Entroquites sont des corps sédimentaires discontinus à géométrie lenticulaire qui font partie des unités inter-récifales qui reposent sur les flancs des formations récifales. Au sommet elles sont parfois érodées par des surfaces perforées à indices d'émersion. L'une de ces Entroquites, la pierre d'Euville, se trouve intercalée entre une formation récifale inférieure et des calcaires crayeux qui passent latéralement à des calcaires bioconstruits (notés bioconstruction supérieure sur la Fig. 51, d'après Lathuillière, 1998).

Les corps sédimentaires d'Entroquites ont une forme globalement lenticulaire qui, dans le cas de la Pierre d'Euville mesure 2,5 km de long pour une largeur de 600 mètres et une épaisseur maximale de 20 mètres (Humbert, 1971, David, 1998). Les zones exploitées pour la pierre de taille ont des dimensions plus restreintes : les exploitations sont situées au centre des lentilles, dans les zones où les calcaires à entroques mesurent plus de 10 mètres d'épaisseur (Humbert, 1971).

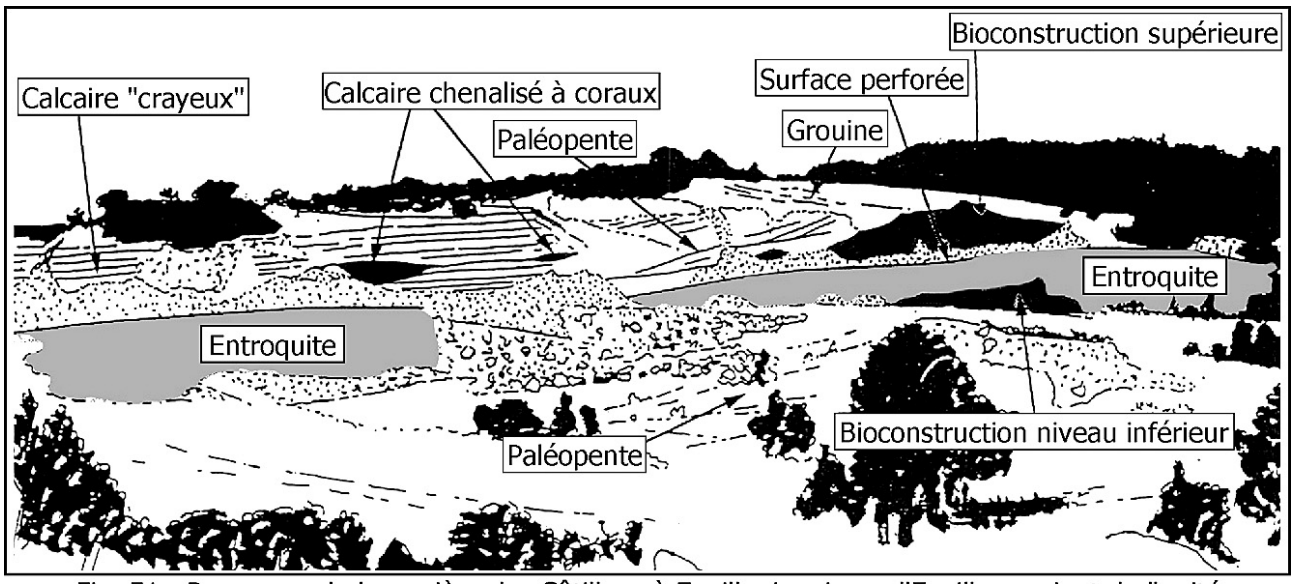


Fig. 51 : Panorama de la carrière des Côtillons à Euville, La pierre d'Euville provient de l'unité lithologique dite Entroquite, d'après Lathuillière, 1998

2 : Caractérisation des pierres à bâtir

Selon l'inventaire des carrières de 1889, la Pierre d'Euville est un « calcaire à entroques blanchâtre formé presque entièrement de débris d'encrines », ce qui caractérise très bien le faciès d'Entroquite. La Pierre de Lérouville considérée comme « un calcaire à entroques de grain moyen, blanc un peu grisâtre » sera assimilée à la Pierre d'Euville dont elle est très difficile à différencier.

Selon la description des carriers (Noël, 1970 ; Hilly et François, 1991) l'Entroquite des environs de Commercy (Pierres d'Euville et Lérouville) comprend différents types et qualités de pierres : l'Euville marbrier ; l'Euville construction ou Euville roche ou Briantville ; le Gévaux ou Briantville crème (qui à la différence des faciès de Pierres d'Euville contient un nombre important d'oolithes). Noël (1970) distingue deux variétés de Pierre de Lérouville : le banc de Roche et le Banc gris.

Les bancs de Gévaux ne sont pas étudiés dans ce travail, car ils contiennent des oolithes. Or, nous avons sélectionné la Pierre d'Euville pour étudier le comportement en œuvre d'un calcaire à entroques et non celui d'un calcaire oobioclastique. De plus, nous ne savons pas si les bancs de Gévaux ont été utilisés en Champagne-Ardenne..

Caractéristiques pétrophysiques :

Du point de vue chimique, ces calcaires sont composés à plus de 98% de $CaCO_3$, la masse volumique mesurée au pycnomètre =2,7 (Tab. 16 d'après Rémy, 1993) est donc très proche de celle de la calcite (2,71 g/cm^3).

Résultats moyens	Euville, type non spécifié
Résistance à la compression (kg/cm^2)	276 (de 126 à 390)
Densité apparente (kg/m^3)	2276 (de 2098 à 2336)
Porosité (%)	14,5% (de 12,5 à 17)
Vitesse de propagation du son (m/s)	3185 (de 2532 à 3617)
Largeur de rayure (en mm)	1,196 (de 0,9 à 1,45)
Coefficient d'absorption moyen	0,56

Porosimétrie mercure	Lérouville 1 a/	Lérouville 1 a/	Lérouville b/	Euville b/
Porosité totale	11%	18%	15,6%	11,8%
Porosité piégée	6%	5,4%	9,7%	8%
Rapport P. piégée/ P. totale	54,5%	27,5%	62,2%	67,8%

Tab. 16 : Caractéristiques pétrophysiques des Entroquites de la Meuse, d'après Noël, 1970 ; Bousquié, 1979 et Rémy, 1993

La porosité de la Pierre d'Euville - Lérouville est modérée (Bousquié, 1979 ; Rémy, 1993), elle représente environ 15% du volume totale de la roche, ce qui est faible comparé aux autres roches étudiées. En effet, le Calcaire à débris, l'Oolithe vacuolaire et le Calcaire grossier ont fréquemment une porosité totale supérieure à 30%.

La part de la porosité piégée est très importante, puisqu'elle représente plus de 50% de la porosité totale, enfin, la résistance à la compression de ces calcaires est supérieure à celle de la Pierre de Savonnières (115 kg/cm^3) ou à celle de la plupart des calcaires lutétiens du centre du bassin de Paris.

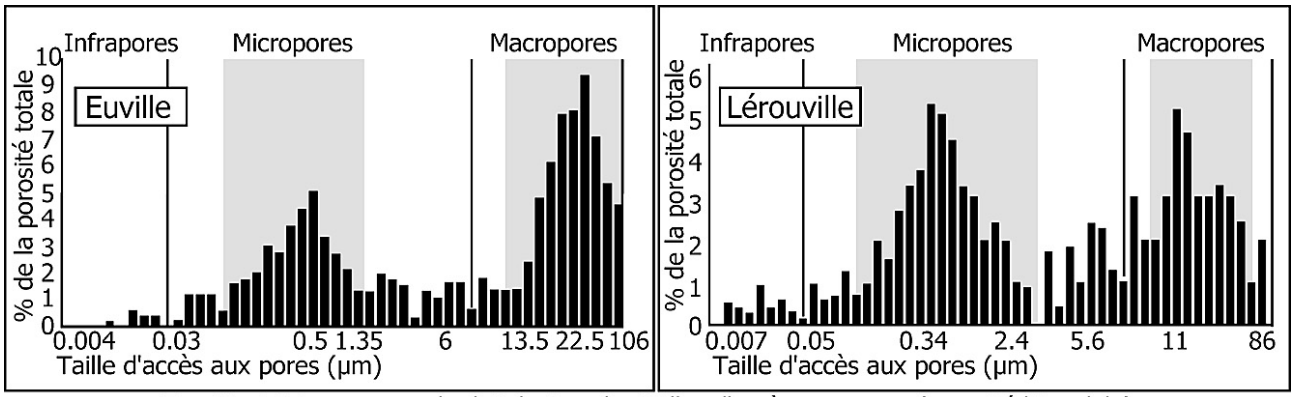


Fig. 52 : Histogrammes de distribution des tailles d'accès aux pores (porosité bimodale)
Pierres d'Euville et de Lérouville, Entroquites de la Meuse, Porosimétrie mercure d'après Rémy, 1993

La répartition de la taille d'accès aux pores mesurée par porosimétrie mercure est très nettement bimodale (Fig. 52, d'après Rémy, 1993). La microporosité (entre 0,05 et 7,5 µm) représente environ 25% de la porosité totale de la Pierre d'Euville (soit environ 5% du volume de la roche), mais pour la Pierre de Lérouville, cette microporosité est plus importante et correspond à la moitié de la porosité totale. L'autre classe importante de porosité est représentée par des macropores dont la taille d'accès moyenne est de 30-40 µm. Une infraporosité est mesurée (dont la taille moyenne d'accès aux pores est inférieure à 0,05 µm), mais elle ne représente qu'environ 5% de la porosité totale, soit moins de 1% du volume de la roche.

Les propriétés capillaires des Pierres d'Euville – Lérouville (Tab. 17) sont relativement faibles, avec des indices d'absorption inférieurs de moitié au Calcaire à débris, qui est composé, lui aussi, d'éléments d'échinodermes.

Le coefficient de saturation en eau de la porosité est très faible, puisqu'il se situe en moyenne à 0.6 (soit 60%), ce qui est même inférieur à la valeur de saturation de l'Oolithe vacuolaire (voir page 74). Ce coefficient de saturation très faible et l'importante macroporosité expliquent en partie la forte résistance au gel de la pierre d'Euville et son utilisation dans un très grand nombre de soubassements de bâtiment de Champagne-Ardenne.

		Porosité totale %	SR %	A (g / $cm^2H^{1/2}$)	B (cm / $H^{1/2}$)
Lérouville	Bousquié,	11,2	56	0,13	2,3
Lérouville	Bousquié,	16,4	69	0,32	4,4

		Porosité totale %	SR %	A (g / cm^2 $mn^{1/2}$)	B (cm / $mn^{1/2}$)
Lérouville	Rémy, 1993	15,6	58	0,033	0,35
Euville	Rémy, 1993	13,7	52	0,035	0,38

Tab. n°17 : Prise en eau par capillarité d'après Bousquié, 1979 et Rémy, 1993
A = volume d'eau absorbée par cm2 et par unité de temps, B = hauteur atteinte au cours du temps
SR : Degré de saturation de la porosité.

Aptitudes d'emploi

Les différentes appellations de pierres à bâtir provenant des Entroquites de la Meuse ont des aptitudes d'emploi très étendues, quel que soit le climat considéré : d'alpin à séquanien (Tab. 18 et Fig. 53). Les constructions de la vallée de la Meuse entre Toul et Verdun sont parfois entièrement construites avec ce calcaires à entroques, et nous signalons d'ailleurs, comme d'autres auteurs, la qualité de la mairie d'Euville, entièrement construite avec la pierre locale (Hilly *in* Pomerol, 1992). Théoriquement, la Pierre d'Euville peut donc être utilisée dans toutes les positions architecturales : du soubassement à la corniche et en passant par les assises de rejaillissement et le dallage (pour l'Euville Marbrier) : Tab. 18 et Fig. 53.

Dans la région étudiée, nous n'avons pas observé de constructions érigées uniquement en Entroquite, en effet, ces pierres de taille ne sont utilisées que sur 1 ou 2 niveaux de blocs à la base des murs. Cette utilisation pour les soubassements peut s'expliquer par le fait qu'aucune des trois pierres régionales (le Calcaire à débris, l'Oolithe vacuolaire et le Calcaire grossier type Courville), ne se prête à une utilisation dans cette position architecturale. De plus, un effet de mode et de style architectural s'est certainement ajouté à cette particularité, puisque les constructions auxquelles s'adresse cette remarque datent principalement d'une époque située entre 1850 et 1945, période où la Pierre d'Euville étaient considérée comme une des plus prestigieuses pierres de taille française (Paris hausmanien). L'utilisation des Entroquites de la Meuse dans d'autres positions architectu-

rales est très rare, à Reims, nous avons seulement observé quelques utilisations pour l'élévation de murs (recyclage de petits blocs) ou dans des angles de bâtiments.

L'Euville marbrier présente un aspect plein et un éclat spathique prononcé car la cimentation syntaxiale obture presque toute la porosité intergranulaire. C'est pourquoi cette appellation peut être utilisée en sculpture ou en dallage (Tab. 18), même si elle ne prend quasiment pas de poli. L'Euville construction est moins cimenté et plus poreux, il ne peut être utilisé en dallage car il se trouve en zone 2 d'utilisation (Fig. 53), mais offre encore des possibilités d'utilisation très étendues.

Aptitude d'emploi	Euville construction	Euville marbrier
Rez-de-chaussée / Elévation	Oui	Oui
Bandeau / Corniche	Oui	Oui
Rejaillissement	Oui	Oui
Elévation sous saillie	Oui	Oui
Revêtement	Oui	Oui
Balcon	Oui	Oui
Soubassement	Oui	Oui
Socle	Oui	Oui
Pile en rivière	Oui	Oui
Dallage	**Non**	Oui
Gargouille	? ? ?	? ? ?

Tab. n°18 : Aptitudes d'emploi de l'Euville roche et de l'Euville marbrier (Noël, 1970)

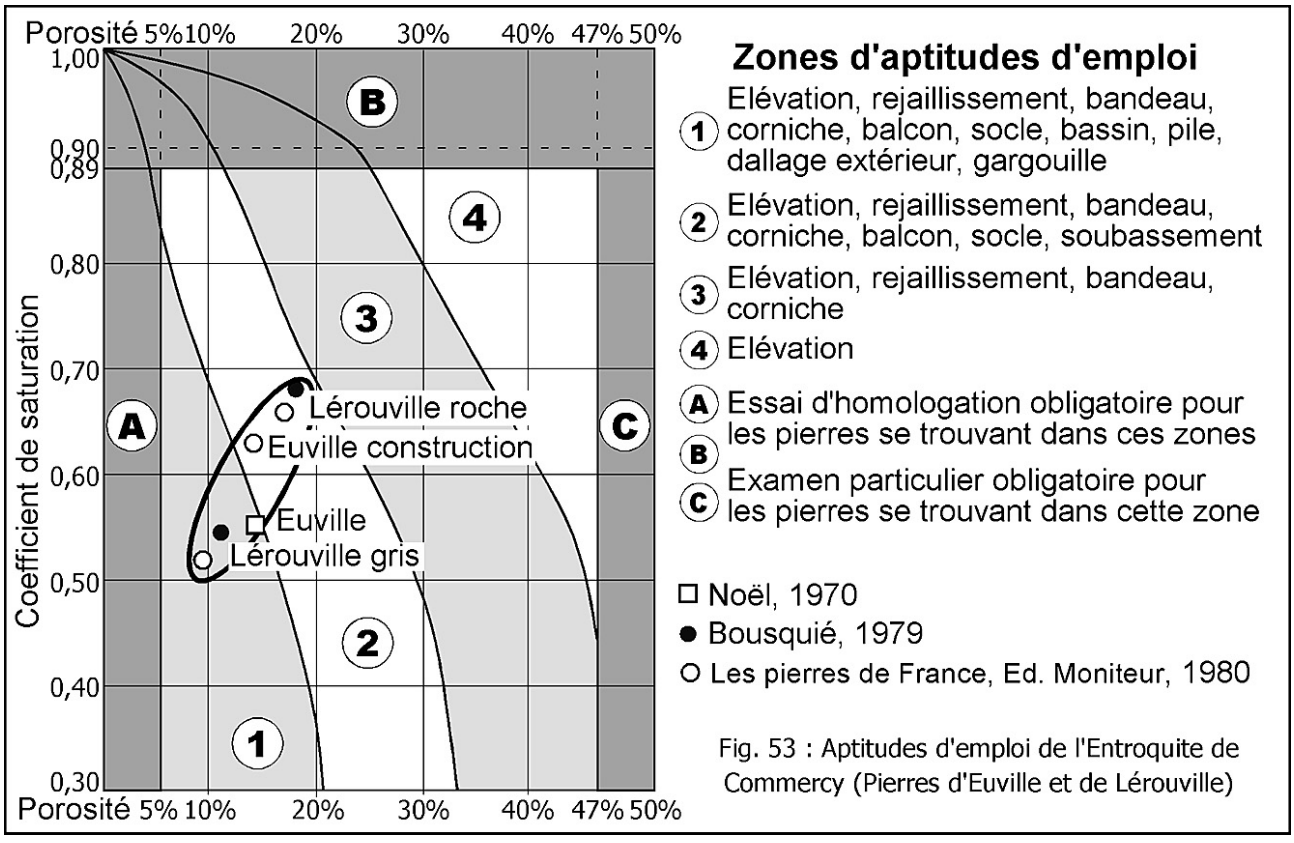


Fig. 53 : Aptitudes d'emploi de l'Entroquite de Commercy (Pierres d'Euville et de Lérouville)

Analyse microfaciologique

Les Entroquites de la « Formation récifale de Meuse » sont, comme leur nom l'indique, principalement composées d'articles de crinoïdes. Les entroques sont de grande taille (généralement de 0,5 à 2 millimètres de long), à la différence des éléments d'échinodermes du « Calcaire à débris » du Bajocien moyen ardennais (Pierre de Dom-le-Mesnil, microfaciès type 1). La couleur blanche et l'éclat brillant du calcaire (dit éclat spathique) sont liés au clivage net de la calcite monocristalline qui compose les ciments syntaxiaux et les entroques.

Les ciments composent une grande partie du calcaire et obturent presque totalement l'espace intergranulaire. Il s'agit de la phase de liaison principale, même si on observe parfois la présence d'un ciment palissadique sparitique. La texture de ce calcaire est donc typiquement grainstone et il s'agit du plus bel exemple de biosparite à entroques du bassin de Paris (Fig. 54). L'autre particularité de ce microfaciès est la grande taille des éléments, qui mesurent généralement plus d'un millimètre de long. Certaines variétés, comme celle dite du Moulin-à-vent (du nom de la carrière d'où elle provenait), comprennent des radioles entiers d'oursins, de plus de 2 centimètres de long.

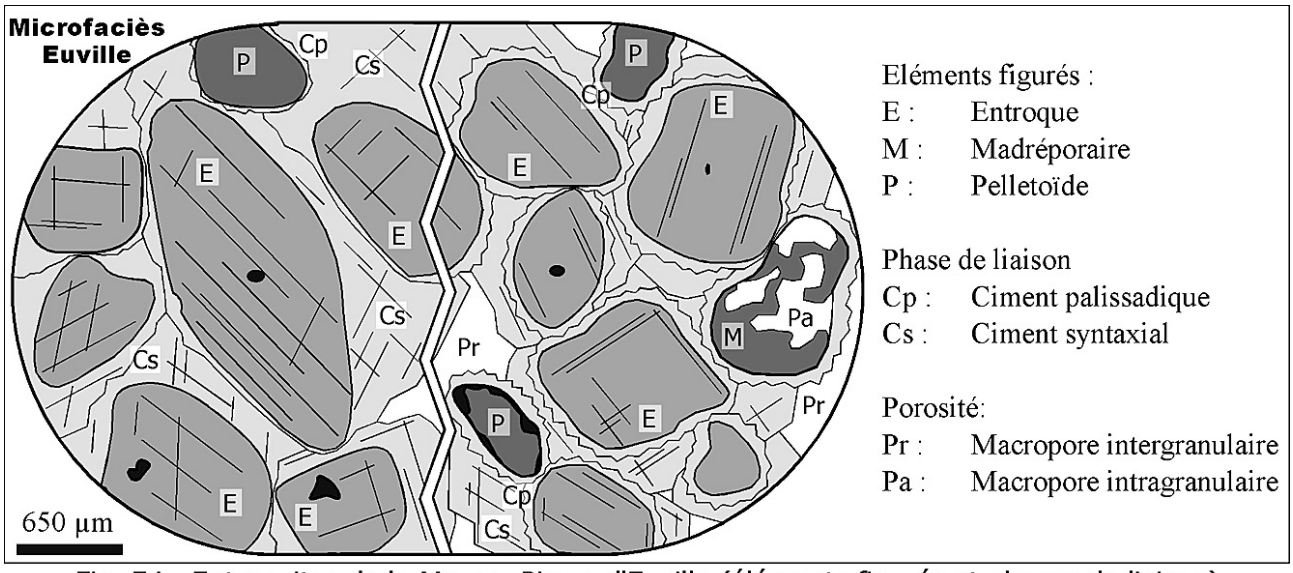


Fig. 54 : Entroquites de la Meuse, Pierre d'Euville (éléments figurés et phases de liaison)
Microfaciès à ciment syntaxial seul ou à ciment palissadique et ciment syntaxial

La variabilité des microfaciès d'Entroquites s'organise autour de deux facteurs, l'un sédimentaire : le tri de éléments, l'autre diagénétique : la nature et le développement de la phase de liaison (Fig. 54). En effet, suivant les bancs, le calcaire contient uniquement des entroques : Euville marbrier ou des entroques mélangés à d'autres débris organiques (et plus particulièrement des coraux) : Euville construction. Dans d'autres niveaux, la roche contient des oolithes et des entroques mélangées, parfois même, elle sera plus oolithique que bioclasti-

que comme pour les bancs dits de Gévaux. Pour ces différents microfaciès, plus ou moins homogènes, l'importance des ciments syntaxiaux est directement proportionnelle à la quantité d'entroques contenus.

Les grand macropores détectés par porosimétrie mercure (Fig. 52) correspondent principalement aux macropores intergranulaires résiduels liés à l'obturation partielle de l'espace poreux par les ciments syntaxiaux (Pr de la figure 54) ; alors que les micropores et les infrapores sont plutôt des pores intragranulaires ou situés dans l'auréole de micritisation de la périphérie des éléments (Rémy, 1993). Quand le faciès contient de nombreux éléments micritiques plus ou moins dissous ou des débris de madréporaires, cette porosité d'ordre inférieur peut être importante, alors qu'elle sera très limitée si le faciès ne contient que des débris de crinoïdes (voir microfaciès de référence à entroques seuls et ciments syntaxiaux, Fig. 54)

Les Pierres d'Euville et de Lérouville sont des calcaires à entroques, et plus précisément des entroquites puisque le faciès de référence est composé à plus de 75% par les fragments d'échinodermes et les ciments syntaxiaux qui leur sont liés.

Il existe quelques microfaciès plus hétérogènes où les éléments d'échinodermes (crinoïdes et oursins) sont accompagnés d'autres éléments. Par exemple des débris de madréporaires, plus ou moins recristallisés et parfois dissous, dont la présence est à relier au contexte inter-récifal du dépôt de la Pierre d'Euville. Les bancs à tendance oolithique ne sont pas exploités sous le nom de Pierre d'Euville, mais sous le nom de Gévaux et nous ne les prendrons pas en compte dans cette étude.

Les propriétés pétrophysiques des Entroquites de Meuse montrent qu'il s'agit de calcaires assez peu poreux (15% de porosité totale moyenne) et dont les propriétés capillaires sont très faibles.

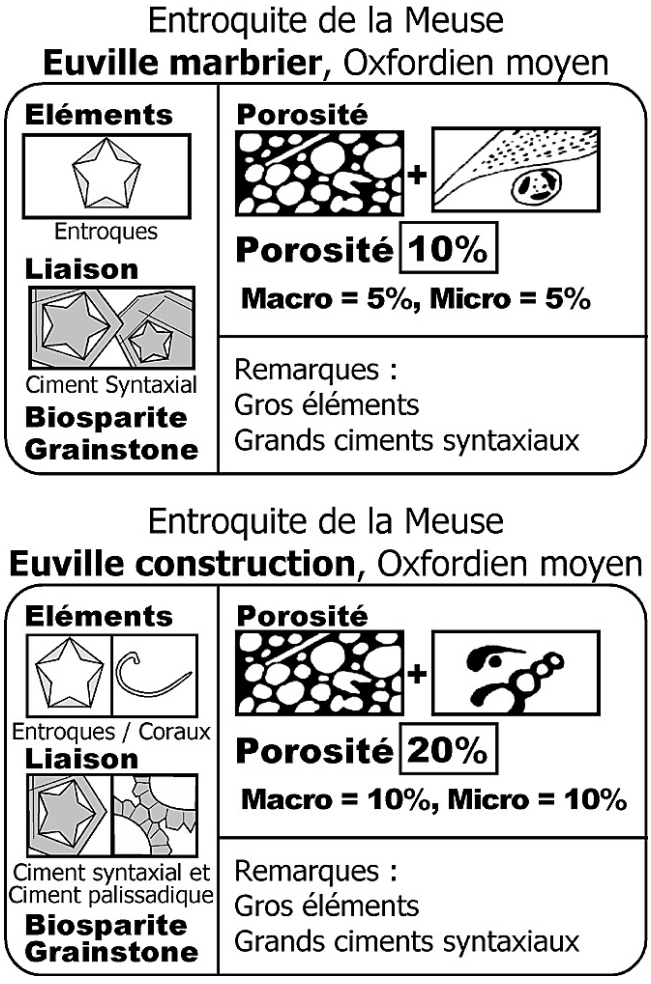


Fig. 55 : Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des microfaciès de Pierre d'Euville

Ces faciès sont donc nettement moins poreux et plus résistants au gel que le Calcaire à débris ou que le Calcaire Grossier de type Courville. Cette très bonne durabilité en œuvre explique donc en partie leur utilisation dans les soubassements de très nombreux bâtiments de Champagne-Ardenne (et particulièrement à Reims).

b/ Autres Pierres, citées à titre de comparaison

1 : Les calcaires dévoniens de l'Ardenne

La vallée de la Meuse ardennaise entre Chooz et Givet traverse les séries carbonatées du Dévonien. Ces formations sont bioclastiques et contiennent une grande diversité de faciès. Elles résultent du comblement d'un petit bassin sédimentaire par la progradation d'une plate-forme carbonatée riche en bioconstructions coralliennes (Préat et Kasimi ; 1995 ; Kasimi et Préat, 1996). Divers faciès ont été exploités pour la construction, certains sont très fins, composés d'un mudstone / wackestone de couleur quasiment noire, d'autres, de couleur brune ou gris-bleuté, sont plus granulaires et contiennent de nombreux bioclastes.

L'inventaire des pierres à bâtir de Wallonie (DRGN collectif, 1995) distingue deux types de Calcaires givétiens et indique avec raison qu'il est souvent difficile de les différencier des calcaires frasniens. Il distingue des faciès dits « de la Calestienne » très fossilifères et bien cristallisés, d'autres dits « de la vallée de l'Orneau » avec des bancs moins épais et quelques traces de bioturbation.

Les deux particularités des ces calcaires sont leur très faible porosité et la présence de veines de calcite, qui sont principalement des cristallisations secondaires dans des fentes de tension d'origine tectonique. En effet, la longue histoire diagénétique de ces calcaires depuis le Dévonien moyen a enregistré de nombreuses phases tectoniques et un enfouissement profond. Les Calcaires givétiens ont des microfaciès « matures », très compacts et peu altérables. Selon les bancs, ils peuvent présenter une certaine gélivité mais ils seront peu sensibles à la pollution atmosphérique (DRGN collectif, 1995).

Nous ne considérerons ici que les calcaires gris-bleuté, parfois noirs, à débris de madréporaires et coquilles recristallisées (dont des stringocéphales) et nous ne distinguerons pas les différentes provenances.

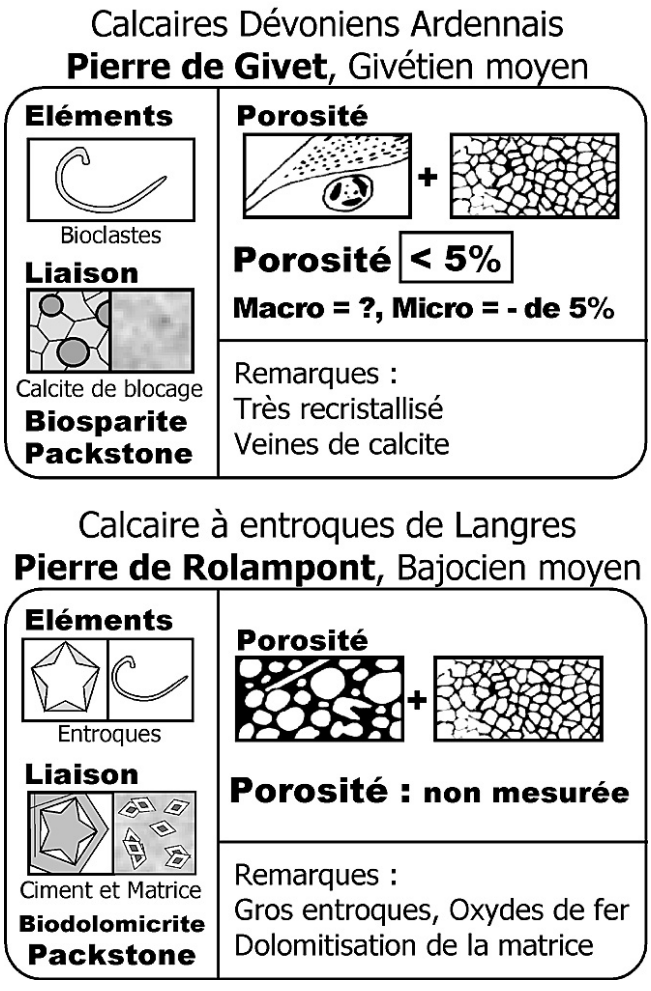


Fig. 56 : Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des Pierres de Givet et de Langres

Nous désignerons ainsi sous le nom de Pierre de Givet l'ensemble de ces calcaires bioclastiques très peu poreux (Fig. 56). Et nous différencierons parfois la Pierre brune (ou bleue), riche en éléments recristallisés et la Pierre noire qui ne contient quasiment pas d'éléments.

Ces calcaires ont des aptitudes d'utilisation très larges, ils sont massivement utilisés dans le Nord des Ardennes, au dessus de Revin et dans les Ardennes belges, où ils sont mis en œuvre dans toutes les positions architecturales. Entre Givet et Charleville-Mézières, leur utilisation est décroissante, car ils sont progressivement remplacés par le Calcaire à débris, mais on peut encore les rencontrer dans les élévations de mur alors que ce n'est plus le cas au Sud de Charleville-Mézières. Enfin, hors du département des Ardennes, les calcaires givétiens (et assimilés) sont utilisés pour construire les trottoirs pavés : ainsi à Reims, la Pierre noire est utilisée comme bordure externe de trottoirs (blocs de longueur métrique) alors que la Pierre brune ne se retrouve qu'en dallages (petits pavés de largeur inférieure à 20 centimètres).

2 : Le Calcaire à entroques de Langres

Ce calcaire brun roux qui date du Bajocien Moyen provient des environs de Langres : Rolampont au Nord, Balesmes et les sources de la Marne au Sud, St-Ciergues à l'Ouest. Les faciès variés généralement bioclastiques ont été très précisément étudiés par Durlet (Durlet, 1992, 1996a, 1996b et 1997). Les microfaciès sont principalement crinoïdiques, les entroques représentent plus de la moitié des éléments contenus et sont accompagnés d'autres bioclastes, en particulier des bryozoaires. La texture la plus commune est de type packstone avec des éléments de grande taille (Fig. 56). On peut remarquer que les entroques ont une dimension équivalente à ceux des Entroquites de la Meuse : ces calcaires sont donc plus proches des Calcaires à entroques de Commercy que du Calcaire à débris de Dom-le-Mesnil. Alors que la Pierre de Langres et la Pierre de Dom proviennent toutes deux de formation datant du Bajocien moyen et que les Entroquites de la Meuse datent de l'Oxfordien.

L'autre principale caractéristique de ce faciès est la présence de dolomitisation, qui affecte parfois presque toute la matrice micritique. De plus, le calcaire est riche en oxydes de fer, ce qui lui donne une teinte brune à jaune ocre que nous avions déjà remarquée dans les autres calcaires du Bajocien moyen cités : Pierre de Dom, de Jaumont ou Pierre de Grandcourt en Wallonie.

Nous ne possédons de données ni sur la porosité, ni sur les aptitudes d'emploi des calcaires à entroques dits de Langres. Mais en examinant les diverses constructions de la région, nous pouvons constater que ces calcaires sont utilisés dans toutes les positions architecturales y compris en soubassement, le plus bel exemple étant les remparts de Langres et la vieille ville qu'ils entourent.

3 : Les calcaires micritiques du Barrois

Ce terme regroupe diverses formations calcaires du Jurassique de l'Aube et de la Haute-Marne. Il est normalement réservé aux calcaires à dominante micritique du Jurassique supérieur (Salin, 1935), mais il est aussi parfois appliqué aux calcaires oolithiques micritiques du Bathonien (comme la Pierre d'Arc-en-Barrois). Dans ce travail, nous n'utiliserons ce terme que pour désigner les calcaires micritiques (oolithiques ou sublithographiques) du Jurassique supérieur affleurant vers Bar-sur-Aube, Gudmont ou Joinville.

« L'Oolithe de Bure », du Tithonique, fut particulièrement exploitée entre Bar-le-Duc et la Vallée de la Meuse, c'est à dire entre l'Oolithe vacuolaire et les Entroquites de Commercy. De plus, à Dammarie-sur-Saulx, Buvigner (1854) signale une unité appartenant aux « Calcaires tubuleux », qui mesure près de 2 mètres d'épaisseur et fournissais des moellons de très bonne qualité, organisée sur 5 bancs de 20 à 60 centimètres de puissance.

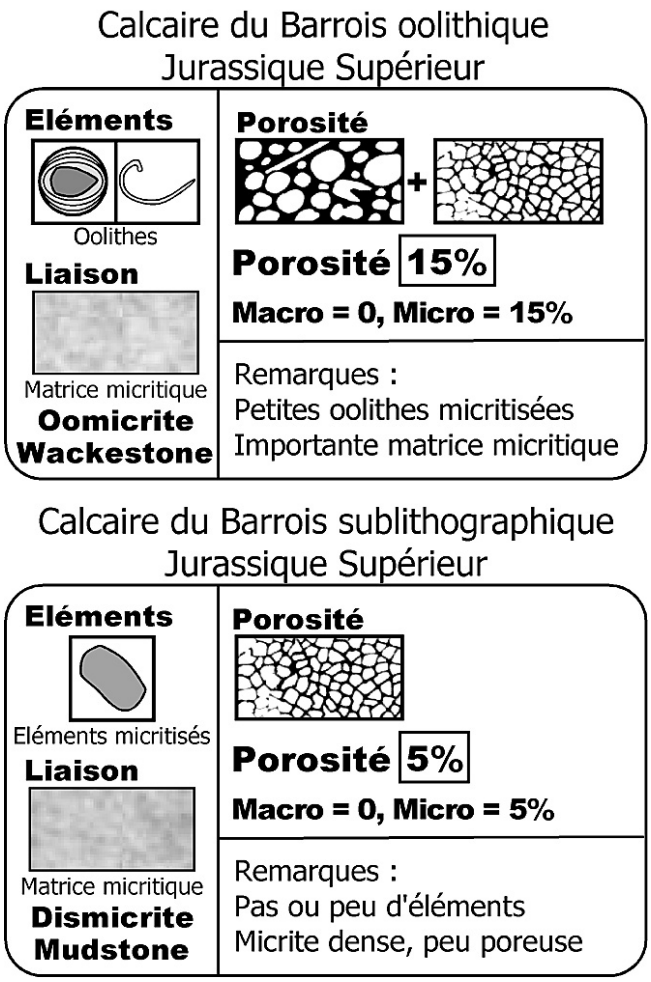


Fig. 57 : Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des microfaciès du Calcaires du Barrois

Buvigner précise que ces carrières fournissaient des pierres, parfois gélives, pour les constructions ordinaires, alors que les bâtiments plus importants étaient construits en Oolithe vacuolaire.

Les calcaires micritiques du Barrois comprennent aussi les calcaires sublithographiques qui reposent sur la formation à *Exogyra virgula* du Kimmeridgien (de Brétizel, 1962 ; Bernard, 1988). Ils forment une unité lithologique homogène d'une épaisseur de 20 à 30 mètres. Ils sont organisés en bancs nettement lités peu épais : entre 20 et 30 centimètres d'épaisseur, constitués de calcaires à matrice micritique avec très peu à pas d'éléments figurés. Ils correspondent à une dismicrite selon la classification de Folk (1969, 1962) et à une texture mudstone selon la classification de Dunham. Les calcaires micritiques du Barrois été localement utilisés comme pierre à bâtir, le litage sédimentaire marqué servant à dissocier des blocs par ailleurs difficiles à tailler.

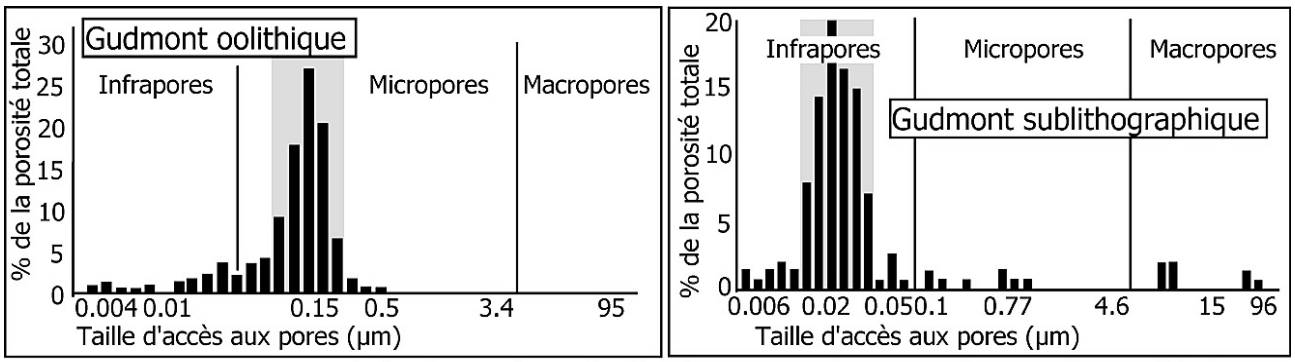


Fig. 58 : Histogrammes de distribution des tailles d'accès aux pores (micro et infraporosité unimodales)
Pierres de Gudmont : Calcaire du Barrois oolithique ou sublithographique, d'après Rémy, 1993

Rémy (1993), a étudié divers échantillons de la Pierre de Gudmont, provenant d'une formation micritique oolithique de l'Oxfordien de la Haute-Marne. Elle contient les deux types (oolithique et sublithographique) des calcaires micritiques du Barrois. Cette Pierre peut être observée en œuvre de façon locale entre Joinville et Chaumont. Les analyses de porosité par porosimétrie mercure montrent que le réseau poreux de l'oomicrite est principalement constitué de micropores (Fig. 58), alors que celui du calcaire sublithographique est plutôt constitué d'infrapores : taille d'accès aux pores inférieure à 0,1µm. Quantitativement, les porosités ne sont pas très élevées (respectivement 15 et 5%), mais la part de la porosité piégée est très importante : par exemple, elle représente 95% de la porosité totale des calcaires sublithographiques (non représentée figure 58).

Les calcaires micritiques du Barrois ont une utilisation locale et ne sont pas de très bonnes pierres à bâtir, même si les meilleurs bancs ont été utilisés dans quelques monuments : Abbayes cisterciennes de Clairvaux et de Trois-Fontaines (Deroin, 1990). Ils sont généralement gélifs, ce qui explique que les habitations de la région soient fréquemment recouvertes par un enduit protecteur.

4 : Les calcaires oolithiques Dijonnais

Le nom de Pierre de Dijon est actuellement peu utilisé, mais il convient parfaitement pour décrire les calcaires oolithiques brun-doré utilisés dans la plupart des monuments de la capitale de la Bourgogne (Rat, 1994). Ces calcaires furent extraits de nombreuses carrières, maintenant comblées, transformées en espaces verts (Parc des carrières Bacquin) ou gagnées par la croissance urbaine (ville de Talant).

Stratigraphiquement, la Pierre de Dijon date du Bathonien supérieur - Callovien inférieur, avec la distinction de deux unités : les bancs inférieurs sont distingués par les stratigraphes sous le nom de Pierre de Dijon-Corton alors que l'unité supérieure est nommée pierre de Ladoix. Mais il s'agit d'une désignation récente (Floquet *et al. ;* 1989, Laville *et al.*, 1989) sans rapport avec des appellations de Pierre de taille. Les deux unités lithologiques sont relativement semblables, même si le « Calcaire de Ladoix » ou « Dalle nacrée » est constitué de bancs plus marqués et moins épais que ceux de l'unité inférieure. De plus, dans l'unité inférieure, les inter-

bancs marneux sont peu nombreux et localisés (deux niveaux principaux : les marnes à *Eudesia* et les marnes à digonelles), alors que dans l'unité supérieure, les banc marneux sont plus importants et le calcaire présente un débit en plaquettes marqué. (Javaux, 1992 ; Garcia, 1992 ; Rat, 1994).

Nous distinguerons donc deux qualités de Pierre de Dijon, la première issue de l'unité inférieure sera constituée de blocs massifs, épais et compacts (épaisseur de l'unité : 6-7 mètres, en bancs d'environ 50 centimètres d'épaisseur). Les litages y sont peu marqués et les stylolithes sédimentaires sans argile résiduelle. La seconde, issue des bancs de l'unité supérieure, qui renferme des litages obliques très nets et aura tendance à se séparer en plaquettes peu épaisses (parfois moins de 10 centimètres d'épaisseur).

Ces calcaires quasiment purs (près de 99% de $CaCO_3$) ont un faciès homogène à grande échelle, même s'il présente une forte structuration sédimentaire : litages obliques, discontinuités et stylolithes sédimentaires horizontaux. Par contre, le microfaciès est très diversifié puisqu'il contient des oolithes très bien conservées mais aussi de nombreux types de bioclastes : débris de bryozoaires, de lamellibranches, d'échinodermes, de brachiopodes, de madréporaires, de gastéropodes etc…

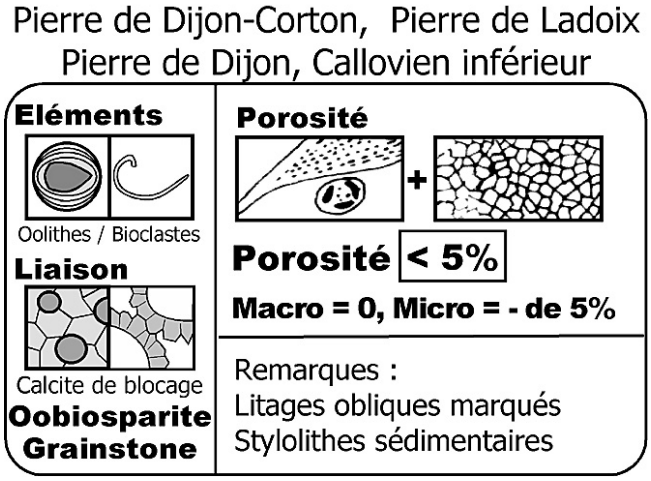


Fig. 59 : Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques de la Pierre de Dijon

Dans l'ensemble, ces calcaires oobioclastiques sont très compacts car ils sont fortement cimentés. En effet, au ciment précoce palissadique qui entoure tous les éléments s'ajoute une calcite de blocage qui obture la porosité intergranulaire ainsi que les macropores intragranulaires. La Pierre de Dijon est donc un calcaire très peu poreux, à macroporosité quasiment nulle et à microporosité réduite.

Enfin, notons que certains bancs contiennent des argiles, soit en lits très minces qui soulignent le litage sédimentaire (généralement oblique), soit en remplissage résiduel des stylolithes sédimentaires (lits alors horizontaux et plans).

Les aptitudes d'emploi de la Pierre de Dijon sont très larges (Rat, 1992a, 1992b et 1994). Cette Pierre donne les voûtes de nombreuses caves dijonnaises (moellons bruts) et elle se retrouve à toutes les positions architecturales des constructions, en particulier dans les hôtels particuliers du centre ville historique. Les bancs à débits en plaquettes de l'unité supérieure étaient même utilisés en tant que laves afin de couvrir certains bâtiments, de la même façon que les bancs de « Cliquart » du Calcaire grossier (Tourtebatte, 1995).

Planches :

- A/ Principaux microfaciès du Calcaire à débris et du Calcaire grossier
- B/ Principaux microfaciès de l'Oolithe vacuolaire

Planche A
Principaux microfaciès du Calcaire à débris et du Calcaire grossier

1/ Microfaciès de référence du Calcaire à débris

microfaciès de type 1, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LN
biosparite à échinodermes et débris de lamellibranches, grainstone
a/ Macropore intergranulaire
b/ Débris d'échinoderme
c/ Ciment syntaxial lié à la présence des debris d'échinodermes

2/ Microfaciès très macroporeux (Calcaire à débris, microfaciès type 2)

microfaciès de type 2, objectif *40, barre de référence = 400 µm , LN
biosparite à échinodermes et débris de lamellibranches, grainstone

3/ Microfaciès compact (Calcaire à débris, microfaciès type 3)

microfaciès de type 3, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LN
biosparite à échinodermes et débris de lamellibranches, grainstone
microfaciès peu poreux, ne se rencontrant qu'au sommet de la formation
d/ Macropore intragranulaire

4/ Pierre de Jaumont (microfaciès de référence)

objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
oobiosparite, grainstone
Pierre de substitution du Calcaire à débris, Bajocien de Lorraine
e/ Ciment palissadique précoce

5/ Liais de Courville (microfaciès de référence)

objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
biomicrite à foraminifères, packstone
f/ Milioles (triloculine et quinqueloculine)
G/ Fragment *d'Orbitolites complanatus*
ms/ matrice micritique partiellement recristallisée (microsparite)

6/ Calcaire à cérithes (microfaciès de référence)

objectif *40, barre de référence = 400 µm, LN
biomicrite quartzeuse à cérithes et Milioles, wackestone à packstone
h/ grains de quartz détritiques
m/ matrice micritique peu à pas recristallisée (micrite sombre)

7/ Calcaire à Ditrupa (microfaciès de référence)

objectif *12.5, barre de référence = 1.3 mm, LN
biomicrosparite à Ditrupa et Milioles, packstone à grainstone
i/ sections de tube de *Ditrupa strangulata*

8/ Pierre de Saint-Leu (microfaciès de référence)

objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
pelbiomicrosparite à foraminifères, grainstone
p/ Pelletoïdes et éléments micritisés avec frange recristallisée en microsparite

Planche B
Principaux microfaciès de l'Oolithe vacuolaire

1/ Microfaciès de référence de l'Oolithe vacuolaire

microfaciès de type 1a, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité inter et intragranulaire
a/ Macropore intergranulaire
b/ Macropore moldique intragranulaire

2/ Microfaciès bioclastique de l'Oolithe vacuolaire (fromentelle)

microfaciès de type 2a, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Biosparite, grainstone, à forte porosité inter et intragranulaire

3/ Microfaciès à nucleus conservés

microfaciès de type 3b, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oopelsparite, grainstone, à forte porosité intergranulaire et microporosité intragranulaire

4/ Microfaciès à gros lithoclastes micritiques

microfaciès de type 4, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite à lithoclastes, grainstone, à forte porosité intergranulaire
c/ lithoclaste micritique

5/ Microfaciès compacté du sommet de l'Oolithe vacuolaire

microfaciès de type 5c, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité inter et intragranulaire
d/ Oolithe préservée à nucleus non dissous
e/ Oolithe écrasée

6/ Microfaciès totalement dolomitisé

microfaciès de type 6c, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oodolosparite, grainstone, à très forte macroporosité
f/ cristaux de dolosparite qui ont remplacé la calcite des oolithes et des ciments

7/ Oolithe vacuolaire : variété à Milioles

microfaciès de Combles-en-Barrois, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité intergranulaire
g/ Miliole en nucleus d'oolithes de type β
h/ ciment syntaxial lié à la présence d'un débris d'échinoderme dans le nucleus d'une oolite

8/ Oolithe vacuolaire : variété à cimentation sparitique secondaire (Pierre de Chévillon)

microfaciès de Chévillon, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité intragranulaire et à porosité intergranulaire réduite
i/ Phase de cimentation secondaire (sparite drusique de « blocage ») obturant presque totalement la macroporosité intergranulaire.

Chapitre 2 :

Modes d'altération des calcaires étudiés

- Altération du Calcaire à débris
- Altération de l'Oolithe vacuolaire
- Altération du Calcaire grossier
- Altération des Entroquites de la Meuse
- Autres calcaires (cités à titre de comparaison)

CHAPITRE 2 : Modes d'altération des calcaires étudiés

Généralités

Dans ce chapitre, nous décrirons les différentes altérations observées en œuvre ou à l'affleurement (in-situ) de tous les calcaires décrits précédemment. Pour chacun de ces groupes de pierres à bâtir, nous classerons les observations selon la morphologie macroscopique des altérations en différenciant :

1/ encroûtement et patine se formant à la surface des blocs ;

2/ dissolution : généralisée à toute la surface ou localisée : ravinements ;

3/ desquamation : débit en mille-feuilles ou en plaques : exfoliations ;

4/ désagrégation : perte d'éléments ou de petits groupes d'éléments (ordre centimétrique et inférieur) ;

5/ fragmentation : perte d'une partie d'un bloc (débris d'ordre centimétrique et supérieur).

Mais nous tenterons aussi de mettre en évidence les différents processus à l'origine de ces altérations : fissuration, recristallisations et cristallisations de sels, encroûtements biologiques, etc…

De plus, nous reconstituerons les stades d'évolution des altérations observées à l'échelle macroscopique et microscopique, en montrant les éventuelles relations entre la nature des calcaires mis en œuvre et les altérations développées. Enfin, pour chaque type de calcaire, nous classerons les caractéristiques du faciès ou du microfaciès selon leur impact sur le comportement en œuvre de la roche.

1/ Altération du Calcaire à débris :

Généralités :

Altération in-situ :

L'altération in-situ du Calcaire à débris peut s'observer dans les carrières de la Côte de Dom abandonnées depuis de nombreuses années et envahies par la végétation. Quand les fronts de taille sont encore visibles, ils présentent en surface une patine rousse à rouge-sombre, macroscopiquement homogène (Fig. 60). De plus, les zones abritées de la pluie présentent une pellicule superficielle fragile qui tend à se détacher de la paroi, au moindre choc. Cette désagrégation généralisée de la surface s'observe aussi dans quelques zones soumises à l'action de la pluie battante mais exposées depuis une longue période. L'altération affecte alors une épaisseur de roche moins importante : quelques centimètres maximum (Fig. 63).

Enfin, une désagrégation alvéolaire localisée à certains litages obliques s'observe sur les fronts de taille verticaux exposés à la pluie, elle est identique à l'altération développée par le Calcaire à débris en œuvre (voir ci-dessous).

Altération en œuvre :

Les traces de dissolution sont rares, car pour le Calcaire à débris, une légère dissolution du ciment syntaxial correspond à une désolidarisation des éléments et l'altération évolue rapidement en désagrégation. Quelques ravinements ont été observés, mais toujours en relation avec une circulation d'eau anormalement importante, par exemple une gouttière défectueuse.

Les desquamations sont fréquentes et de natures diverses, elles sont généralement liées aux microclimats d'exposition (bloc en bandeau ou en saillie, en soubassement, nombreux angles…). Mais parfois, la desquamation se forme au centre des blocs et prend la forme de « gerçures » allongées selon les litages entrecroisés (Fig. 62).

L'altération la plus fréquente apparaît sur des blocs exposés à la pluie, qu'ils soient en milieu rural, urbain ou in-situ. Le Calcaire à débris présente alors une désagrégation alvéolaire localisée à certains litages qui sont très nettement surcreusés par rapport au reste du bloc. Les alvéoles sont allongées et limitées par les litages obliques du calcaire, elles sont profondes et irrégulièrement réparties à la surface du bloc. Dans certains cas, la désagrégation creuse la roche sur plus de 5 centimètres de profondeur (Fig. 62 et 64).

Les véritables altérations de type fragmentation sont rares et semblent liées à l'accumulation de différents facteurs, par exemple : la mise en œuvre d'un bloc très lité dont la désagrégation individualise de petits litages plus résistants, qui se détacheront alors de la paroi (stade 4, Fig. 64).

Les encroûtements sont nettement liés au microclimat d'exposition et à la pollution atmosphérique. Dans certaines conditions, ils peuvent recouvrir totalement le Calcaire à débris. Les encroûtements sont soit peu épais, très cohérents, avec une tendance à se desquamer, soit intimement liés à la roche et participant à sa pulvérulence (Fig. 67).

Enfin, signalons l'importance des remontées capillaires à la base des habitations entièrement construites en Calcaire à débris (à Dom-le-Mesnil ou Hannogne-saint-Martin). Elles atteignent fréquemment plus d'un mètre de haut et sont surmontées d'une bande d'efflorescences salines, parfois soulignée par des oxydes de fer.

Description des altérations :

Patine :

La teinte sombre du Calcaire à débris mis à l'affleurement est due à la formation d'une couche de patine à la surface du calcaire, patine qui correspond à une fine couche d'oxydes et d'hydroxydes de fer. Le fer disséminé dans le calcaire (teneur d'environ 5000 ppm dans la phase carbonatée), il est transportés lors de la migration des fluides par capillarité et il se dépose dans les zones d'évaporation : les patines sont bien liées à *l'accumulation d'oxydes de fer* par circulations de fluides (Jeannette, 1992a).

Sur un bloc de Calcaire à débris exposé à l'air libre, les patines d'oxydes de fer ne se développent que sur une faible épaisseur. En effet, la désolidarisation progressive des éléments situés en surface (par *dissolution* ou *microfissuration*) provoque le recul de la surface du bloc. Les éléments érodés lors de cette désagrégation superficielle progressive entraînent avec eux la patine déjà formée ou en développement.

Dans les blocs mis en œuvre en milieu urbain, les patines sont rares voire totalement absentes, elles sont généralement peu épaisses (moins de 500µm d'épaisseur) et discontinues. Elles s'observent localement suivant la morphologie de la surface externe : elles sont préservées entre des éléments mis en relief. Elles peuvent aussi être remplacées ou recouvertes par un encroûtement sulfaté (Fig. 67). Elles seront donc rarement visibles en surface car elles sont soit érodées par les lessivages, soit recouvertes par les encroûtements sulfatés.

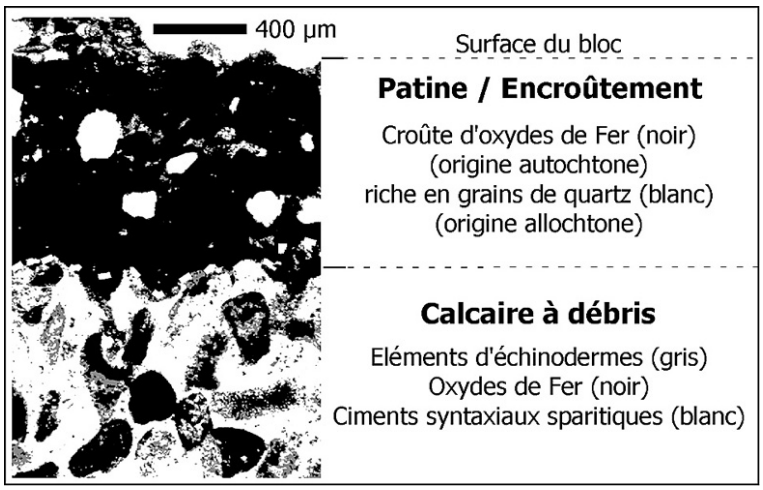


Fig 60 : Importante patine superficielle à la surface d'un bloc abrité de Pierre de Dom recouvert par une mince couche d'humus. (Dom-le-Mesnil, Ardennes)

Nous avons récolté des échantillons enfouis sous la végétation qui possèdent une patine très nette (entre 500µm et 1 mm d'épaisseur. Cette patine se compose d'une épaisse couche riche en oxydes de fer et grains de quartz arrondis (Fig. 60). Elle ne pénètre quasiment pas dans la roche sous-jacente et peut donc être interprétée comme un encroûtement : avec une fraction allochtone d'origine pédologique. Le calcaire situé immédiatement sous la croûte ferrugineuse apparaît souvent plus clair que le microfaciès de référence. Cette diminution de la teneur en oxydes de fer de la zone externe du bloc de Calcaire à débris se matérialise en analyse d'images par la

construction d'un profil perpendiculaire à la surface. Le profil de variation du niveau de gris (Fig. 61) montre nettement la couche de patine (qui mesure ici 850µm), les images contiennent plus de 40% de pixels dont le niveau de gris est inférieur à 65. Une zone de déficit en oxydes de fer est mise en évidence (elle mesure près de 5mm d'épaisseur) avec des pourcentages de phase noire très faibles (moins de 10%). Ensuite, la roche redevient plus saine, avec des variations de teneur en oxydes de fer liées aux micro-litages caractérisés page XXX, et dont le pourcentage de phase noire est globalement compris entre 10 et 30% (microfaciès Type 1). Dans les échantillons de Calcaire à débris étudiés, nous n'avons pas observé de couche de calcins nets (c'est à dire sans oxydes de fer), ni la présence de la couche argilo-calcitique décrite dans les patines des grès vosgiens par Jeannette (1981), Fritz et Jeannette (1981).

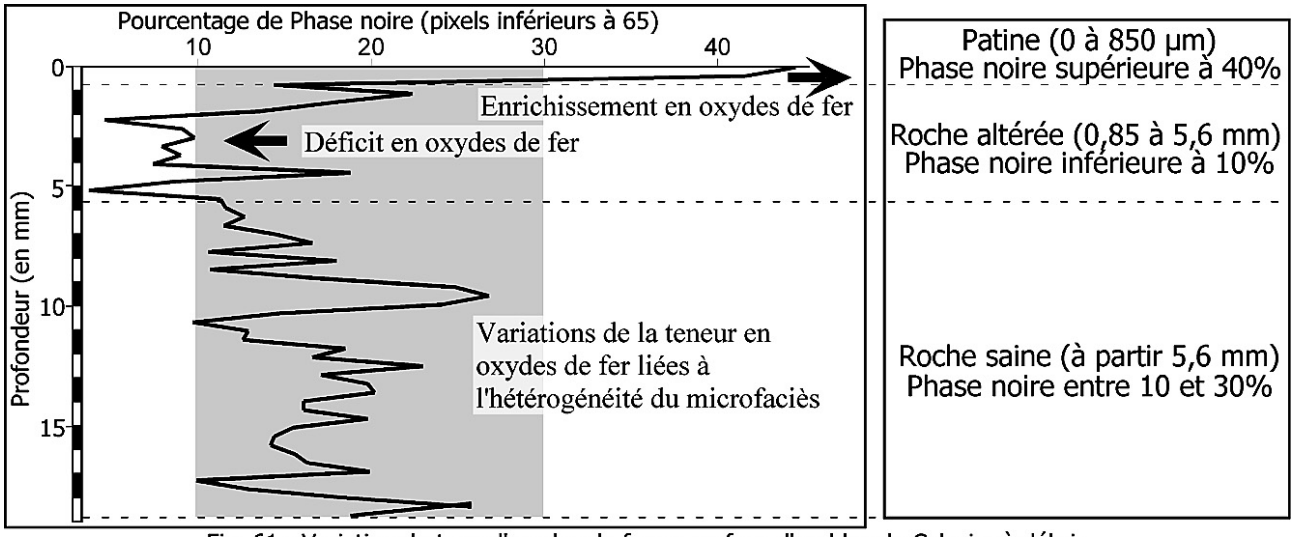


Fig. 61 : Variation du taux d'oxydes de fer en surface d'un bloc de Calcaire à débris
Profil de niveau de gris par analyse d'images et interprétation, Pierre de Dom

Desquamation

Les desquamations sont fréquemment observées, elles peuvent présenter trois morphologies :

- Une fine croûte noire (encroûtement sulfaté riche en cendres volantes), qui se desquame en cloques ou en larges feuillets d'une épaisseur millimétrique. Cette morphologie apparaît sur des blocs encroûtés, abrités de la pluie battante. La desquamation de l'encroûtement entraîne avec elle une fine couche de calcaire mais ne dégrade pas la roche en profondeur, elle correspond au décollement de l'encroûtement pelliculaire. L'ensemble desquamé (croûte + roche) est solide et cohérent ; une fois décollé, il cassera plutôt que de se désagréger.

- Une desquamation en mille-feuilles qui se forme sur des blocs de Calcaire à débris exposés à la pluie (ou légèrement abrités) avec des angles marqués. Il peut aussi s'agir de l'altération de sculptures ou de rebords. La roche est alors friable et pulvérulente, sa résistance à l'écrasement est faible et les parties en relief peuvent se détacher du bloc. Ce type de desquamation est lié à la position architecturale occupée (sculpture, bandeau,

saillie, soubassement…) qui ne correspond pas aux aptitudes d'emploi du Calcaire à débris. Le processus à l'origine de la desquamation est physique (*gel*) ou physico-chimique (*action des sels*). Dans ce type de desquamation, la zone dégradée est assez épaisse (plusieurs centimètres) et a parfois tendance à se détacher du reste du bloc, ce qui correspond alors à une forme de fragmentation (4, Fig. 64).

- De fines desquamations allongées selon les litages obliques du calcaire et dont le développement en profondeur est faible, qui apparaissent sur les blocs d'élévation exposés à la pluie. Le processus à l'origine de ce type de desquamations est lié à la cristallisation de sels qui s'accumulent dans certains litages du Calcaire à débris, plus favorables aux circulations de fluides que le reste de la roche. L'impact de ces petites desquamations sur la roche est léger mais elles apparaissent très importantes si on les replace dans l'évolution générale du Calcaire à débris en œuvre (Fig. 62). En effet, dans un premier temps, de petits bombements allongés apparaissent à divers endroits des blocs. Puis les renflements se fissurent et se fracturent, la desquamation se développe sous la forme de gerçures finement feuilletées : ces cloques ne s'étendent pas verticalement mais latéralement, suivant la stratification de la roche. Les feuillets desquamés sont peu cohérents et la roche sous-jacente est pulvérulente. Enfin, les desquamations se fragmentent et une désagrégation de la zone pulvérulente s'amorce.

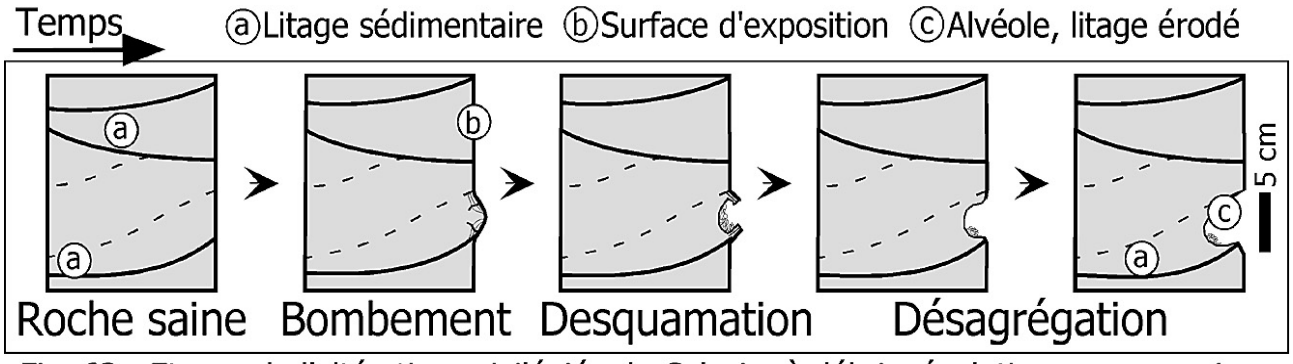


Fig. 62 : Etapes de l'altération privilégiée du Calcaire à débris, évolution macroscopique

Ce type de desquamation correspond au stade initial de la désagrégation granulaire que nous mettons en avant comme l'altération privilégiée du Calcaire à débris. La présence de bombements ou de desquamations allongées selon la stratification sera donc importante à relever car elle indique une future dégradation par désagrégation.

Désagrégation généralisée et progressive :

Dans les anciennes carrières de Dom-le-Mesnil, la roche abritée de la pluie est très friable et la surface du front de taille est constituée des croûtes « sableuses » très peu cohérente. Ces croûtes peuvent mesurer jusqu'à 30 centimètres d'épaisseur et s'effondrer sous leur propre poids en se détachant du front de taille.

Dans les zones soumises à l'action de la pluie, les croûtes friables sont moins épaisses ou absentes, certains blocs soumis aux pluies battantes peuvent présenter une désagrégation progressive (Fig. 63) où la porosité de la roche passe de 11 à 45% en quelques centimètres. Ces blocs restent cohérents malgré la macroporosité très importante, mais cette valeur de 45% doit être un seuil limite puisqu'au delà la roche est érodée par l'action de la pluie battante.

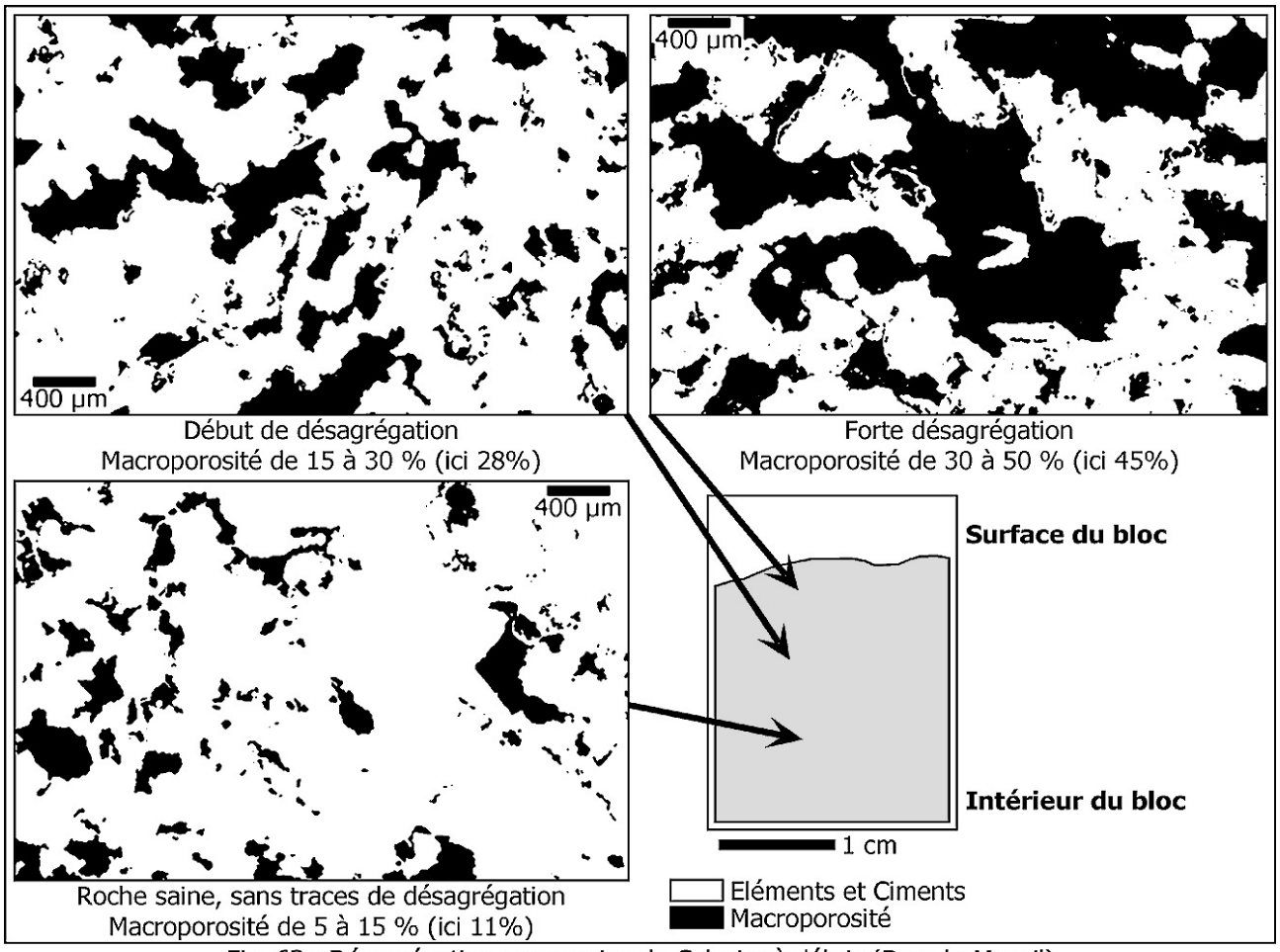


Fig. 63 : Désagrégation progressive du Calcaire à débris (Dom-le-Mesnil)
Images binaire de microfaciès, Macroporosité mesurée par analyse d'images (lumière polarisée)

Désagrégation localisée :

La désagrégation granulaire entraîne la formation d'alvéoles localisées dont le développement est lié à la stratification. La décohésion est limitée à certains litages obliques et elle n'affecte pas les autres litages de la roche, elle est donc en relation étroite avec la nature du microfaciès sédimento-diagénétique des différents litages. Ce type de désagrégation s'observe en milieu urbain très pollué, en milieu urbain moins agressif et en milieu rural, mais aussi in-situ quand l'affleurement est nettement dégagé et soumis à l'action de la pluie (entrée de la carrière souterraine de Dom-le-Mesnil). Le surcreusement de certains litages par décohésion granu-

laire s'observe ainsi dans tous les milieux et pour toutes les conditions de mise en œuvre, il est donc privilégié par la nature du Calcaire à débris.

Les figures 62 et 64 montrent les différentes étapes de cette altération et permettent de reconstituer l'évolution en œuvre du Calcaire à débris :

- Les circulations de fluides par capillarité dans les zones superficielles de la roche sont influencées par les hétérogénéités de porosité (Punuru *et al.*, 1990). Dans le Calcaire à débris, celles-ci sont très importantes et certains litages présentent un microfaciès très différent du reste de la roche (Microfaciès Type 2).

- La canalisation des circulations de fluides dans certains litages provoque une accumulation de sels près de la surface de ces niveaux (cristallisation par évaporation, Arnold et Zehnder, 1990 ; Pauly, 1996). La présence de ces sels entraîne un gonflement accompagné d'une fissuration et d'une diminution de la cohérence des zones fissurées (Zezza et Macri, 1995). Le reste de la roche n'est pas affecté par cette dégradation, il subit simplement une légère érosion de surface qui désolidarise les éléments les moins cimentés.

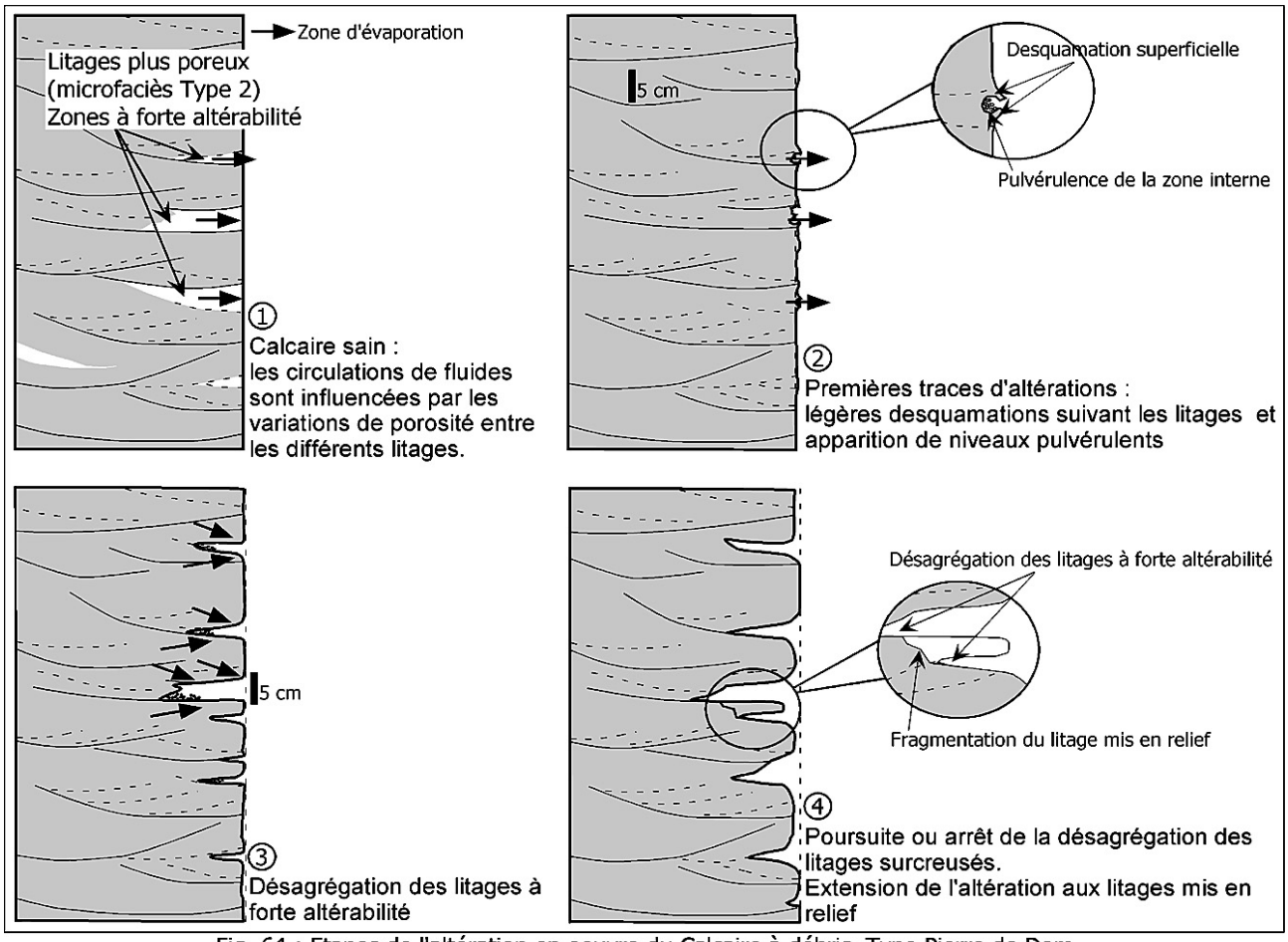


Fig. 64 : Etapes de l'altération en oeuvre du Calcaire à débris, Type Pierre de Dom
Influence de la porosité et du taux de cohésion granulaire de certains litages

- Le bombement se déchire et l'altération évolue en desquamation, la zone centrale de la roche sous-jacente est pulvérulente et très friable. Le calcaire pulvérulent et les minces feuillets desquamés sont érodés, une dépression se forme dans la zone fragilisée par les cristallisations des sels car ceux-ci ont provoqué une micro-fissuration et une diminution de la cohérence de la roche (initialement déjà faible).

- Le litage à forte altérabilité se creuse progressivement en laissant une fine poudre résiduelle au fond de la cavité : désagrégation granulaire. Les bords de l'alvéole deviennent des surfaces d'évaporation privilégiée, les cristallisations de sels à la périphérie se poursuivent, et la dégradation pénètre profondément dans le calcaire, creusant peu à peu le litage, parfois jusqu'à plus de 10 centimètres de profondeur. A ce stade, le reste de la roche est encore relativement sain, et le calcaire en œuvre est constitué d'une alternance de litages surcreusés et de litages presque non altérés.

- Le creusement des alvéoles se développe dans toute l'épaisseur des litages à forte altérabilité, la désagrégation granulaire s'étend aux litages intermédiaires qui se fragmentent s'ils sont trop mis en relief.

Microfissuration

La désagrégation granulaire du Calcaire à débris et la desquamation sont en partie provoquées par une microfissuration parallèle à la surface du bloc (Fig. 65). Ces fissures passent préférentiellement à la limite entre les ciments syntaxiaux (2) et rejoignent les pores intergranulaires (1), elles peuvent aussi fracturer les pelletoïdes et les bioclastes (3). Dans ce dernier cas, des débris d'huîtres peuvent être fracturés par le milieu ou la fracture peut séparer le fragment de coquille du ciment palissadique qui l'entoure (5). Nous pouvons aussi remarquer que les fractures ne traversent les éléments d'échinodermes que s'ils sont orientés perpendiculairement à la surface (4).

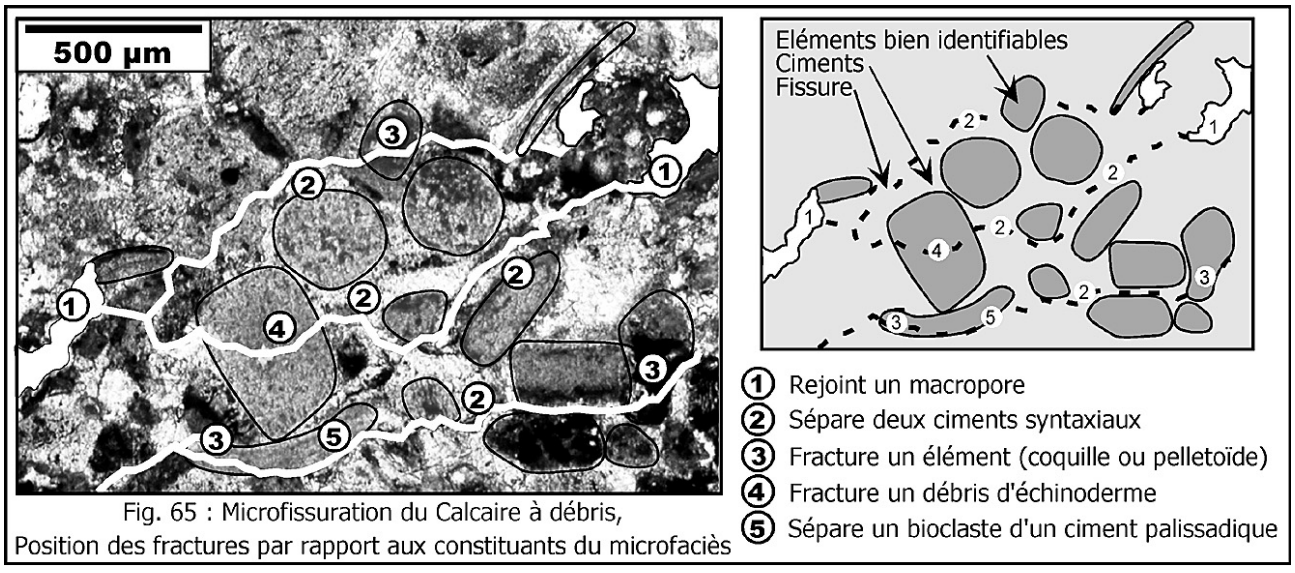


Fig. 65 : Microfissuration du Calcaire à débris,
Position des fractures par rapport aux constituants du microfaciès

La microfissuration du Calcaire à débris a donc tendance à individualiser les éléments d'échinodermes sans les séparer du ciment syntaxial qui les englobe, par contre les autres bioclastes sont fracturés (comme les coquilles de lamellibranches). Les grains de quartz très résistants et peu cimentés sont les éléments les moins liés au reste de la roche, ils seront donc facilement désolidarisés. Enfin, le fait que les microfractures séparent les ciments syntaxiaux sans les fracturer indique que ces ciments sont faiblement accolés les uns aux autres. Nous pouvons donc en conclure que ce type de phase de liaison n'assure pas un fort taux de cohésion entre les éléments, par contre la liaison entre le ciment syntaxial et l'élément d'échinoderme est très forte, puisque les fractures se séparent jamais l'élément de son ciment. Pour les ciments palissadiques, la remarque inverse peut être faite puisque les microfractures ne passent pas au point d'accolement entre les ciments, mais entre l'élément et le ciment palissadique, nous confirmerons d'ailleurs cette observation en étudiant la fissuration de l'Oolithe vacuolaire (Fig. 72), dont la phase de liaison est entièrement constituée par ce type de ciment.

La désagrégation du Calcaire à débris par *microfissuration* produit finalement une poudre résiduelle qui se répand au fond des alvéoles et sur le sol. Ce calcaire totalement dégradé est composé de fragments de roche avec des éléments encore cimentés et d'éléments totalement individualisés.

Les mesures représentées Fig. 66 ont été effectuées sur une poudre résiduelle récoltée à Charleville-Mézières, au fond d'un litage surcreusé. Elle est constituée de fragments de dimensions variées (de 20µm à plus de 3 millimètres) dont la taille est fortement corrélée à la nature du débris. On y différencie les granules d'oxydes de fer (35 à 175µm). Les éléments totalement individualisés : grains de quartz (70 à 275 µm) et débris d'échinodermes parfois encore entourés de leur ciment syntaxial (190 à 675µm).

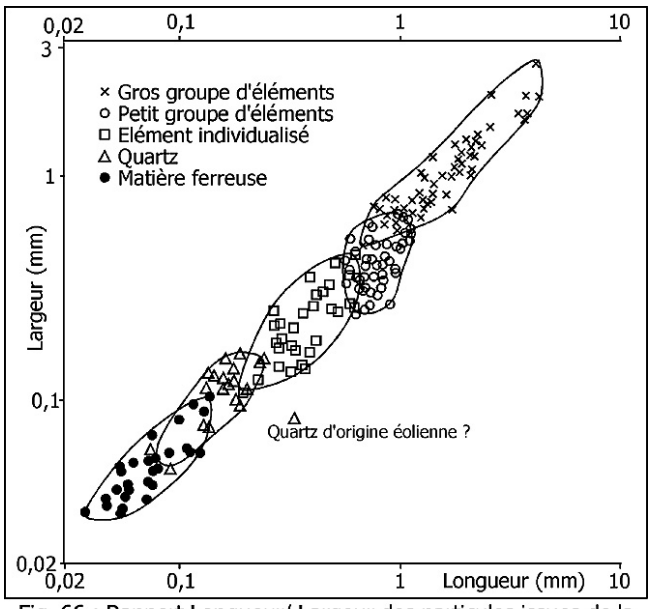


Fig. 66 : Rapport Longueur/ Largeur des particules issues de la désagrégation du Calcaire à débris (Charleville-Mézières)

La poudre résiduelle contient aussi des fragments de roche constitués de plusieurs éléments figurés et de leur ciment (de 500µm à plusieurs millimètres).

Le ratio Longueur / Largeur des particules de la poudre de désagrégation est relativement constant (environ 0.65). C'est pourquoi, le seul grain de quartz dont le ration L/l diffère des autres mesures peut être interprété comme étant allochtone et d'origine éolienne. Il est également plus gros (350µm) que les grains de quartz contenus dans le faciès sain (entre 70 et 275 µm).

Encroûtements :

Le développement des encroûtements sulfatés et/ou biologiques est conditionné par le microclimat de mise en œuvre, mais quelques particularités liées à la nature de la roche peuvent être signalées. Le Calcaire à débris est peu cimenté, les éléments ne sont liés les uns aux autres que par un ciment syntaxial, le taux de cohésion de la roche est faible et elle tend à se désagréger (aspect sablonneux). Cette particularité, qui s'exprime par ailleurs par une nette tendance à développer des désagrégations alvéolaires (voir section précédente), limite le développement des encroûtements. En effet, les éléments superficiels sont facilement érodés, entraînant avec eux, les croûtes faiblement cohérentes.

Les encroûtements seront donc soit **très cohérents et résistants** à la désagrégation, soit **peu épais et discontinus** car périodiquement disloqués. Les croûtes dures se comporteront comme des barrières moins perméables que la roche sous-jacente et auront tendance à se desquamer (décollement pelliculaire, voir section desquamation).

Les croûtes discontinues sont peu épaisses, certains éléments sont mis en relief (Fig. 67). Il s'agit principalement des débris d'échinodermes dont la périphérie est parfois recristallisée (a) alors que leur ciment syntaxial est érodé. Les fragments de lamellibranches sont disloqués et intégrés à la croûte (b), ils sont dissociés de leur ciment palissadique, plus fragile, qui est finement fragmenté et n'est plus identifiable dans l'encroûtement. Les pelletoïdes et les petits Foraminifères qui ne sont quasiment jamais mis en relief sont recristallisés et progressivement intégrés à l'encroûtement.

La sensibilité des composants du microfaciès à la microfragmentation est très diverse : les ciments syntaxiaux et palissadiques y seront très sensibles, par contre les éléments montreront peu de traces de fragmentation. Il est surprenant de constater que le ciment syntaxial, pourtant intimement lié au éléments, est très sensible à cette dégradation.

Dans l'encroûtement sulfaté (Fig. 67.), trois couches peuvent être reconnues :

- 1/ la zone superficielle composée de gypse est riche en particules noires (cendres volantes) et quelques organismes actuels peuvent être observés en épifluorescence ;
- 2/ une couche interne, aux cristallisations de gypse mieux exprimées avec des éléments en partie recristallisés en sels et parfois difficilement identifiables ;
- 3/ une zone riche en oxydes de fer. Il peut s'agir d'un reliquat de patine ou une nouvelle accumulation d'oxydes de fer dans une zone abritée du lessivage superficiel (zone en dépression, protégée du ruissellement et de l'érosion par des éléments mis relief).

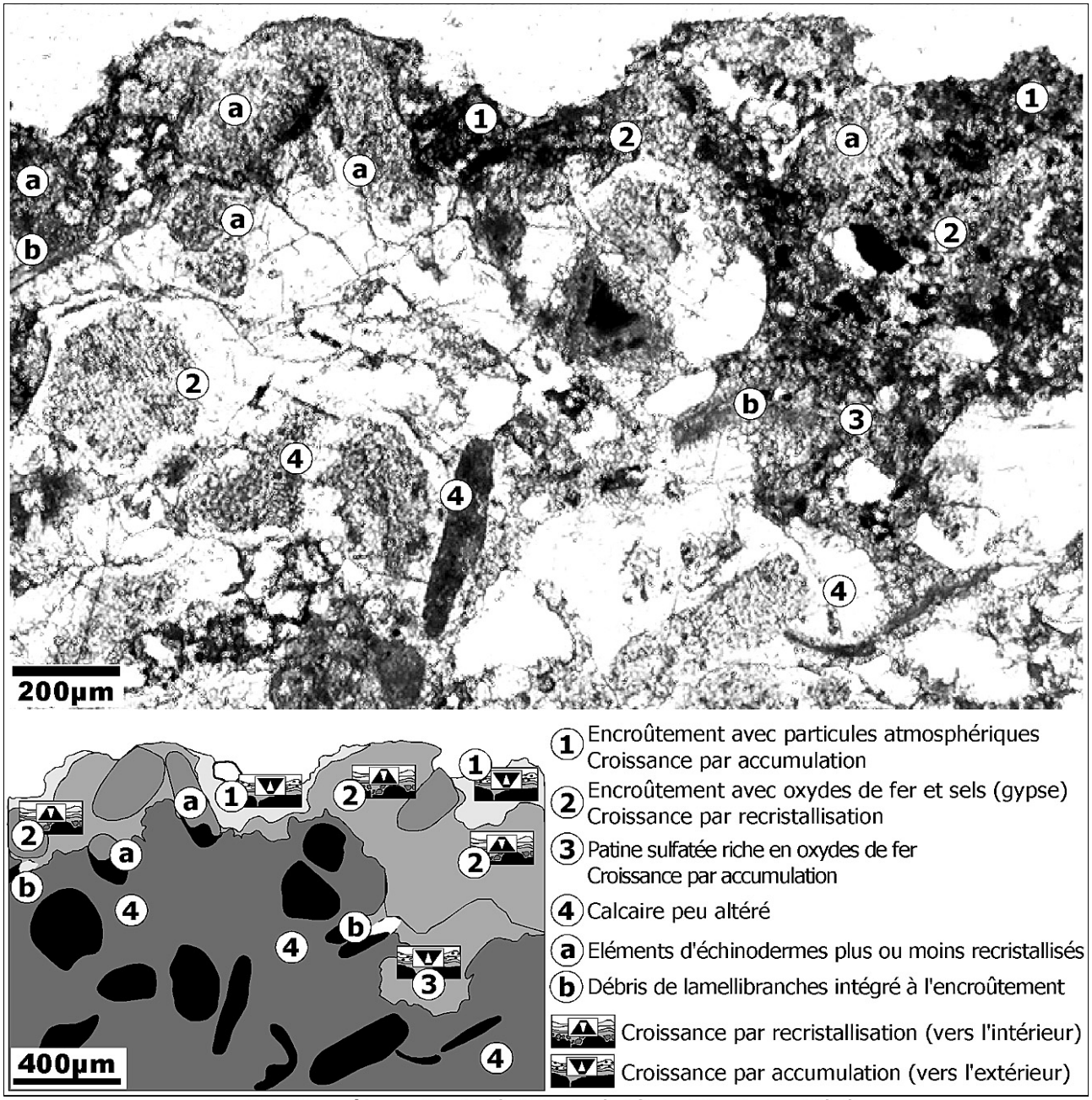


Fig. 67 : Encroûtement sulfaté, Calcaire à débris, Charleville-Mézières

Dans les zones les plus favorables au développement d'encroûtements sulfatés (milieu bien abrité des pluies battantes, mais se situant à la limite des zones des ruissellements ou de remontées capillaires), les croûtes sont épaisses et affectent profondément le calcaire. Elles sont alors plus complexes que la croûte décrite précédemment (Fig. 67) et présentent une stratigraphie similaire aux encroûtements décrits dans la littérature (Jeannette, 1981 ; Camuffo *et al.* 1982 ; Biscontin *et al.* 1991a ; Sabbioni *et al.,* 1997…). Elles sont constitués d'une partie biologique (à la surface), d'une zone d'origine atmosphérique (à particules noires et éléments allochtones) et d'une zone interne plus claire où le gypse est mieux cristallisé. Mais localement, elles présentent elles aussi une couche interne supplémentaire, enrichie en oxydes de fer.

Cette couche interne qui contient des cristallisations de sels et des oxydes de fer est une des caractéristiques des encroûtements développés sur le Calcaire à débris, elle est due à la grande quantité de fer contenu dans la roche et à leur grande mobilité. En effet, nous avions remarqué l'accumulation d'oxydes aux barrières de porosité verticales ou horizontales (voir page 45) et il apparaît donc que la mobilité des imprégnations ferreuses peut aussi se produire en œuvre. L'assombrissement généralisé du Calcaire à débris exposé à l'atmosphère, s'explique donc par le développement des accumulations superficielles riches en fer et l'accentuation de la couleur brun rouille au cours du temps.

Evolution télogénétique du Calcaire à débris

Le Calcaire à débris est une très bonne pierre à bâtir, les anciennes constructions sont peu dégradées. En effet, malgré la présence de litages surcreusés, les blocs montrent globalement une tenue en œuvre convenable,. En élévation ce calcaire est non gélif, mais il peut montrer d'importantes traces d'altérations s'il est utilisé en soubassement, bandeaux, saillies ou orné de sculptures. Certains litages obliques, d'une épaisseur de 5 à 20 centimètres sont plus altérables que le reste de la roche et sont rapidement dégradés : desquamation puis désagrégation granulaire avec formation d'alvéoles très profondes. Ces litages sont inaptes à la mise en œuvre et leur présence est très dommageable car ils entraînent à terme la dégradation des litages moins altérables.

Les caractéristiques de porosité : forte porosité totale, propriétés capillaires élevées et coefficient de saturation très important (parfois plus de 0.9) conduisent à déconseiller son utilisation dans les soubassements. Un non respect de cette recommandation d'emploi entraîne l'apparition d'efflorescences dans toute la moitié inférieure du rez-de-chaussée des constructions. De plus, les blocs de soubassement sont très altérés et présentent des altérations de type desquamation et fragmentation.

Même s'il est convenablement mis en œuvre, le Calcaire à débris présente une nette tendance à la désagrégation alvéolaire, expliquée par la faible cimentation et l'absence de calcite de blocage. Le développement de cette altération est lié au faible taux de cohésion entre les éléments figurés qui auront tendance à se désolidariser, soit par dissolution du ciment aux points de contact entre les éléments, soit par microfissuration. Cette altération est observée in-situ ou en œuvre (Fig. 68) : normalement la désagrégation se développe assez lentement et de façon progressive, mais certains litages y sont particulièrement sensibles et conduisent à la formation d'alvéoles allongés suivant la stratification.

Les oxydes de fer, très nombreux, sont mobiles et peuvent migrer suivant les circulations de fluides par capillarité, ils s'accumulent dans les zones d'évaporation et forment des patines ou des croûtes mixtes sels / oxy-

des de fer. Les accumulations d'oxydes ont été observées à la surface des affleurements naturels et dans des échantillons mis en œuvre en milieu urbain, sous les croûtes sulfatées. Les patines (a) et les croûtes enrichies en oxydes de fer (respectivement notées a et e sur la figure 68) sont donc elles aussi caractéristiques de l'évolution télogénétique de ce calcaire.

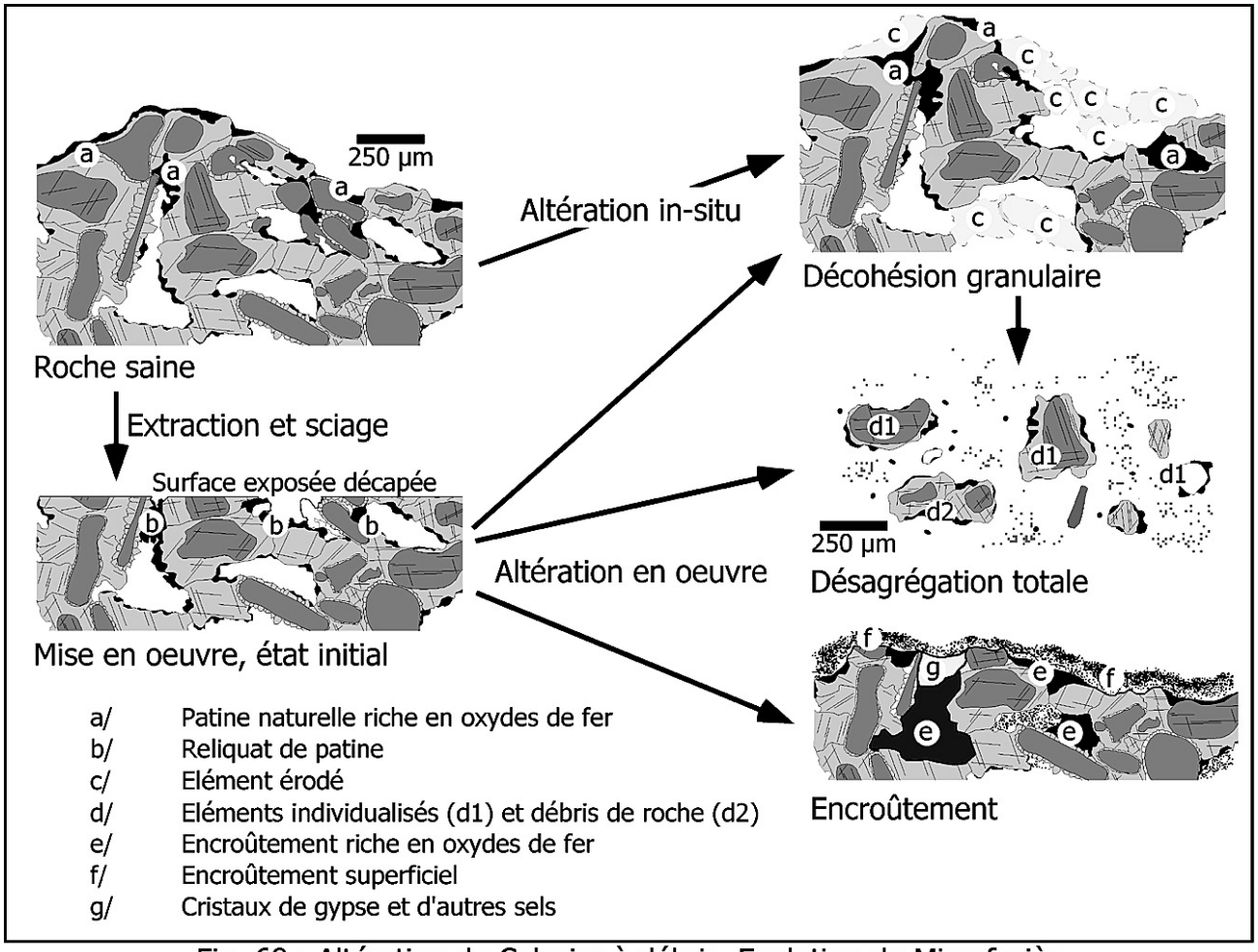


Fig. 68 : Altération du Calcaire à débris, Evolution du Microfaciès

Les altérations développées par le Calcaire à débris sont principalement conditionnées par la **structure du calcaire** : stratification en litages obliques et alternance de différents types de microfaciès sédimento-diagénétiques (types 1 et 2, voir Fig. 17). De plus, le litage conditionne l'orientation de la porosité (anisotropie) et la fréquence des litages très altérables contrôle la sensibilité du bloc à la désagrégation alvéolaire, c'est à dire la durabilité de la roche mise en œuvre (Fig. 64).

L'altération par *décohésion granulaire* est privilégiée par deux facteurs : premièrement, le **développement de la cimentation** sans sparite secondaire en mosaïque (calcite de blocage) entraîne un faible taux de cohésion granulaire et la présence d'une macroporosité intergranulaire non complètement obturée. Deuxièmement, le

type de ciments constitué principalement par les ciments syntaxiaux liés au échinodermes est très sensible à la décohésion par décollement : microfractures (Fig. 65).

Les fortes remontées de fluides à la base des murs et la dégradation du Calcaire à débris utilisé en soubassement sont liées à la morphologie du réseau poreux. En effet, les pores sont bien interconnectés (**faible développement de la cimentation)** et la petite **taille des éléments figurés** : de moins de 0,5mm en moyenne (Fig. 66) favorise les circulations capillaires

Enfin, le **fer** facilement mobilisé lors des circulations de fluides, favorise la formation de patines et de croûtes ferrugineuses (Fig. 60 et 68).

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altération privilégiée par la caractéristique
Obturation partielle de la porosité intergranulaire Absence de calcite de blocage	Développement de la cimentation, Valeur de la macroporosité	Forte sensibilité à la désagrégation
Stratification en litages entrecroisés hétérogènes Alternance de microfaciès type 1 et type 2	Structure du calcaire	Fréquence des litages très altérables (désagrégation)
Ciment principal de type syntaxial	Nature des phases diagénétiques	Décohésion granulaire
Petites dimensions des éléments figurés	Nature de la porosité	Fortes propriétés d'absorption capillaire
Présence d'oxydes de fer remobilisables	Nature des phases diagénétiques	Patine et encroûtements ferrugineux

Tab. 19 : Caractéristiques du Calcaire à débris qui conditionnent son comportement en œuvre.

Nos observations démontrent l'influence du microfaciès du Calcaire à débris sur son altération (Tab. 19) et nous pouvons même classer les composants du microfaciès selon leur sensibilité à l'altération (Tab. 20) :

- Les fissures passent préférentiellement entre les ciments syntaxiaux. Comparé aux autres relations entre les composants du microfaciès, l'accolement entre les ciments est peu résistant.

- Les ciments (palissadiques et syntaxiaux) sont désagrégés plus rapidement que les éléments, les entroques sont mis en relief alors que leur ciment syntaxial est érodé.

- Les bioclastes autres que les entroques et les pelletoïdes sont très sensibles à la recristallisation en sels, alors que les ciments sparitiques et les entroques y seront très résistants.

Sensibilité à la microfissuration	
1	Contacts Cs / Cs
2	Liaisons Cp / Eléments
3	Pelletoïdes
4	Bioclastes (sauf entroques)
5	Ciments syntaxiaux (Cs)
6	Entroques
7	Ciments palissadiques (Cp)
8	Liaisons Cs / Eléments
9	Contacts Cp / Cs

Sensibilité à la microfragmentation	
1	Ciments palissadique (Cp)
2	Ciments syntaxiaux (Cs)
3	Bioclastes (sauf entroques)
4	Entroques
5	Pelletoïdes
6	Quartz

Sensibilité à la recristallisation	
1	Pelletoïdes
2	Bioclastes (sauf entroques)
3	Ciments syntaxiaux (Cs)
4	Entroques
5	Ciments palissadiques (Cp)
6	Quartz

Tab. 20 : Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.

2/ Altération de l'Oolithe vacuolaire :

Généralités :

Altération in-situ :

On ne peut observer de véritable altération in-situ de l'Oolithe vacuolaire car la formation ne mesure que 3 mètres d'épaisseur et elle est généralement recouverte pas les marnes et argiles de l'unité qui la surmonte. Seules les carrières à ciel ouvert récentes et les entrées de carrières souterraines sont visibles. Certains sites du début du siècle sont déjà envahis par les bois et les entrées de galeries disparaissent peu à peu derrière les cônes d'accumulation d'argiles glissées. Ainsi, à Ville-sur-Saulx, sur près de 30 entrées repérées seuls deux fronts de taille sont véritablement observables. A Morley, les anciennes carrières sont recouvertes par la végétation ou ont été comblées et nous avons seulement retrouvé un banc de calcaire totalement dolomitisé de 50 centimètres d'épaisseur. Buvigner (1854) indique que dans cette commune les droits d'extractions étaient donnés de façon discontinue « à charge de remblayer et de repiquer ». Enfin, dans certaines carrières abandonnées (notamment les sites 2Sa, 1Ch et 2 Ch, Fig. 22), les anciens fronts de taille sont observables mais ils sont trop récents et ne présentent pas encore de traces de dégradation.

La formation de l'Oolithe vacuolaire contient de nombreuses traces de karstification, d'importants gouffres ont même été signalés dans la Pierre de Savonnières, se prolongeant dans les calcaires du sous-jacent (Stchépinsky, 1949). Ces traces de karst se rencontrent dans les carrières de pierre de taille et leur présence nuit à l'exploitation. Un phénomène à rapprocher de la karstification est celui des effondrements souterrains, problème particulièrement important pour la commune de Savonnières-en-Perthois dont les habitations sont entièrement construites au dessus de carrières souterraines, aujourd'hui abandonnées ou utilisées comme champignonnières.

Altération en œuvre :

Que ce soit sur les échantillons prélevés dans les anciennes carrières ou à la surface des bâtiments, nous n'avons jamais observé de couche de calcin et nous n'avons donc pas étudié de surface couverte par une patine d'altération. L'examen des litages micritiques avec les microfaciès type 1b ou 2b) aurait peut-être permis d'infirmer cette remarque, mais nous n'avons pas pu nous procurer d'échantillons de ces microfaciès avec une surface modifiée par une longue exposition en œuvre.

Nous signalerons seulement l'observation ponctuelle de coloration, sans doute assimilable à une patine, de certains éléments de maçonnerie d'Oolithe vacuolaire (rue Libergier, Reims). Dans des blocs d'élévation de mur exposés à la pluie, des niveaux micritiques de 10 centimètres d'épaisseur (microfaciès type 1b /2b) ont pris une nette couleur brun-jaune, alors que le reste du bloc est plutôt grisâtre. Cette altération ne met pas en péril la durabilité de la roche, mais elle se révèle particulièrement inesthétique.

Les traces macroscopiques de dissolution sont très rares. Quelques ravinements ont été observés, mais leur nombre est réduit : 5 observations seulement (dont 2 à Reims). Il s'agit dans tous les cas de blocs posés en délit, très exposés à la pluie battante (sculptures du bâtiment de la Poste, rue Emile Zola à Reims). Les niveaux érodés par cette surexposition aux ruissellements ne sont pas très profonds (moins d'un centimètre de profondeur), ils sont orientés verticalement et suivent les lits de la roche. Cette altération est donc sans conséquence sur la durabilité globale du bloc en œuvre.

Les desquamations ne se rencontrent qu'en milieu urbain. Deux types ont été observés (Fig. 69), Cimetière de l'ouest à Reims), il s'agit soit de l'exfoliation d'une grande plaque, laissant une roche sous-jacente pulvérulente facilement désagrégeable, soit de desquamations pelliculaires liées à la cristallisation très intense de sels sur une surface légèrement abritée.

L'altération la plus marquée est une désagrégation alvéolaire, dont les alvéoles sont limitées par les litages (Fig. 70). La décohésion granulaire de l'Oolithe vacuolaire apparaît sur des blocs exposés à la pluie depuis une très longue période : en milieu rural (dans les habitations en gros moellons de Savonnières-en-Perthois) et parfois en milieu urbain (Fig. 71). La forme des alvéoles est conditionnée par la taille et la disposition des litages obliques, mais à la différence du Calcaire à débris, les alvéoles deviennent rapidement coalescentes et toute la surface du bloc est dégradée (désagrégation généralisée). Seuls quelques niveaux plus résistants ainsi que les limites des litages ou les bords des blocs sont laissés en relief alors que le reste de la roche est creusé de façon homogène.

Les altérations de type fragmentation sont très rares. On peut pourtant considérer que la séparation d'une croûte superficielle par désagrégation de la roche sous-jacente (processus de sape) peut être classée dans ce type d'altération. En effet, les fragments de roche qui se détachent de la paroi mesurent parfois plus de 10 centimètres de long (escalier du musée St-Rémy à Reims).

Les encroûtements sont nettement liés au microclimat d'exposition, mais les croûtes sont assez rares et ne seront présentes que dans les zones très abritées (et subissant une forte pollution atmosphérique). Nous avons observé des efflorescences (avec tendance à la desquamation pelliculaire, Fig. 69), mais aussi de fréquentes

cristallisations de sels (gypse, thénardite, halite…) en profondeur (subflorescences ou cryptoflorescences). La pénétration des sels peut être très importants, particulièrement dans les microfaciès à forte perméabilité, dont la macroporosité intergranulaire est bien interconnectée (voir relation entre la macroporosité et la taux de développement des ciments palissadiques : Fig. 34). En relation avec les encroûtements sulfatés (Fig. 74a et 74b), nous avons observé une recristallisation en gypse de la calcite des cortex oolithiques (Fig. 74b et 75). Cette transformation minéralogique visiblement progressive, affecte principalement les éléments figurés et pas les ciments palissadiques, nous pouvons d'ailleurs rapprocher ces observations des modes d'altérations décrits par Schiavon, 1992 (Fig. 76).

Dans quelques cas, nous avons constaté la présence d'organismes (lichens, algues…) non seulement à la surface des blocs, mais aussi à l'intérieur des échantillons (Fig. 77), jusqu'à une profondeur d'un centimètre. Ce développement d'organismes dans les macropores en connexion avec le milieu extérieur (vacuoles intergranulaires et pores intragranulaires des éléments fracturés) est particulièrement important dans ce type de calcaire à forte macroporosité intergranulaire.

Description des altérations :

Desquamation

Malgré que l'Oolithe vacuolaire ne soit généralement pas affectée par une altération de type desquamation, nous en avons observé sur quelques dalles funéraires de la fin du XIX^{ème} siècle (Reims, milieu urbain, Fig. 69).

Les desquamations sont alors de trois types :

-1/ Sur une stèle dont la surface est exposée à la pluie battante, on observe une large et épaisse plaque desquamée sur presque 10 centimètres de longueur (exfoliation). La roche sous-jacente est pulvérulente et latéralement la stèle est érodée. Les litages y sont soulignés par l'érosion des zones pulvérulentes et l'altération prend alors une morphologie identique à celle obtenue après désagrégation. Le microfaciès de la plaque desquamée est constitué de très grosses oolithes (millimétriques) et le ciment palissadique sparitique est très développé. Le calcaire présente ici un très fort indice de cohésion, ce qui explique qu'une plaque de 10 centimètres de long puisse se former sans se désagréger. Il faut remarquer que nous n'avons jamais observé de plaques si importantes pour les microfaciès dont les éléments sont liés par un ciment syntaxial (Calcaires à débris et Entroquites de la Meuse). De plus, les sections de la plaque desquamée contiennent des cristallisations de sels dans tous les macropores intergranulaires et dans certains macropores intragranulaire. Cette desquamation est donc causée par la cristallisation de sels à l'intérieur de la roche (*subflorescence*), ce qui est confirmé par la pulvérulence du calcaire sous la plaque.

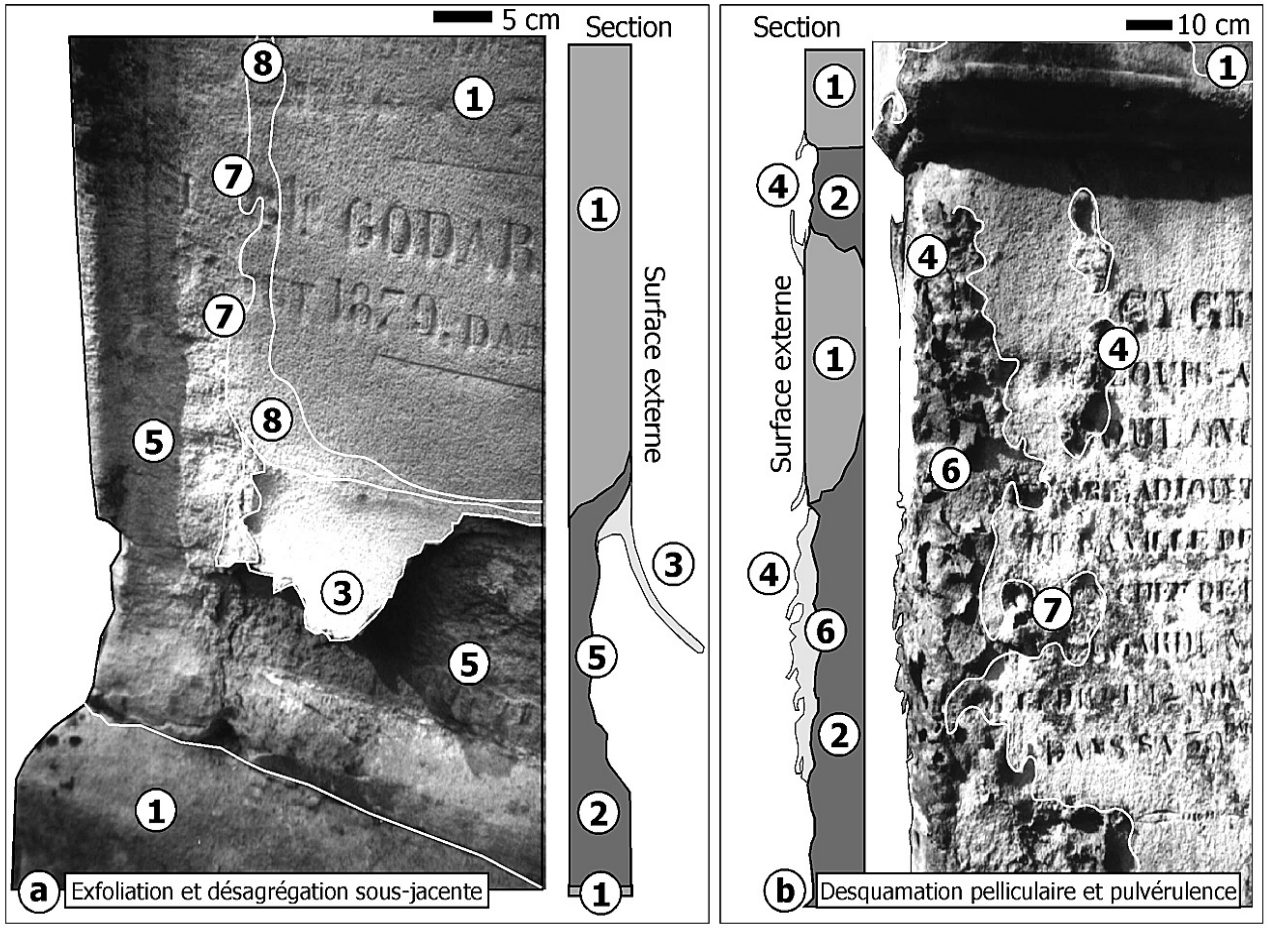


Fig. 69 : Desquamation de l'Oolithe vacuolaire, dalles funéraires de la fin du XIX^{ème} siécle, Reims

-2/ Une autre morphologie d'altération s'observe sur quelques stèles funéraires (b, Fig. 69 ci dessus), elle est constituée de nombreuses desquamations reparties sur toute la surface des dalles, légèrement protégées de la pluie battante. Cette stèle est plus encroûtée que la précédente et des *efflorescences* salines sont nettement visibles sur tout la surface. La forme des desquamations est très différente de l'exfoliation citée ci-dessus, il s'agit de petites gerçures mesurant généralement moins de 10 centimètres de diamètre. Le microfaciès du calcaire correspond bien au microfaciès de référence type 1a : les oolithes sont de petite taille et les ciments syntaxiaux sont bien développés. Dans ce cas, l'influence du microfaciès est moins importante que celle du microclimat d'exposition (surface abritée de la pluie battante en milieu urbain) qui permet une importante accumulation de sels en surface et provoque la formation des efflorescences et la desquamation superficielle en cloques.

Désagrégation

Il s'agit d'une forme d'altération fréquemment observée sur les blocs qui ont subis une longue période de mise en œuvre (plus d'un siècle). Nous distinguons ici deux morphologies de désagrégation (alvéolaire et généralisée), mais ces deux formes d'altération peuvent s'observer côte à côte ou se succéder dans le temps (Fig. 71). On peut donc considérer qu'il s'agit de deux stades d'évolution d'une même altération de type désagrégation granulaire.

Observée couramment en milieu rural ou urbain, la désagrégation de toute la surface de la roche peut se décomposer en deux grandes étapes : une légère desquamation de la surface du bloc parfois encroûté, puis un creusement homogène de toute la face externe. La désagrégation alvéolaire semble par contre plus classique et sa morphologie est conforme aux altérations décrites par Jeannette (1992a) et Pauly (1996).

L'individualisation de croûtes superficielles laisse supposer l'existence d'un calcin ou d'un durcissement de la surface lié à la mise en œuvre (léger encroûtement), mais nous n'avons pu mettre en évidence ce phénomène.

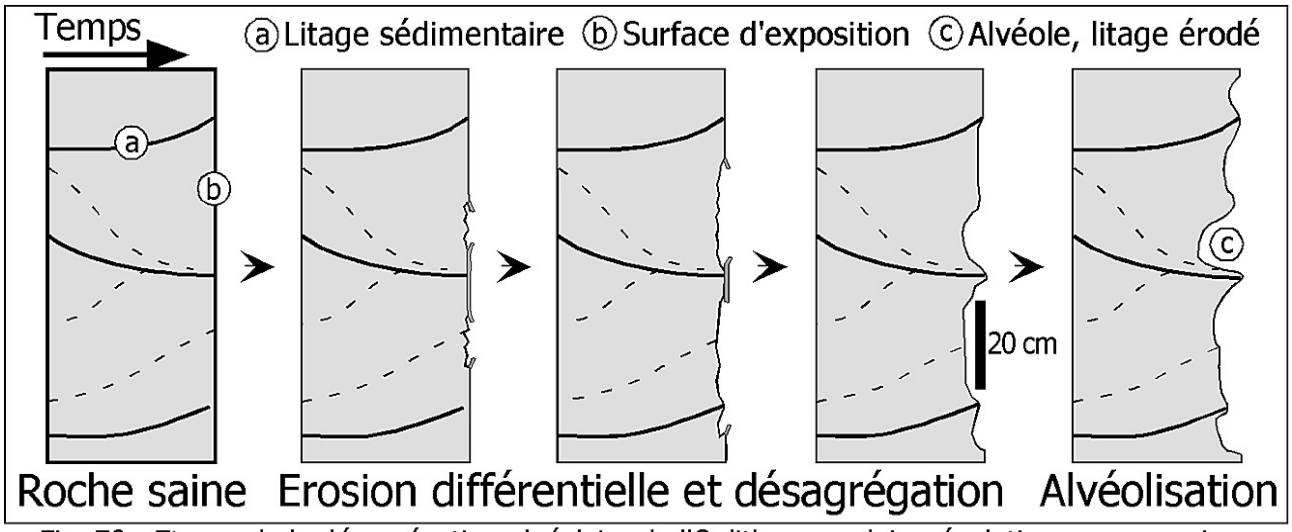


Fig. 70 : Etapes de la désagrégation alvéolaire de l'Oolithe vacuolaire, évolution macroscopique

Dans un premier temps, la désagrégation granulaire érode légèrement la surface et individualise des îlots non altérés, ce stade d'altération correspond à une érosion différentielle suivant la résistance superficielle du bloc (Fig. 70). Ensuite, les litages légèrement désagrégés sont progressivement surcreusés, tandis que les îlots préservés sont petit à petit érodés.

- Si la roche est composée de litages très hétérogènes ou si le creusement se fait très lentement : par exemple en milieu rural, la désagrégation granulaire donne alors une morphologie alvéolaire (4 sur la Fig. 71).

L'altération progresse alors en profondeur et les alvéoles s'étendent latéralement suivant les litages du calcaire. Les inter-lits et les bords des blocs sont mis en relief, alors que tout le reste de la surface est érodé.

- Si la roche est homogène et si la dégradation progresse rapidement (par exemple en milieu urbain), lorsque la cohésion du calcaire est diminuée par une microfissuration (due à des cristallisations salines), la désagrégation progresse de façon homogène sur toute la surface du bloc et toute la face externe est érodée. Le relief de la face externe désagrégée est peu marqué et macroscopiquement la morphologie apparaît très lisse, même si la surface est pulvérulente : désagrégation généralisée (noté 5 sur la Fig. 71).

Nous n'avons pas encore fixé avec précision les paramètres qui conditionnent le développement de l'une ou l'autre de ces désagrégations granulaires. Cependant, nous pouvons émettre quelques hypothèses fondées sur des observations d'altération en milieu rural à Savonnières-en-Perthois et à St-Dizier, Châlons-en-Champagne, Reims…

- Quelques désagrégations alvéolaires observées à Aulnois-en-Perthois ou sur la Basilique de l'Epine (près de Châlons-en-Champagne) présentent un creusement très marqué (plus de 10 centimètre de profondeur). La surface du bloc est peu à pas pulvérulente et certains inter-lits ainsi que les limites de blocs sont mis en relief. En milieu peu pollué, où les influences des sels sont faibles, la désagrégation progressive suivant une évolution lente peut donc conduire à une érosion différentielle des litages (alvéolisation).

- Les désagrégations en milieu urbain pollué (églises de Grigny à St-Dizier, de Notre-Dame-en-Vaux à Châlons-en-Champagne) sont plutôt généralisées à toute la surface. Les zones encroûtées sont sapées par une désagrégation sous-jacente avant de se désagréger ou de se séparer du bloc, ce qui correspond à une altération de type fragmentation. Les désagrégations rapides en milieu urbain sont donc plutôt de type généralisé.

Des désagrégations observées sur un mur à Châlons-en-Champagne (Fig. 71) montrent les deux types de dégradation granulaire (alvéolaire et généralisée). On peut considérer qu'il existe une relation entre le taux d'encroûtement de la surface (présence de sels) et la morphologie de l'altération ou bien une variation de la morphologie d'altération selon la nature des sels. En effet, l'alvéolisation se développe dans la partie inférieure du mur, très riche en croûte noire (notée 4 et 4', Fig. 71) alors que les zones de désagrégation généralisée (notées 5) sont situées plus haut dans la construction (dans une zone plus claire). On peut donc considérer que les altérations alvéolaires se développent dans les zones très encroûtées, donc très riches en sels, alors que les désagrégations généralisées affectent les zones où l'action des sels est moins importante. Mais on sait aussi que dans un volume soumis aux circulations de fluides, les cristallisations de sels sont étagées verticalement ou selon la profondeur (Arnold et Kueng, 1985 ; Arnold et Zendher 1985). Ainsi on peut penser que dans ce mur différents sels ont cristallisé (sulfates, nitrates…), induisant directement des altérations différentes.

Pourtant, on peut aussi remarquer la présence d'encroûtement à la surface et à l'intérieur de certaines alvéoles (zone notée 4') qui montre que la désagrégation granulaire de la base du mur est stoppée. Cette zone montre désormais une tendance à l'accumulation de particules plutôt qu'à la perte de matière. Nous pouvons donc supposer que l'altération de type désagrégation est encore active dans la zone 5 (dont la surface est à vif) alors que son intensité est décroissante vers la base du mur : elle est encore légèrement active en zone 4, inactive depuis quelques temps en zone 4' et elle ne s'est jamais développé dans les zones 1 (surface lessivée) et 2' (croûte noire). De plus, on peut remarquer que la dégradation progresse vers le haut du mur et qu'elle commence seulement à apparaître en zone 3. La formation de petites alvéoles serait donc un 1er stade d'altération alors que la désagrégation généralisée de la surface est un stade plus évolué, qui apparaît tardivement.

Enfin, on peut observer que l'alvéolisation se développe sur des murs exposés aux ruissellement d'eau alors que la désagrégation généralisée apparaît sur des blocs plus protégés de la pluie. En effet, la coexistence de désagrégation généralisée et d'encroûtements est parfois constatée (zone 5, Fig. 71). Alors que l'alvéolisation ne se produit que sur des éléments exposés (à la pluie et au vent) et qu'elle est stoppée quand le microclimat d'exposition permet l'accumulation de particules en surface (zone 4', Fig. 71). On peut donc supposer qu'il existe une relation entre le degré d'exposition à la pluie (ou au vent), et le développement de l'alvéolisation ou de la désagrégation généralisée (Samsom-Gombert, 1993, Rodriguez-Navarro *et al.*, 1999).

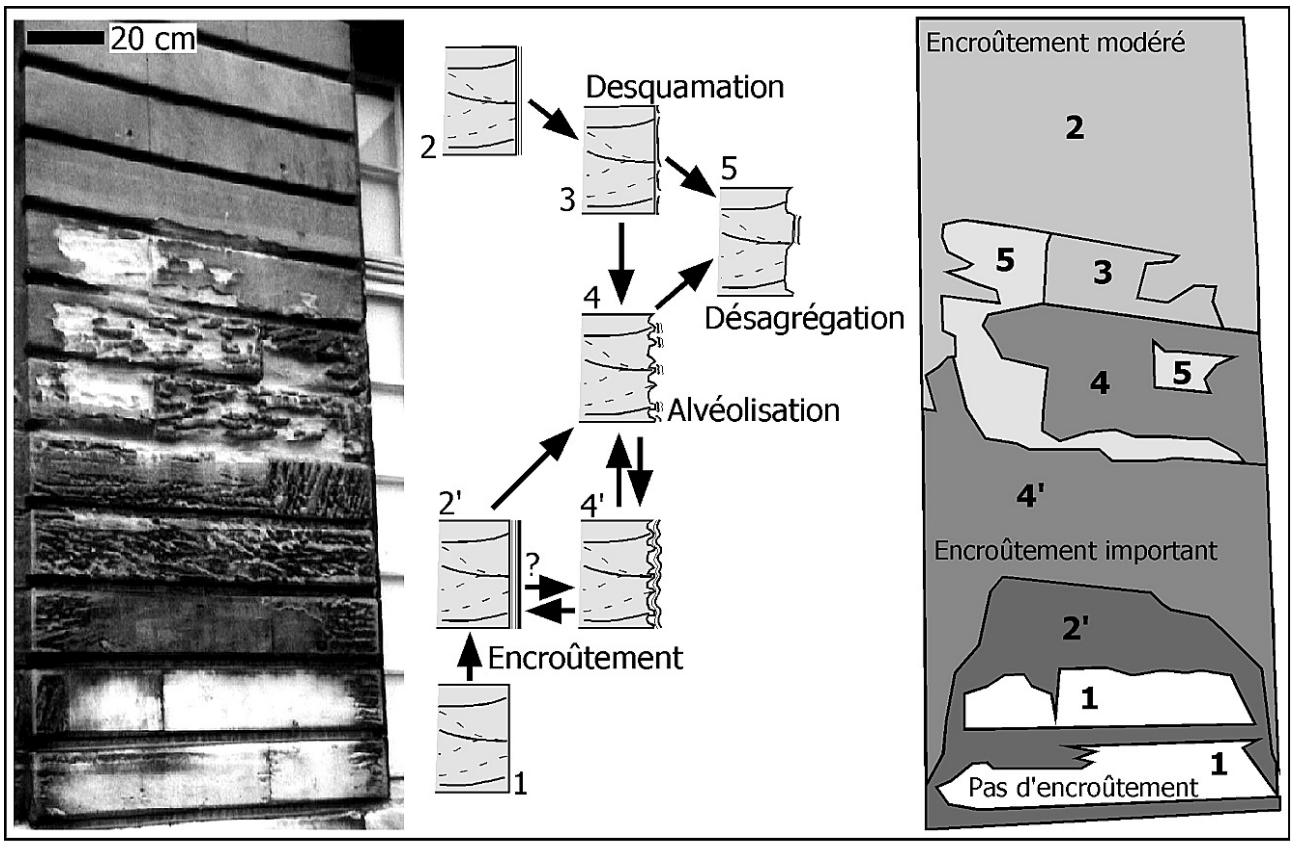


Fig. 71 : Zonation des altérations développées, Oolithe vacuolaire, mur à Châlons-en-Champagne
Evolution de la dégradation vers l'altération privilégiée (4 et 5) Alvéolisation et désagrégation

Microfissuration

En théorie, la désagrégation alvéolaire de l'Oolithe vacuolaire peut se produire selon deux processus : par dissolution progressive du ciment palissadique qui lie les éléments ou par une microfissuration et perte de cohésion.

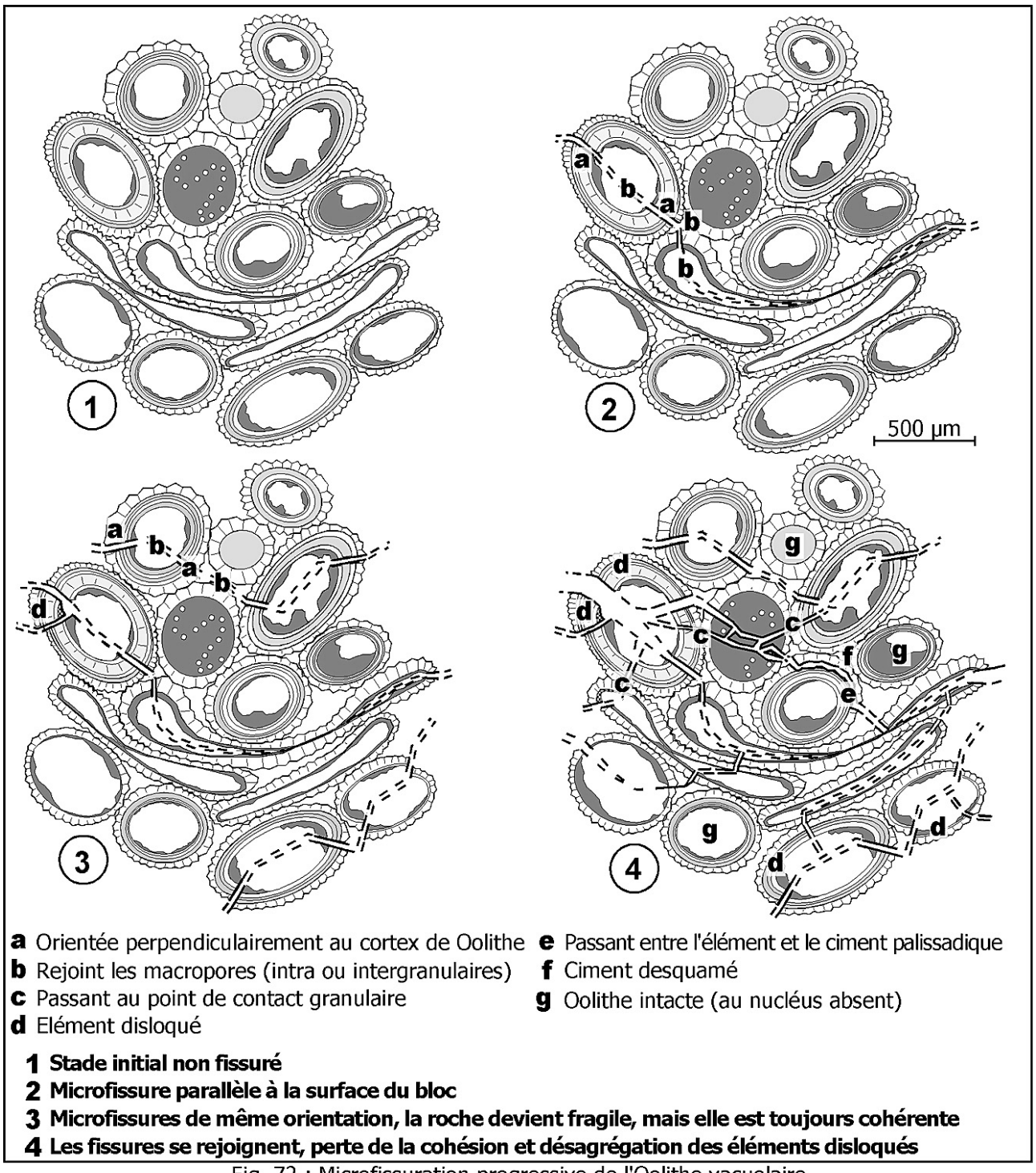


Fig. 72 : Microfissuration progressive de l'Oolithe vacuolaire
Position des microfractures par rapport aux éléments du microfaciès

Nous n'avons pas encore mis en évidence de désolidarisation d'élément par dissolution du ciment ; par contre, nous avons observé des microfractures dans tous les cas d'altération de type désagrégation ou dans les quelques cas relevés de desquamation (Fig. 69). Le microfaciès de l'Oolithe vacuolaire rend l'observation des microfissures plus aisée que dans le cas du Calcaire à débris (Fig. 65). Nous pouvons ainsi reconstituer le processus d'évolution de la microfissuration, préciser quels composants du microfaciès elle affecte (Fig. 72).

Les fissures passent préférentiellement par les éléments et ne fracturent presque pas la phase de liaison : elles traversent le cortex des oolithes (a) de façon perpendiculaire et rejoignent les macropores inter ou intragranulaires (b). Dans les autres microfaciès où le ciment palissadique est plus développé que celui représenté sur la figure 72, les fractures passent généralement au point de contact granulaire (c). Les ciments palissadiques ne sont fracturés que de façon ponctuelle (a ou c) par les microfractures qui traversent les oolithes de façon radiale. De même, elles ne séparent jamais les ciments palissadiques mais dissocient les éléments de la phase de liaison en passant au contact entre l'oolithe et le ciment palissadique (e). Ce qui est l'opposé du comportement des fissures observées dans les microfaciès à ciments syntaxiaux (Fig. 65 : Calcaire à débris et Fig. 86 : Entroquites de la Meuse). Le ciment est alors dissocié (f) et peut se retrouver dans la poudre résiduelle issue de la désagrégation totale de la roche (Fig. 77). Les oolithes peuvent être totalement disloquées (d), nous avons observé plus de 16 fragments sur une seule section d'oolithe, ou intactes (g).

Concernant l'évolution de la microfissuration, nous distinguerons deux phases principales :

- 1ère phase (stades 1, 2 et 3, Fig. 72). Les fissures sont nettement parallèles à la surface de la roche, elles fracturent les éléments perpendiculairement au cortex des oolithes et rejoignent les macropores ou passent au point de contact entre deux éléments et se poursuivent dans cet élément. Même si le nombre de fissures augmente, la roche conserve sa cohésion car les ciments palissadiques maintiennent la cohérence de l'ensemble et limitent la désagrégation. De plus, les macropores amortissent la déformation de la roche et celle-ci n'est pas trop perturbée par les cristallisation de sels ou par l'augmentation de volume consécutif à la microfissuration.

- 2ème phase (stade 4, Fig. 72). Des microfissures de deuxième génération relient les fractures déjà formées, leur orientation est parfois perpendiculaire aux fissures préexistantes et donc à la surface du bloc. Ces fractures individualisent des petits fragments de roche, dont la taille varie entre le quartier d'oolithe (ou de ciment) et le fragment de roche constitué de plusieurs oolithes encore cimentées. A partir de ce stade, la cohésion de la roche est nettement diminuée. Les fragments se retrouvent totalement dissociés les uns des autres, mais aussi par rapport au reste de la roche ; leur érosion est alors aisée et l'altération par désagrégation se développe rapidement.

Encroûtements

Le développement des encroûtements sulfatés et/ou biologiques est conditionné par le microclimat de mise en œuvre, mais quelques particularités liées à la nature de la roche peuvent être signalées. L'Oolithe vacuolaire est une calcaire très macroporeux, les macropores y sont généralement de très grande taille fréquemment supérieure au millimètre. Cette particularité favorise la migrations de sels à l'intérieur de la roche et la formation de subflorescences, c'est à dire la cristallisation de sels dans les pores internes du calcaire, même loin de la surface exposée à l'air libre. Les grands macropores intra ou intergranulaires mis en contact avec la surface atténuent l'action abrasive de la pluie battante et jouent un rôle de milieu protégé, favorisant le développement d'organismes (Fig. 73). Enfin, dans les échantillons où les cristallisations de sels sont très importantes, nous avons observé quelques cas de recristallisation des oolithes en gypse (Fig. 74a, 74b et 75), phénomène déjà décrit par Schiavon 1992 (Fig. 76), mais nous n'avons pas mis en évidence de néoformation de dolomite (Rodriguez-Navarro et al. 1997 ; Wilczynska-Michalik, 1999).

Développement d'organismes

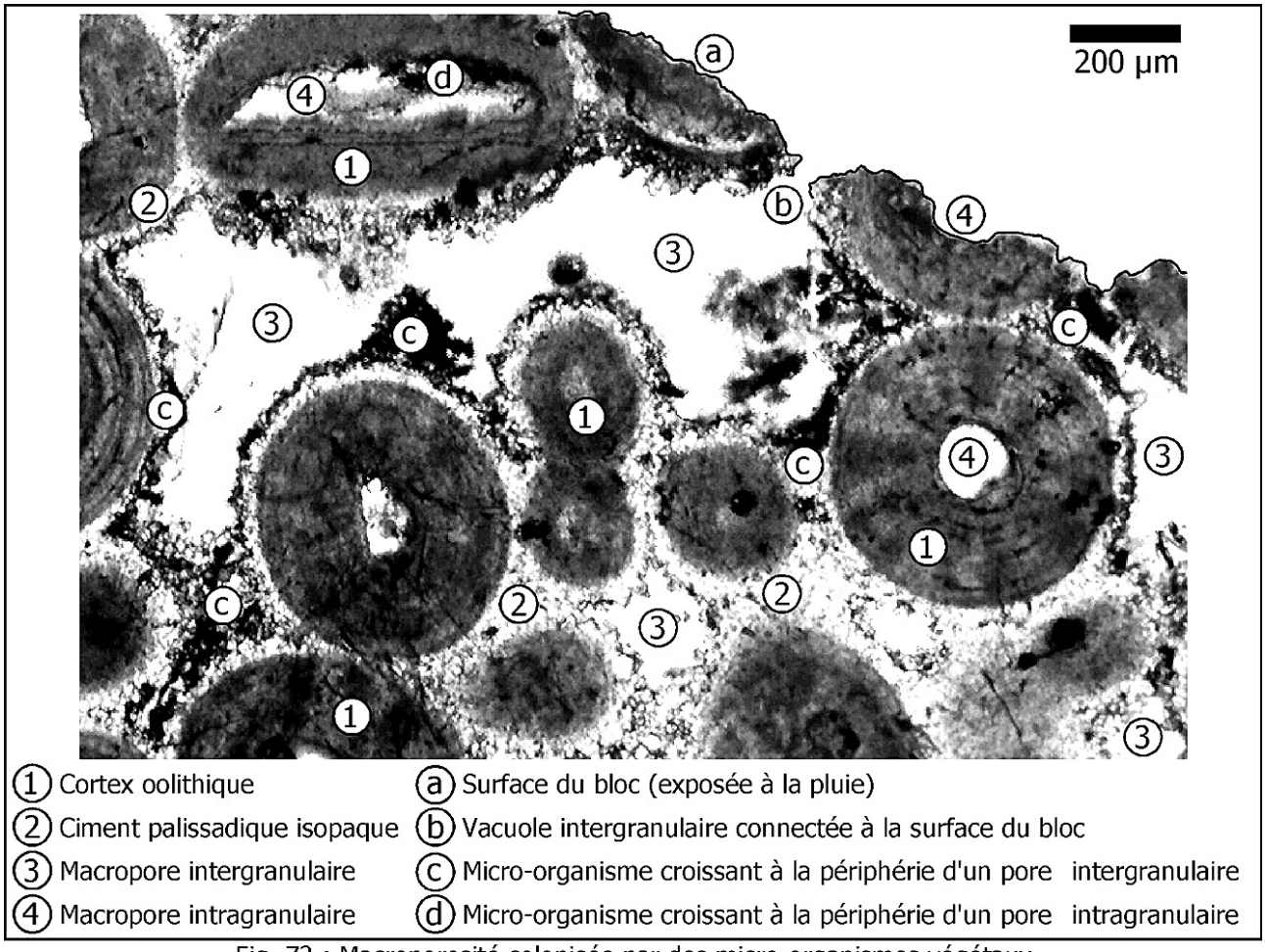


Fig. 73 : Macroporosité colonisée par des micro-organismes végétaux
Oolithe vacuolaire, Bloc en oeuvre en milieu rural (Savonnières-en-Perthois)

Sur un échantillon mis en œuvre en milieu rural (Savonnières-en-Perthois, Fig. 73), on observe la colonisation par des organismes (qui apparaissent en noir : c, au dessus des ciments palissadiques 2) de toute la périphérie d'un macropore intergranulaire. Nous avons aussi rencontré divers organismes dans les macropores intragranulaires mis en liaison avec la surface (Fig. 77). Nous n'avons pas déterminé précisément la nature de ces organismes, mais comme ils contiennent parfois de la chlorophylle (couleur verte), il s'agit sans doute d'algues ou de lichens. Même, si nous n'avons pas observé de véritable altération de la roche liée à ces colonisations biologiques, leur présence est parfois associée à des auréoles de fluorescence, souvent caractéristiques d'un début d'altération des cortex oolithiques. Enfin, il faudrait étudier précisément ces organismes (utilisation du MEB) afin de vérifier s'ils produisent des acides organiques facteur de dégradation (dissolution), ou bien, s'ils se contentent de profiter de l'opportunité de se développer dans le milieu de vie abrité constitué par les macropores de l'oolithe vacuolaire.

Recristallisation des oolithes en gypse

Dans quelques échantillons encroûtés d'Oolithe vacuolaire (efflorescences) ou contenant des cristallisations internes de sels (subflorescences), nous avons constaté que les oolithes présentaient parfois des recristallisations (Fig. 74a, 74b et 75). Nous avons alors déterminé la nature de cette recristallisation à l'aide d'une microsonde (Université de Berne) et effectué quelques mesures sur les différents niveaux de l'encroûtement. Le schéma de la croûte noire et la position de l'oolithe recristallisée sont représentés Fig. 74a, les résultats de l'analyse à la microsonde sont indiqués Fig. 74b.

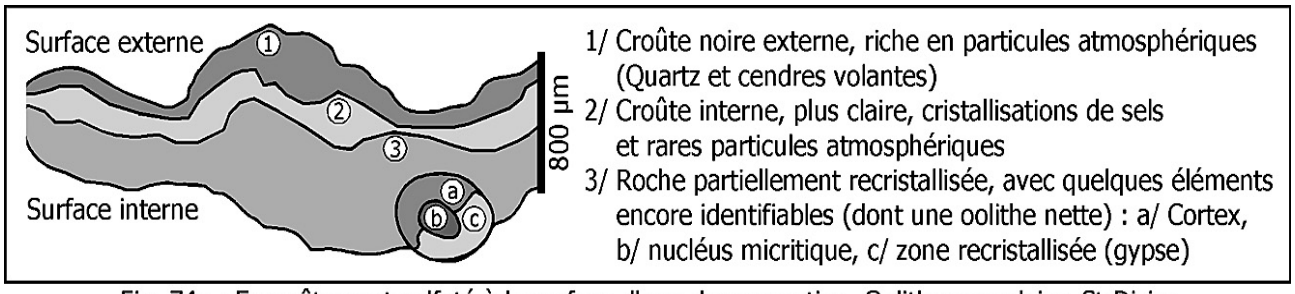


Fig. 74a : Encroûtement sulfaté à la surface d'une desquamation, Oolithe vacuolaire, St-Dizier

L'encroûtement proprement dit se compose de deux croûtes distinctes :

- Une croûte noire (notée 1 sur la Fig. 74a) contenant quelques grains de quartz et de nombreuses petites particules noires. L'analyse à la microsonde (1, Fig 74b) révèle l'abondance des éléments suivant : C, O, Al, Si, P, S, Cl, K, Ca et Fe, ce qui est couramment signalé dans les études d'encroûtements sulfatés (Lefèvre et Bougrain-Dubourg, 1992 ; Ulens, 1994 ; Fassina, 1995 ; Rodriguez-Navarro et Sebastian, 1995 ; Vleugels *et al.*, 1995). Riontino *et al*. (1998) et Sabbionni *et al.* (1998) montrent que seulement 5% du carbone présent dans

les encroûtements sulfatés ont une origine carbonatée (contre environ 45% de carbone d'origine organique) et que l'oxygène est apportée par les particules d'origine atmosphérique (SO_2, Al_2O_3, SiO_2, P_2O_5…). Les autre éléments (Al, Si, S, P…) proviennent certainement de l'accumulation de cendres volantes (charbonneuses ou métalliques) et des dépôts sulfatés liés à la pollution urbaine, phénomène très étudié (Ausset *et al.*, 1989, 1991a, 1991b, 1992, 1996… ; Diakumaku *et al.*, 1994 ; Rodriguez-Navarro et Sebastian, 1995 ; Sabbioni, 1995 …).

- Une croûte interne plus claire (notée 2 sur la Fig. 74a) qui montre une composition légèrement différente de celle de la partie superficielle et contient principalement Ca, C, O plus Si, P, S et Cl. Certains de ces composés indiquent une influence atmosphérique (notamment Si, P et Cl), mais le pic du soufre, plus prononcé que dans l'analyse de la zone externe montre l'importance des cristallisations de gypse ($CaSO_4$, 2 H_2O).

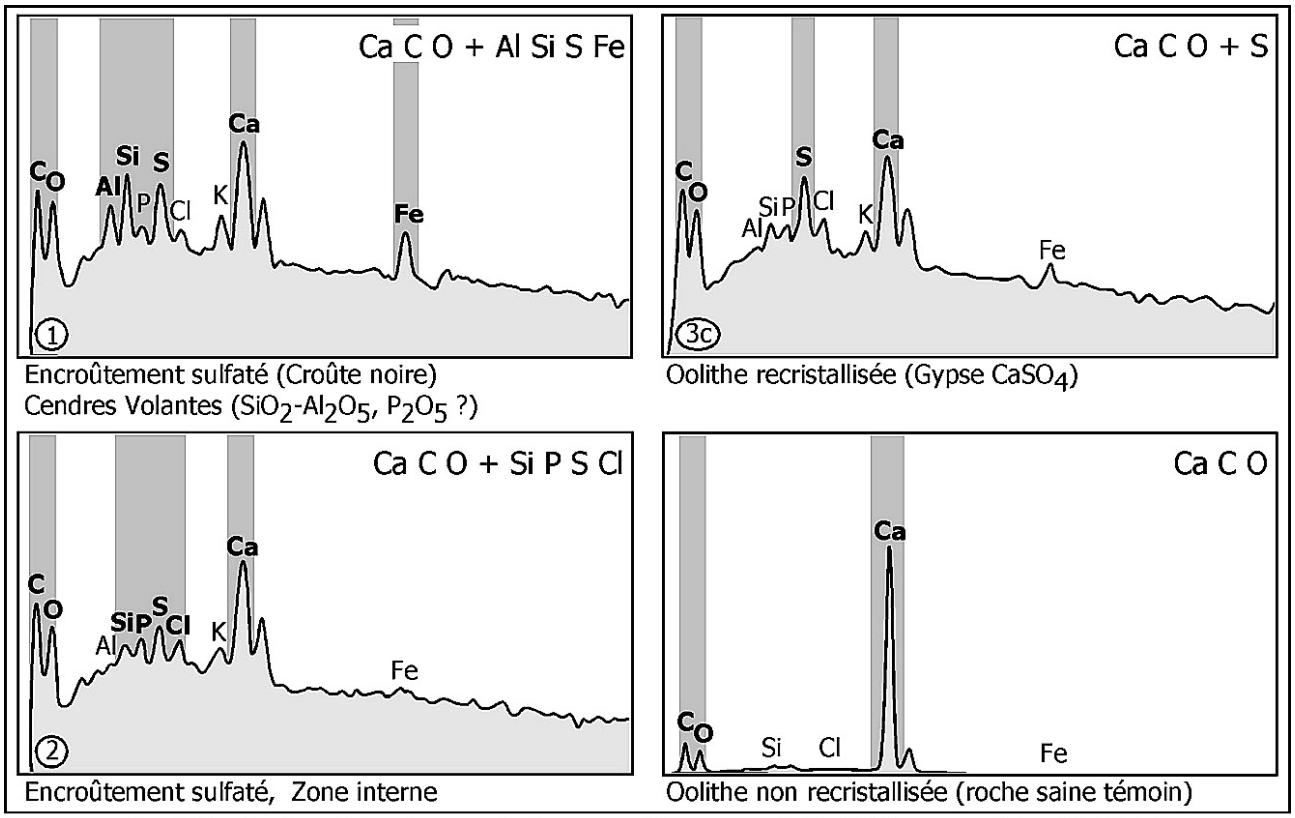


Fig. 74b : Analyse à la microsonde d'un encroûtement sulfaté, Oolithe vacuolaire (St-Dizier)
Les numéro entourés correspondent aux zones de la figure 74a

Dans la roche sous-jacente, l'analyse d'une l'oolithe partiellement recristallisée montre un pic du soufre prépondérant, ce qui confirme que le minéral principal est bien du gypse. Mais la présence d'autres éléments (notamment K et Cl) indiquerait la présence d'autres sels (comme de la sylvite de formule KCl) et une analyse plus fine de la composition chimique indiquerait certainement d'autres composés comme des nitrates. Enfin, notons que les éléments Si, Al et P sont encore enregistrés, l'oolithe recristallisée contient donc elle aussi des composés d'origine atmosphérique.

L'observation au microscope optique d'un échantillon très riche en cristallisations salines (efflorescences et subflorescences) permet de mieux comprendre le processus de recristallisation en gypse des éléments figurés d'un calcaire (Fig. 75 : échantillon 6Re5c et Fig. 76 issue de Schiavon, 1992).

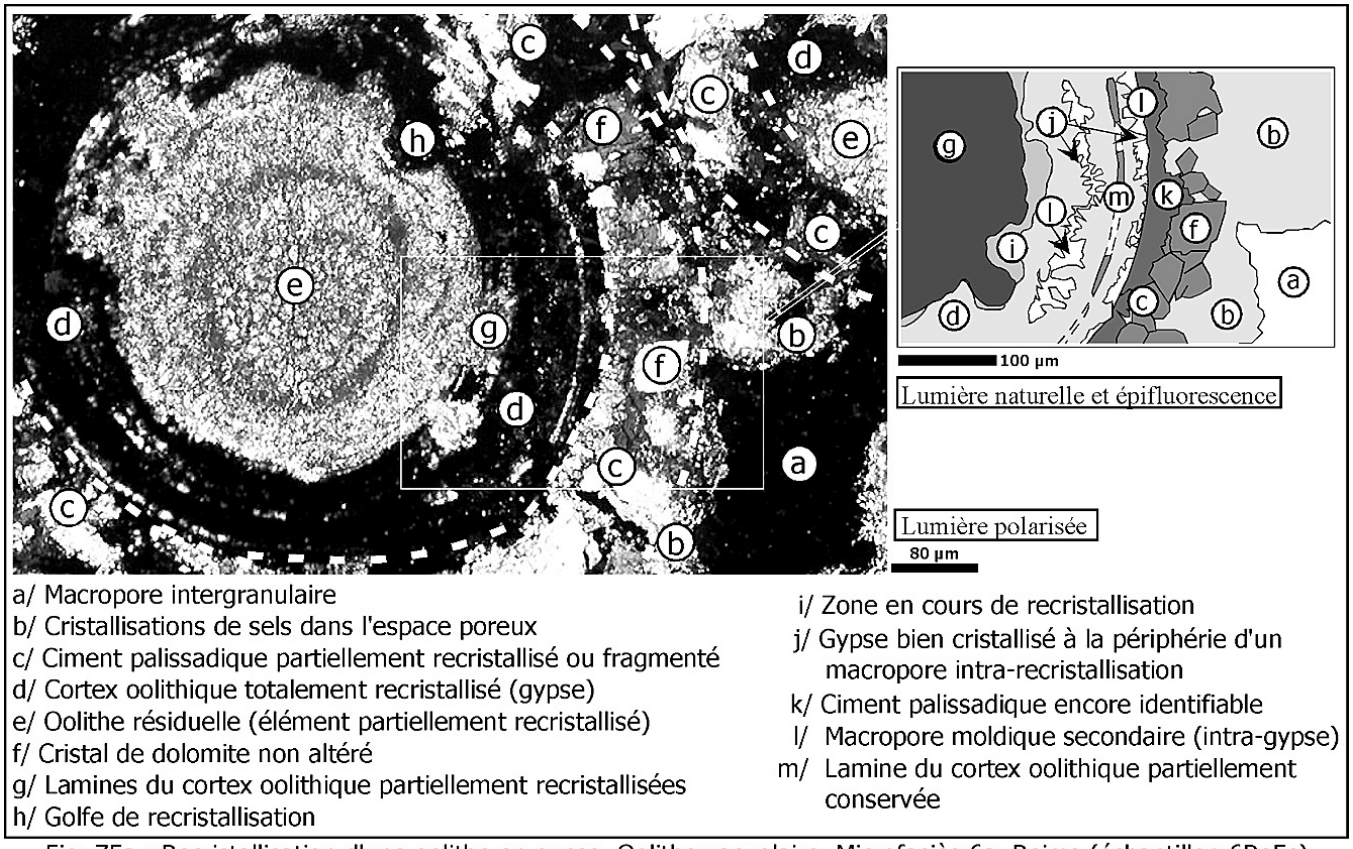


Fig. 75a : Recristallisation d'une oolithe en gypse, Oolithe vacuolaire, Microfaciès 6a, Reims (échantillon 6Re5c)

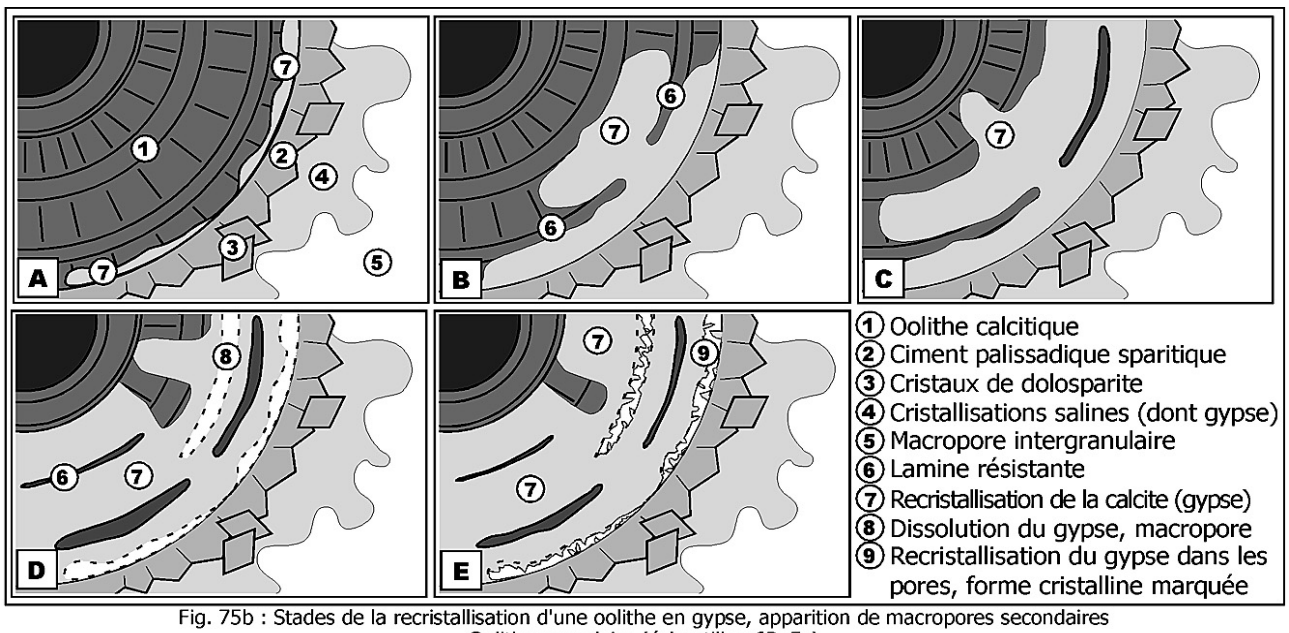


Fig. 75b : Stades de la recristallisation d'une oolithe en gypse, apparition de macropores secondaires
Oolithe vacuolaire (échantillon 6Re5c)

Nous voyons (Fig. 75a) que le cortex de l'oolithe est à moitié recristallisé (d) en un minéral cryptocristallin qui apparaît presque éteint en lumière polarisée-analysée. Au vu des analyses à la microsonde (Fig. 74b) réalisées sur un autre échantillon, nous considérerons que ce minéral est du gypse. Seules les lamines internes du cortex oolithique ainsi que le nucléus sont encore en calcite (e). De plus, le ciment palissadique est nettement visible, il est quasiment intact (c et k), même s'il ne repose plus sur l'oolithe mais sur du gypse ou sur un macropore secondaire, formé par la dissolution du gypse (l). Une zone intermédiaire entre l'oolithe calcitique et le gypse est visible en épifluorescence (j), cette zone correspond à des lamines partiellement recristallisées mais toujours visibles (g) en lumière polarisée-analysée (Fig 75a) ou à des golfes de recristallisation qui marquent la progression du gypse dans l'oolithe (h).

La reconstitution de l'évolution de la recristallisation des oolithes en gypse (Fig. 75b) montre que la transformation de minéralogie est progressive et respecte la structure de l'éléments (stades B à D). Nous montrons aussi que les lamines fibroradiées semblent plus sensibles à la recristallisation que les fines lamines concentriques. Ces dernières peuvent être conservées dans la masse de gypse, alors que le reste de l'oolithe est recristallisé (m, Fig. 75a ou 6, Fig. 75b). Le processus d'altération correspond donc à une ***épigénie de la calcite en gypse***, c'est à dire le lent remplacement d'un minéral par un autre, molécule par molécule, en conservant la structure et le volume du minéral initial (hypothèse retenue par Schiavon, 1992). Il ne s'agit pas d'une évolution en deux temps : dissolution de la calcite, puis cristallisation de gypse dans les pores qui viennent d'apparaître, hypothèse parfois retenue lors de l'étude de recristallisations liées à des encroûtements sulfatés (voir Vergès-Belmin *et al.*, 1991, Fig. 89).

La présence de macropores dans la zone recristallisée (j) peut s'expliquer par l'existence de cycles de dissolution / précipitation à l'intérieur de la zone recristallisée en gypse. En effet, les macropores ne sont jamais observés au contact du front d'altération (8 des stades D et E, Fig. 75b), mais au sein des zones recristallisées en gypse. La présence de cristaux bien exprimés à la périphérie de ces macropores serait une nouvelle précipitation de gypse dans l'espace poreux nouvellement créé. Nous pouvons donc supposer que plusieurs cycles de dissolution / précipitation de gypse se succèdent dans le temps, les épisodes de dissolution moldique gommant progressivement la structure de l'oolithe conservée lors du processus initial d'épigénie.

Pour Schiavon (1992), la transformation de la calcite en gypse ne peut se faire que de façon progressive car il remarque la préservation de fines lamines calcitiques dans des oolites recristallisées en gypse. De plus, cet auteur caractérise deux modèles de recristallisation (Fig. 76), le premier pour un calcaire oolithique à ciment sparitique grossier (sparite en mosaïque type ciment de blocage ?), le second pour un calcaire oolithique à

matrice micritique. Dans le premier cas, l'auteur met en avant deux phénomènes : la micro-fragmentation de la calcite en mosaïque, non recristallisée dont les cristaux de sparite se retrouvent dans la croûte noire et une recristallisation des oolithes par épigénie . Dans le second cas, la recristallisation affecte la matrice micritique mais pas les oolithes.

Toutefois, pour le microfaciès sparitique, l'auteur montre une recristallisation et un encroûtement ; alors que pour les microfaciès micritiques, il évoque une recristallisation et une « dissolution » de la surface. Les deux microclimats d'exposition ne sont donc peut-être pas tout à fait comparables et l'intensité de la recristallisation observée est peut-être moins forte dans le calcaire micritique que celle subie par le microfaciès sparitique (plus abrité ?).

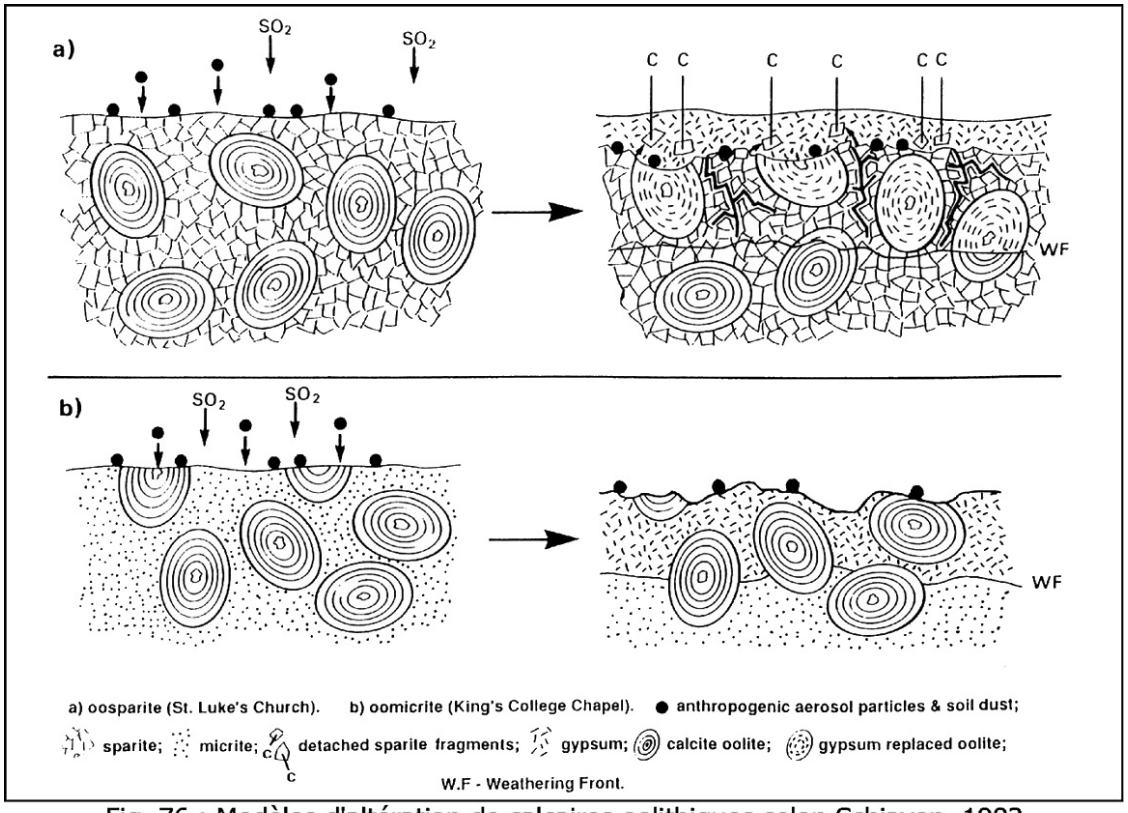


Fig. 76 : Modèles d'altération de calcaires oolithiques selon Schiavon, 1992

Le modèle de recristallisation que nous avons établi (Fig. 75b) complète les deux modes d'altération décrits par Schiavon et reflète l'importance de la macroporosité intergranulaire de l'Oolithe vacuolaire. En effet, pour ce calcaire, la recristallisation peut se produire sans altérer la phase de liaison (ciment palissadique sparitique) et donc la cohésion de la roche est maintenue, même si les oolithes sont totalement recristallisées.

Evolution télogénétique de l'Oolithe vacuolaire

L'Oolithe vacuolaire est une pierre de taille très résistante et elle offre une grande durabilité en œuvre. Les éléments de construction mis en œuvre depuis environ cent ans sont rarement altérés. Les différentes appellations de cet ensemble de pierres à bâtir sont non gélives, quelle que soit la position d'emploi de la roche. Enfin, nous n'avons pas observé de calcin à la surface de la roche.

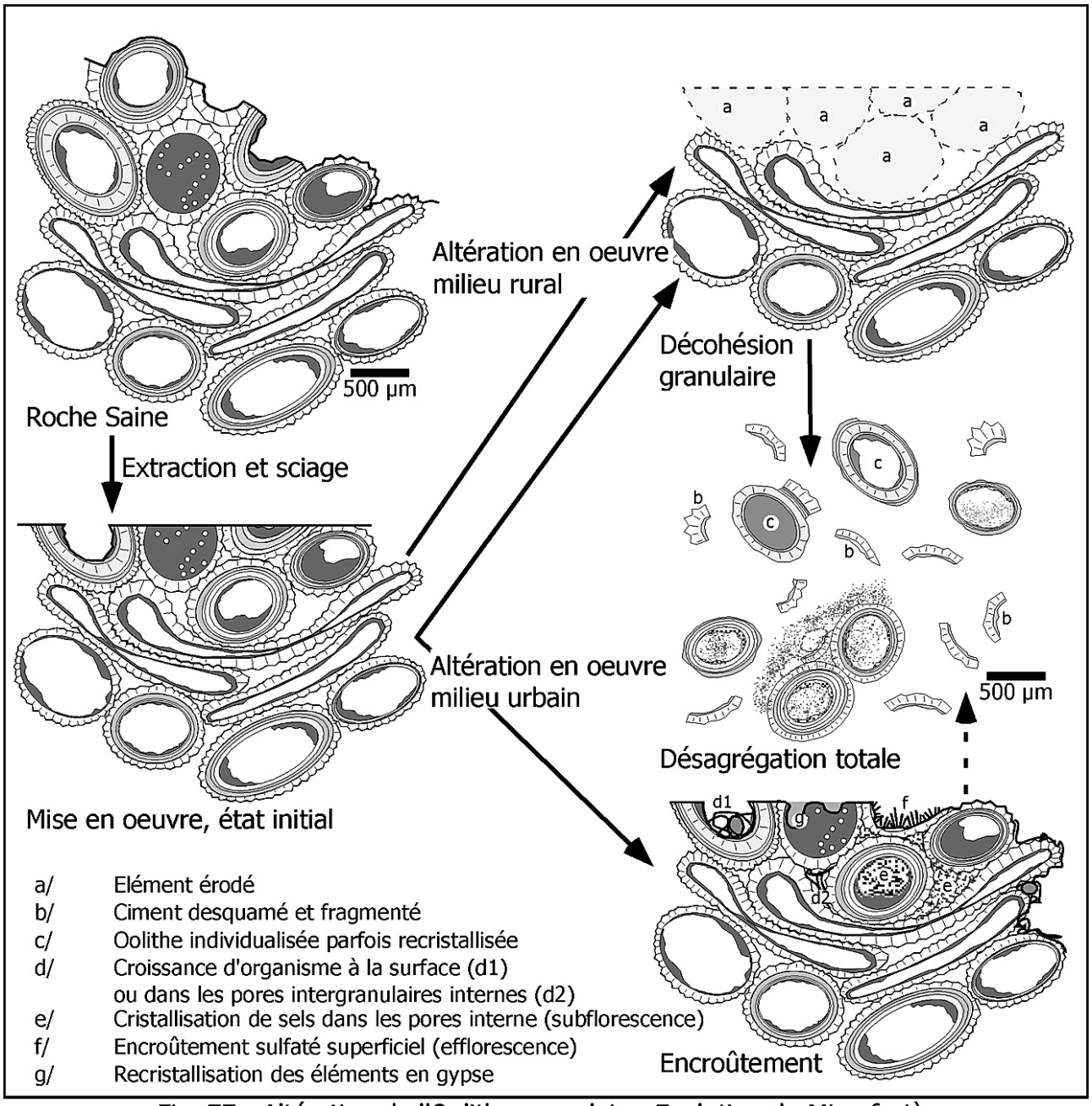


Fig. 77 : Altération de l'Oolithe vacuolaire, Evolution du Microfaciès

La porosité totale très importante (parfois près de 40% du volume total de la roche) est principalement constituée de grands macropores (plus de 500µm de diamètre) qui amortissent les dilatations liées au gel ou à la présence de sels. **La nature de la porosité** joue donc ici un rôle protecteur et augmente la durabilité en œuvre de la roche. Pourtant, la macroporosité intergranulaire très développée favorise la pénétration des sels ou des organismes à l'intérieur de la roche, ce qui devrait entraîner des altérations (Fig. 77). Mais dans le cas de l'Oolithe vacuolaire, la nature de la cimentation se révèle très résistante à la recristallisation saline (Fig. 75a et 75b) et à la microfissuration (la roche peut être totalement laminée par les microfissures et conserver un certain degré de cohérence, Fig. 72). Nous montrons donc qu'une importante **phase de liaison de type ciment palissadique** sparitique assure à la roche un fort taux de cohésion entre les éléments, ce qui n'était pas le cas pour le Calcaire à débris.

Cependant, la fréquence des désagrégations granulaires indique que **l'absence de calcite de blocage et la forte macroporosité intergranulaire** induisent à terme une désolidarisation progressive des éléments (Fig. 77), soit par destruction du ciment palissadique (*dissolution* ou *microfragmentation*), soit par *microfissuration*. En effet, ce calcaire présente une altération privilégiée de type désagrégation alvéolaire et montre deux types de comportements :

- En milieu rural, la roche non encroûtée est altérée de façon très progressive et de larges alvéoles se creusent, les inter-lits et les limites de blocs sont mis en relief par la désagrégation alvéolaire.

- En milieu urbain pollué, on peut observer une première étape avec la formation de petites alvéoles, mais celle-ci disparaissent ensuite avec l'extension de la désagrégation. Des îlots de croûte superficielle sont individualisés par la désagrégation sableuse (érosion différentielle), puis les encroûtements sont sapés par la décohésion sous-jacente et elles se désolidarisent du bloc (fragmentation). Enfin, comme la roche est très pulvérulente (riche en sels) et friable, la désagrégation tend à homogénéiser les reliefs et l'altération affecte toute la surface (décohésion granulaire généralisée).

A la différence de la désagrégation alvéolaire du Calcaire à débris, l'alvéolisation de l'Oolithe vacuolaire tend à affecter toute la roche, sans particulièrement surcreuser les litages aux microfaciès plus altérables. L'altération est donc ici principalement conditionnée par la nature générale du microfaciès (granulaire, peu cimenté et à forte macroporosité intergranulaire), et tous les litages obliques de tous les blocs mis en œuvre réagissent suivant le même schéma d'organisation. La désagrégation alvéolaire est privilégiée par le taux de cohésion entre les éléments, limité par le **faible développement de la cimentation** qui, n'obture jamais complètement la macroporosité intergranulaire.

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altération privilégiée par la caractéristique
Obturation partielle de la porosité intergranulaire Absence de calcite de blocage	Développement de la cimentation, Valeur de la macroporosité	Forte sensibilité à la désagrégation
Grands macropores très abondants	Nature de la porosité	Non gélivité, compensation des dilatations
Ciment principal de type palissadique	Nature des phases diagénétiques	Résistance à la microfissuration

Tab. 21 : Caractéristiques de l'Oolithe vacuolaire qui conditionnent son comportement en œuvre.

Nous pouvons aussi classer les composants du microfaciès selon leur sensibilité à l'altération :

- Les fissures passent préférentiellement à l'intérieur des éléments qu'elles fracturent perpendiculairement aux cortex oolithiques. Les points de contacts entre les ciments palissadiques ne sont quasiment pas fracturés, alors que le ciment est parfois désolidarisé de l'élément qu'il entoure (desquamation du ciment palissadique).

- Les ciments palissadiques et les éventuelles plages de dolomite sont plus résistants à la recristallisation en sels que les oolithes, qui se transforment progressivement par épigénie. La minéralogie (dolomite ou calcite) et la taille des cristaux de calcite (nanograins ou sparite) influence donc nettement le comportement de la roche face à la recristallisation en gypse.

- La surface de contact entre les oolithes et les ciments palissadiques semble un site privilégié d'altération, puisqu'il s'agit à la fois d'une zone très facile à fracturer et du point de départ des recristallisations salines. Dans certains échantillons récoltés en carrière, nous y avons même constaté de légères traces de dissolution ou de dolomitisation.

Sensibilité à la microfissuration	
1	Cortex des Oolithes
2	Liaisons Cp / Eléments
3	Pelletoïdes
4	Ciments palissadiques (Cp)
5	Contacts Cp / Cp

Sensibilité à la microfragmentation	
1	Ciments palissadiques (Cp)
2	Pelletoïdes
2'	Cortex des Oolithes

Sensibilité à la recristallisation	
1	Pelletoïdes
2	Cortex fibroradié (oolithes)
3	Cortex lamellaire (oolithes)
4	Ciments palissadiques (Cp)
5	Cristaux de dolomite

Tab. 22 : Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.

3/ Altération du Calcaire grossier :

Généralités :

Altération in-situ :

L'altération in-situ du Calcaire grossier ne peut véritablement être observée dans la région rémoise car les carrières de taille sont principalement souterraines. Les rares fronts de tailles à ciel ouvert sont recouverts par la végétation. Toutefois, il reste possible d'observer une cristallisation de calcite en surface soit sous la forme de patine, c'est à dire de calcin (carrière à ciel ouvert de Treslon), soit sous la forme de concrétions de calcite (dans les carrières souterraines de Courville). De plus, dans une carrière souterraine du Mont-Chatte (Hermonville, site 2He), nous avons remarqué que le banc inférieur (microfaciès type 2c, voir page 120) est recouvert d'une croûte siliceuse.

Vers l'intérieur du bassin de Paris, où la formation du Calcaire grossier est plus épaisse, les carrières à ciel ouvert contiennent de nombreux indices d'encroûtements. On observe parfois des traces de fragmentation et l'apparition d'un débit en plaquettes.

Altération en œuvre :

En milieu rural (Courville, Hermonville), les blocs de calcaire micritique présentent une couleur brun crème très particulière. L'absence de trace de dissolution conduit à penser que cette coloration soit en partie provoquée par l'apparition d'une patine superficielle de type calcin.

Quelques ravinements ont été observés sur des blocs très exposés à la pluie battante (utilisation en bandeau, corniche ou statuaire). Il s'agit généralement de calcaire légèrement desquamés et donc déjà fragilisés par des cristallisations de sels. Les traces de dissolutions de surface sont très fréquentes et aboutissent à la mise en relief des éléments plus résistants : généralement des bioclastes.

Les desquamations sont très nombreuses : les blocs légèrement abrités de la pluie présenteront un décollement pelliculaire alors que les éléments très exposés sont altérés plus profondément avec apparition de desquamations en mille-feuille. L'association entre les décollements et les croûtes noires est très fréquemment constatées en association avec la pulvérulence de la roche sous-jacente, alors que les blocs desquamès en feuillets sont plus rarement encroûtés (zone d'exposition soumise à la pluie ruisselante ou battante).

L'alvéolisation du Calcaire grossier n'est pas observée à Reims, par contre cette morphologie d'altération apparaît dans les environs de Ventelay (voir Fig. 35) ainsi qu'à l'ouest de Fismes (régions 5 et 6 de la Fig. 36,

Soissonnais et Tardénois). Plus loin vers l'Ouest (à St-Leu d'Esserent ou à Noyon), l'alvéolisation et la désagrégation granulaire sont très couramment observées et deviennent même les formes d'altération les plus répandues. Les autres formes de désagrégation sont assez rares : quelques cas à Reims (Musée Saint-Rémy), où les angles des blocs de soubassement sont en Calcaire à cérithes.

Les fragmentations sont généralement liées a une importante *fissuration* et apparaissent principalement dans des positions architecturales où les écarts thermiques sont très importants : par exemple en bandeau, en corniche ou pour l'utilisation en statuaire.

Les encroûtements sulfatés et les (re)cristallisations en gypse sont très fréquents en milieu urbain et relativement rares en milieu rural où le Calcaire grossier présente une très bonne durabilité en œuvre.

Enfin, nous n'avons pas observé de réelles altérations provoquées par des organismes, même si certains échantillons se sont avérés très riches en encroûtements algaires. Pourtant, dans certains cas, la présence de traces de fluorescences à la périphérie des organismes laisse supposer que ceux-ci jouent un rôle dans la dégradation de la roche (et plus particulièrement dans le démantèlement des couches de calcin).

Description des altérations :

Patine

En milieu rural, la surface des blocs de Calcaire grossier type Pierre de Courville (microfaciès type 1a) présente une couleur crème caractéristique. Cette accentuation de couleur est liée à la formation d'un calcin, c'est à dire une fine couche de calcite microcristalline (micrite) légèrement plus sombre que la roche elle-même. Mais, à l'opposé de nos observations sur le Calcaire à débris (voir Fig. 60 et description page 14), nous n'avons pas constaté, au microscope optique, d'accumulation d'oxydes et d'hydroxydes de fer.

Les couches de calcin sont généralement citées pour leur propriétés protectrices et leur présence conditionne parfois directement la durabilité au gel de la pierre en œuvre : comme dans le cas de la craie (Gerdeaux, 1981, Jacquemin, 1981). Mais l'importance réelle du calcin dans la durabilité du Calcaire grossier ne pourrait être prouvée qu'à partir de test de vieillissement (artificiel ou naturel) et de la comparaison d'échantillon de microfaciès identique avec ou sans calcin.

Pourtant, des échantillons de Calcaire grossier microfaciès type 1a (équivalent de la pierre de Courville), montrent que le calcin protège la pierre des recristallisations superficielle en gypse (voir Fig. 83). En effet, on observe que la partie inférieure de l'encroûtement sulfaté ne présente pas de zones d'épigénie de la calcite en sels. L'altération progresse latéralement sous le calcin, à partir d'un accident de surface (impact d'outil ?) où la patine, composée de micrite grise, était sans doute peu développée voire absente.

Enfin, notons que l'évolution des couleurs et l'acquisition de la patine semble particulière pour le banc de Liais veiné de bleu, caractéristique de la carrière Saint-Julien à Courville. D'après diverses communication orales (M Tourtebatte et M. Lécaille), la couleur bleue du banc de Liais s'accentue au cours du temps et les différences avec le reste du bloc augmentent. N'ayant pas examiné d'échantillon de Liais de Courville veiné exposé en œuvre depuis une longue période, nous ne savons pas si une patine contenant du fer réduit peut se former à la surface de la roche. Mais, il est possible de penser que l'accentuation de l'aspect veiné soit provoqué par la prise de patine du reste du bloc, alors que le calcin ne se forme pas dans la zone bleutée. En effet, l'aspect très « cristallin » de cette veine est lié à l'important taux de recristallisation de la matrice micritique (cf. Fig. 48a et 48b, pages 123 et 124) et à une porosité résiduelle moins importante, ce qui limite les circulations de fluide et donc la formation de patine.

Dissolution

Les traces de ravinements sont assez rares et n'apparaissent qu'avec l'action érosive de l'eau ruisselante, cette altération est donc conditionnée par la position architecturale d'utilisation et le microclimat d'exposition. Dans certains cas, les ravinements se produisent sur des surfaces déjà altérées : comme la zone pulvérulente centrale de certains décollements pelliculaires, ou érodent la roche plus tendre : bioturbations par exemple.

La mise en relief des éléments bioclastiques est un autre indice de dissolution superficielle. Les éléments les plus résistants à cette altération sont les débris d'échinodermes, parfois presque totalement dégagés de la paroi (observation de pièces d'étoiles de mer : cathédrale de Noyon et 57 rue de Metz à Reims).

Desquamation

Les desquamations sont très fréquemment observées, à Reims, elles représentent le plus important type d'altération (hors encroûtements sulfatés). Nous distinguerons deux morphologies de desquamations, dont les processus de formation et d'évolution sont nettement distincts :

- Le premier type est observé sur les blocs utilisé en bandeau ou en soubassement. L'épaisseur de roche altérée est importante (jusqu'à parfois près de 10 centimètres) et la dégradation correspond à un écaillage ou un débit en mille-feuilles. La longueur des petites écailles est d'ordre centimétrique pour une épaisseur maximale d'un demi centimètre, elles ne sont pas encroûtées et elles sont très cohérentes (pas de pulvérulence). Le processus d'altération n'est donc pas lié à des cristallisations de gypse à l'intérieur de la roche, mais plutôt à un processus physique comme le gel. En effet, les blocs affectés par cette desquamation occupent des positions architecturales très agressives (fréquents cycles gel-dégel) et les caractéristiques de résistance au gel du Calcaire grossier type Courville sont insuffisantes. Ainsi, alors que la porosité et le coefficient de saturation en eau

placent cette roche en zone 3 des aptitudes d'emploi : utilisation en élévation, rejaillissement, bandeau et corniche, Fig. 40), il apparaît très nettement que ce calcaire ne doit pas être utilisé en bandeau.

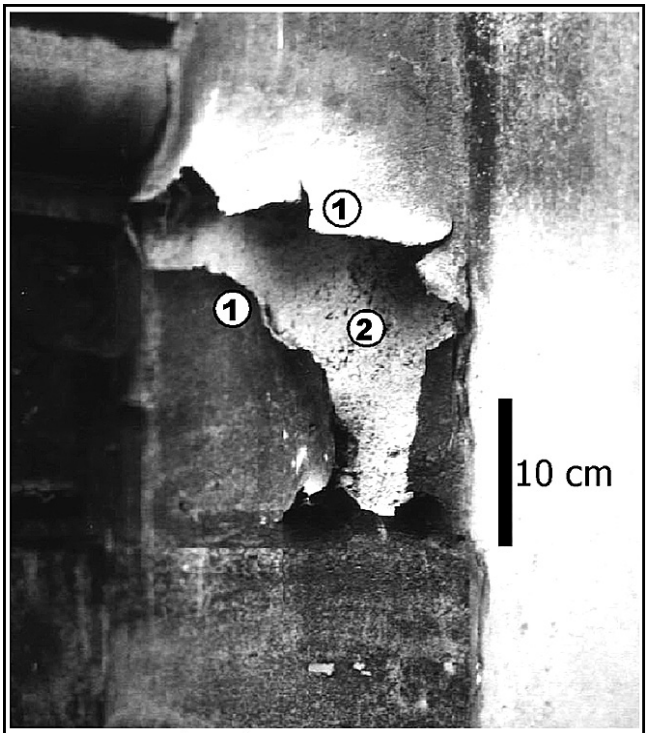


Fig. 78 : Décollement superficiel (desquamation)
Calcaire grossier (faciès micritique)
Eglise Saint-André, Reims (51)

- Dans le second cas, un mince feuillet se desquame, soit sous la forme de cloques réparties sur toute la surface du bloc) ou bien en une large feuille, d'épaisseur inférieure au centimètre (Fig. 78) qui se décolle progressivement de la paroi. La roche sous-jacente est très friable et les feuillets desquamés sont en partie recouverts par une encroûtement sulfaté. Le processus de desquamation est nettement lié à la présence de sels et le mode de formation de cette altération correspond à celui décrit par Rautureau *et al*, 1999, pour les tuffeaux de Touraine (Fig. 79).

La desquamation est principalement causée par l'encroûtement superficiel (ici une croûte noire) qui colmate les pores situés à la surface du bloc (stade b/, Fig. 79). Les fluides ne peuvent s'évaporer en surface et les sels cristallisent à l'intérieur de la roche (subflorescences), sous la croûte moins perméable.

L'apparition de ces décollements superficiels peut parfois être corrélée à la présence de bioturbations et aux auréoles d'oxydes de fer qui les soulignent (Fig. 42). L'importance des terriers, contenant un sédiment fin et plus micritique que le calcaire encaissant (et plus microporeux ?) est donc à souligner car ils paraissent plus sensibles à la desquamation pelliculaire que le microfaciès de référence.

Microfissuration

La desquamation est principalement provoquée par une intense microfracturation (zone C/, Fig. 80), probablement induite par la formation d'une zone d'anisotropie d'orientation parallèle à l'interface roche / atmosphère ou aux limites de bloc (processus décrit Fig. 79). On remarque pourtant que les fissures s'organisent en faisceaux et que leur orientation varie à l'approche de la surface de la roche. En effet, si en profondeur les fractures sont parfaitement parallèles aux contours des éléments architecturaux, nous avons constaté

l'apparition de groupes de fissures globalement perpendiculaires aux surfaces de desquamations (zones A et B, Fig. 80). Dans certains échantillons, ces fractures pénètrent la roche sur plusieurs millimètres (et parfois plus d'un centimètre) en participant au déchirement des desquamations. Cette variation de logique de fissuration est peut-être à rapprocher du colmatage superficiel de la microporosité de la roche (stade C, fig. 79), les fissures perpendiculaires à la surface étant inscrite dans la « croûte » colmatée alors que les fissures parallèles à la surface sont affectent la roche sous-jacente.

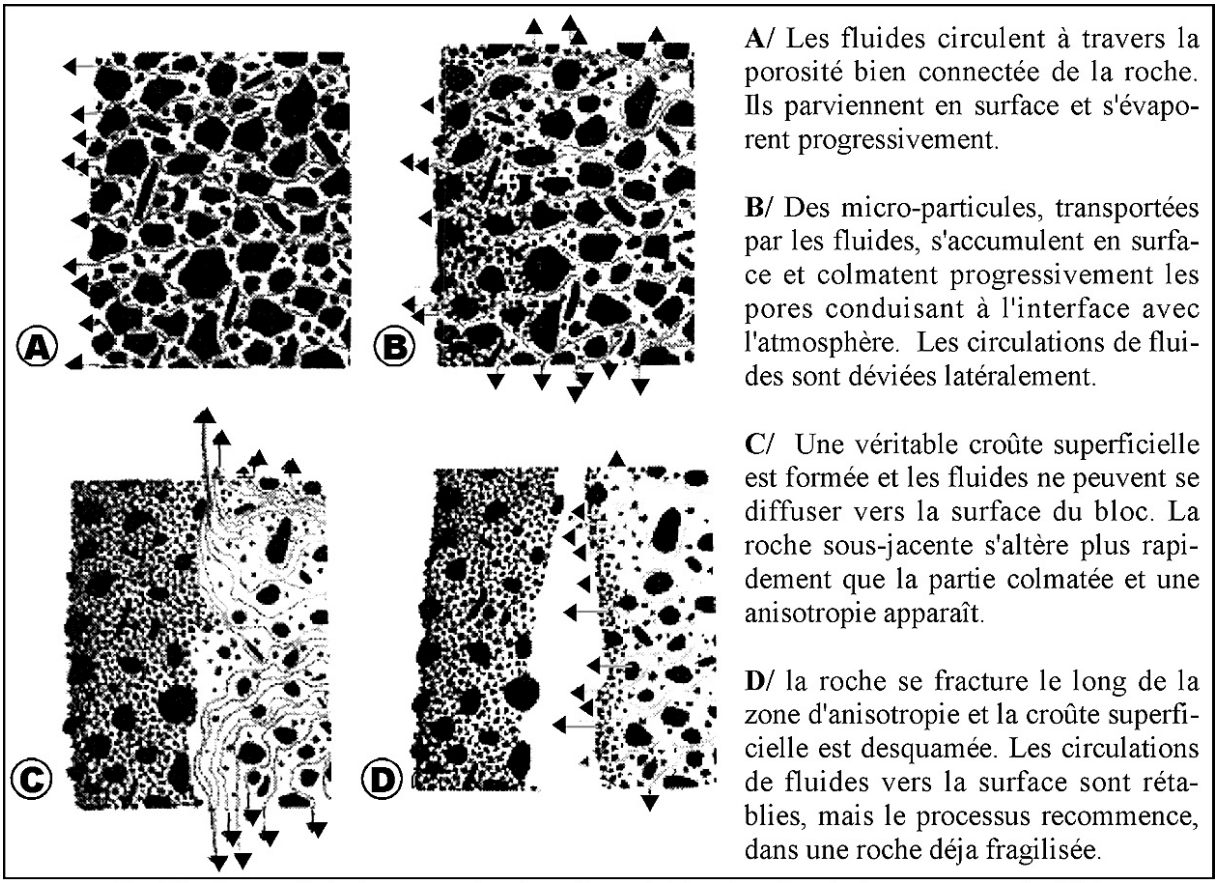


Fig. 79 : Etapes de la desquamation du tuffeau de Touraine d'après Rautureau *et al.*, 1999

De plus, les tracés préférentiels des microfractures varient selon la quantité d'éléments contenus dans la matrice micritique. La présence d'une sparite secondaire dans les pores intragranulaires des bioclastes (notamment des Milioles) joue également un rôle. Nous pouvons opposer au moins trois types de comportements :

- dans les microfaciès contenant peu d'éléments (mudstone et wackestone), les fractures sont dispersées dans la matrice micritique, sans organisation apparente, en passant parfois au contact entre les éléments et la matrice micritique ;

- dans les microfaciès contenant de nombreux éléments figurés (packstone), les fractures ont un tracé préférentiel passant par les éléments macroporeux (loges de Milioles par exemple) et par les macropores primaires ou moldiques ;

- dans les microfaciès contenant de nombreux éléments figurés (packstone) dont les pores sont obturés par de la sparite secondaire, les fractures ont un tracé préférentiel passant à la limite des éléments figurés (Foraminifères, algues calcaires, quartz…) et par les macropores imparfaitement clos par la cimentation.

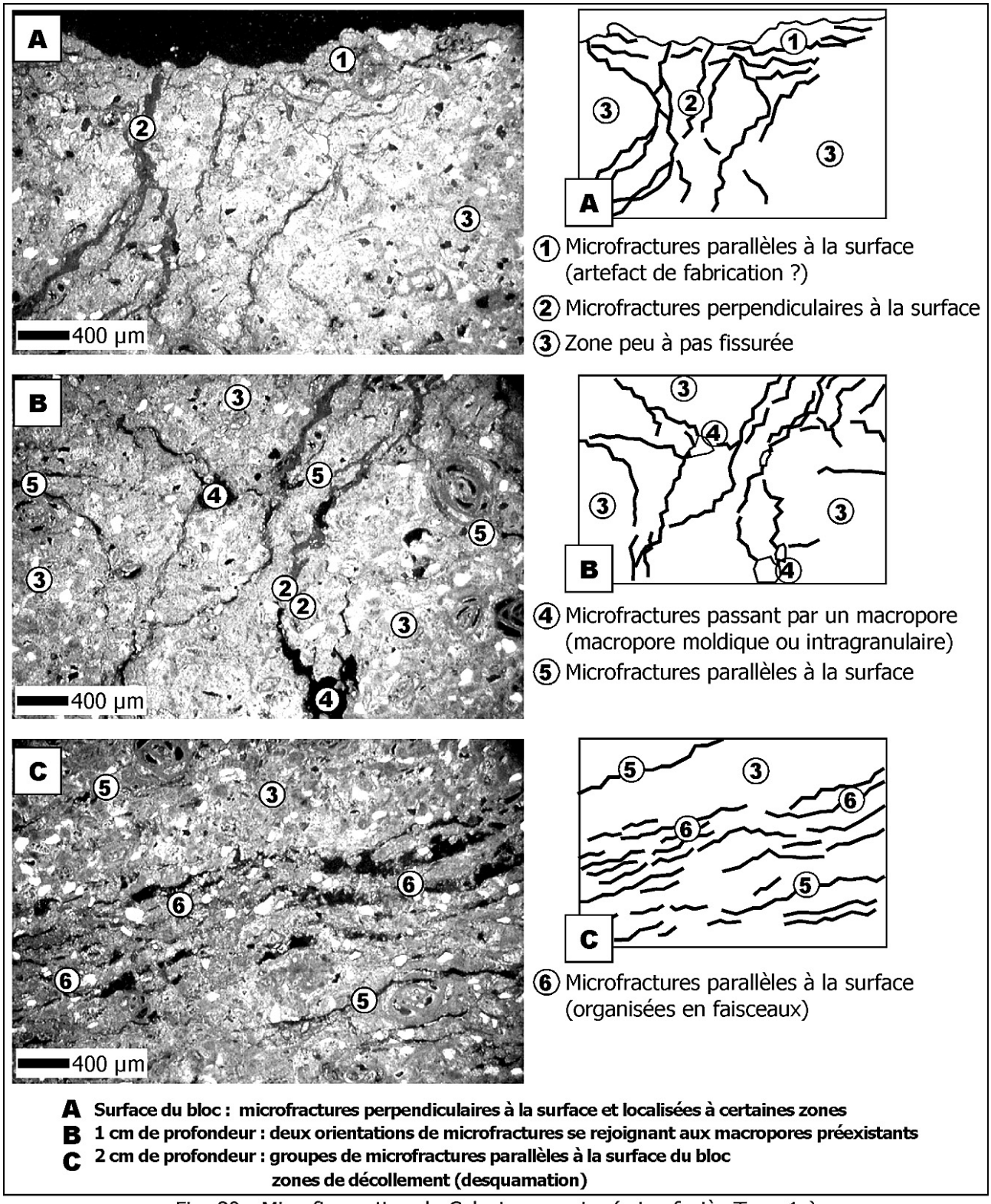


Fig. 80 : Microfissuration du Calcaire grossier (microfaciès Type 1c)
Organisation et orientation des microfractures

Désagrégation

Les traces macroscopiques de désagrégation ne sont jamais observées sur la Pierre de Courville, en revanche vers le centre du bassin de Paris (St-Leu-d'Esserent, Noyon) les traces d'alvéolisation sur des pierres du Calcaire grossier sont très nombreuses. Les désagrégations alvéolaires se développent principalement sur les microfaciès granulaires légèrement cimentés (microfaciès type 2a, Fig. 81). Les alvéoles sont peu profondes et soulignent les litages obliques, l'altération se généralise parfois à toute la surface du bloc, mais ces désagrégations généralisées sont moins marquées que celle observées sur l'Oolithe vacuolaire.

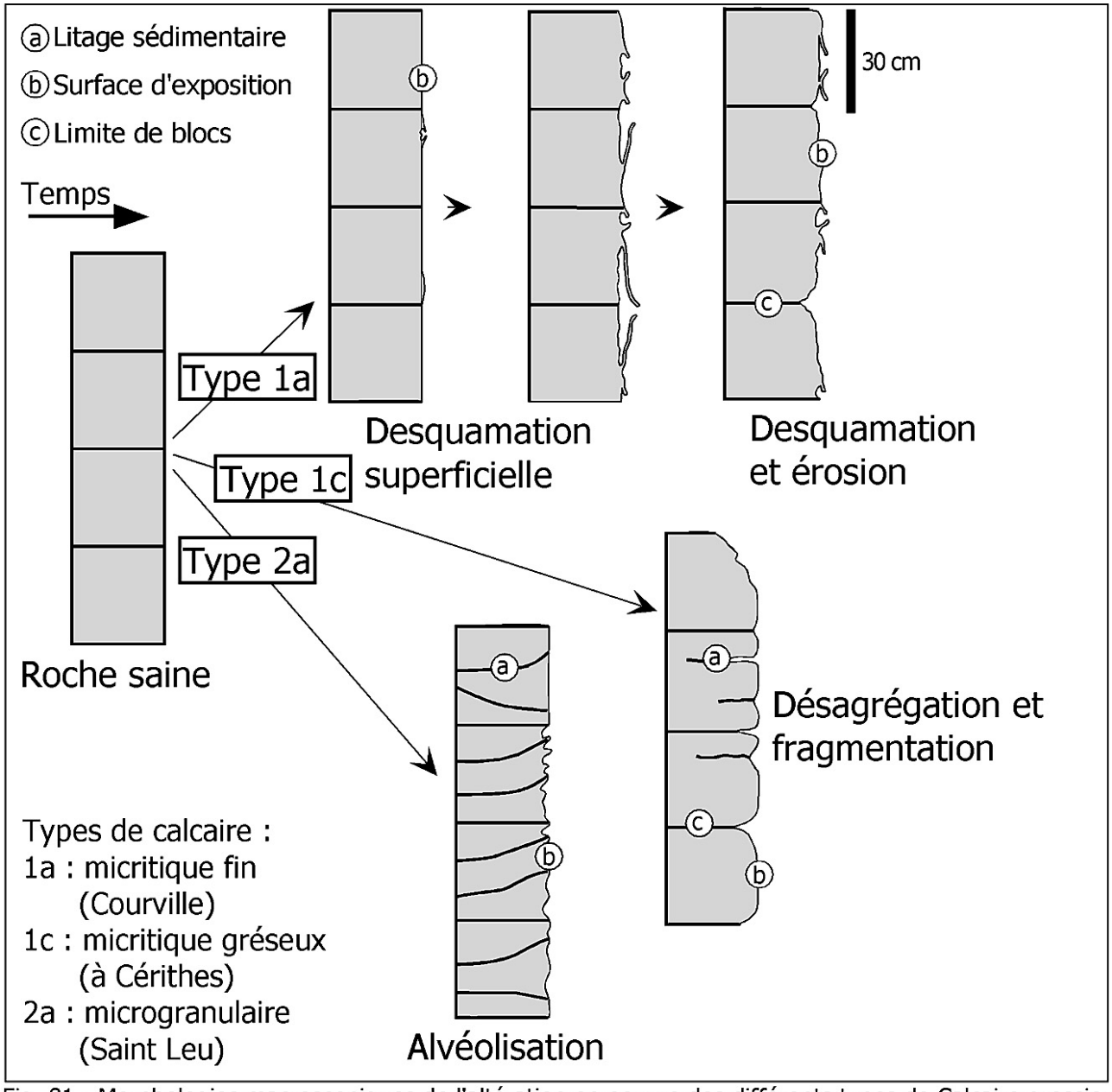


Fig. 81 : Morphologies macroscopiques de l'altération en oeuvre des différents types de Calcaire grossier

Une autre morphologie de décohésion s'observe parfois sur des blocs micritiques hétérogènes de Calcaire à Cérithes (microfaciès type 1c, Fig. 81). Il s'agit d'une désagrégation associée à une fragmentation puisque les blocs sont intensément fissurés et que les débris ont parfois une taille supérieure au centimètre.

Encroûtements

Recristallisation superficielle

La principale caractéristique des encroûtements sulfatés développés sur les faciès micritiques du Calcaire grossier est l'importance de la zone de recristallisation en gypse (et autres sels) voir Fig. 82. En effet, la zone épigénisée atteint parfois plus d'un centimètre de profondeur (croûte noire d'accumulation non incluse).

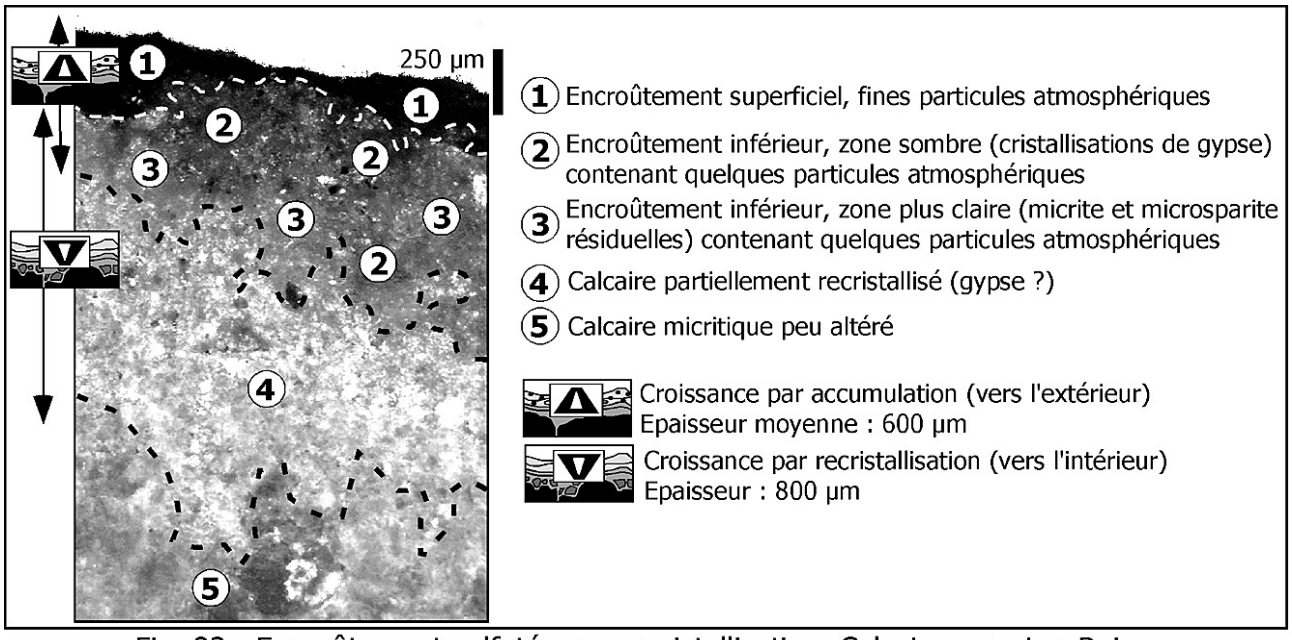


Fig. 82 : Encroûtement sulfaté avec recristallisation, Calcaire grossier, Reims

L'encroûtement figuré ci-dessus ne présente pas de couche de calcin, les recristallisations en profondeur montrent une stratigraphie liée au degré d'épigénie de la roche. La croûte noire superficielle (couche 1) n'est pas bipartite, à l'opposé des encroûtements sulfatés généralement observés dans les autres échantillons (voir Fig. 67 et 74a). La couche inférieure, riche en gypse bien cristallisé est absente. En revanche, dans la roche sous-jacente, on remarque des zones plus sombres (notées 2) qui correspondent à des « poches » de gypse mieux exprimé. Les dépôts atmosphériques pénètrent facilement dans la roche et le gypse épigénise progressivement le calcaire, tandis que le front d'altération avance vers l'intérieur du bloc (noté 4, Fig. 82).

Importance du calcin, développement d'organismes

Dans le second type d'encroûtement (Fig. 83), la zone de recristallisation en gypse est très limitée, voire absente de la surface du bloc. Une croûte noire est présente (notée 1), mais elle ne pénètre pas dans la roche sous-jacente. La zone superficielle du calcaire (3) est plus sombre que le reste du microfaciès (4 et 5), cette fine couche de calcite microcristalline sombre (micrite) est interprétée comme correspondant à un calcin (dont la limite extérieure a été soulignée pour plus de lisibilité). Le rôle protecteur de la couche de calcin qui limite la progression du gypse vers l'intérieur de la roche est ici mis en évidence. Même si, à un plus fort grossissement des traces d'altération sur la face externe de la frange micritique sont visibles.

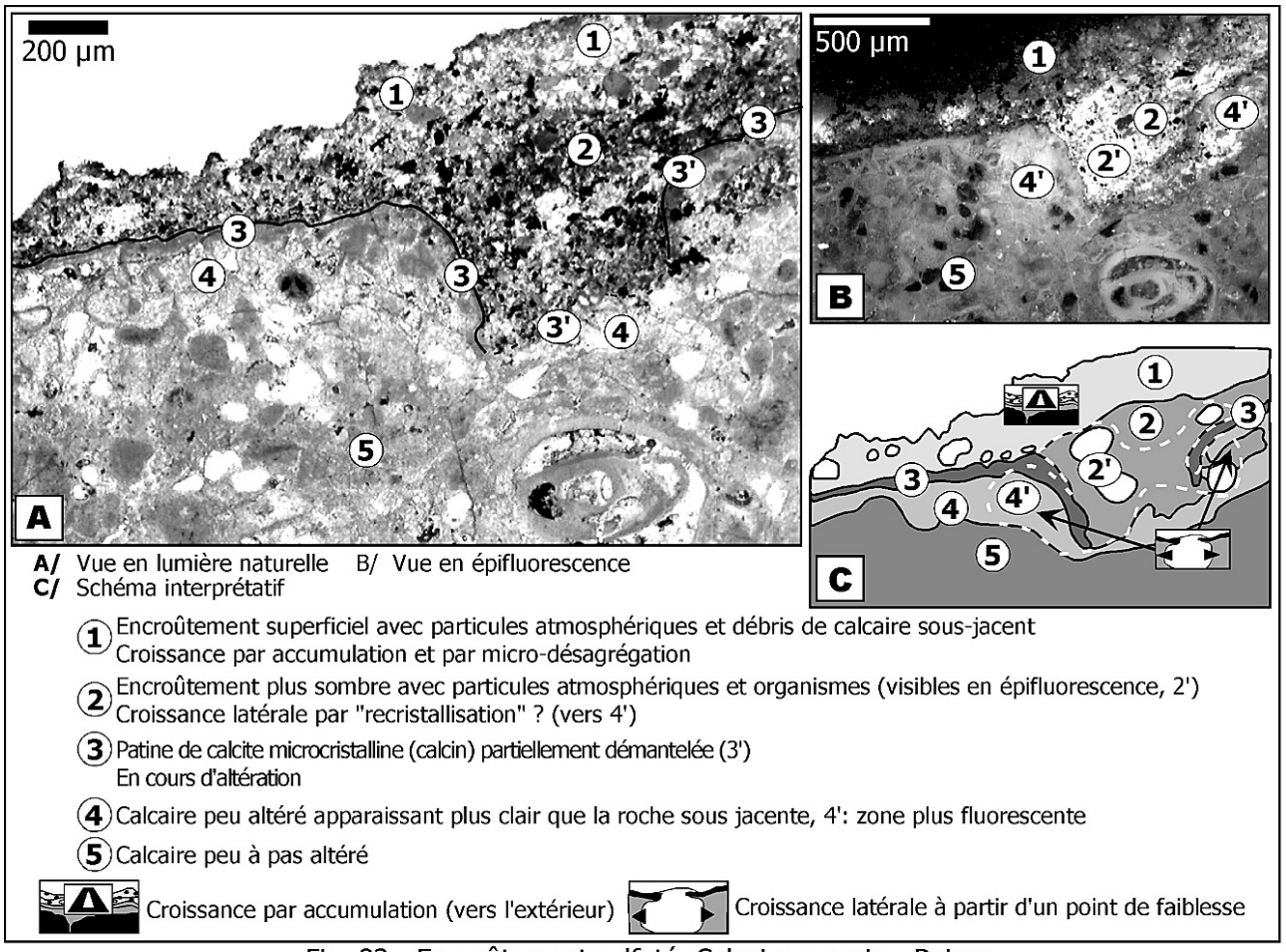


Fig. 83 : Encroûtement sulfaté, Calcaire grossier, Reims

La dépression sur la moitié droite de l'image (et notée 2, Fig. 83) n'est peut-être pas naturelle, par exemple elle peut être le résultat d'une trace d'outil ou d'un arrachement suite à un impact. A l'intérieur de cette dépression, l'encroûtement est plus sombre (cendres volantes et autres particules atmosphériques) et sous épifluorescence (B, Fig. 83), on observe la présence d'organismes (notés 2'). On remarque aussi, que de part et d'autre de

cet accident, la roche est plus fluorescente (4'), ce qui témoigne d'une activité organique (bactérie ?) comme d'un début d'altération.

Dans cet encroûtement, la partie superficielle du calcaire est protégée par un calcin, qui limite la pénétration des solutions sulfatées et la recristallisation de la calcite en gypse. En revanche, l'altération progresse à partir d'une zone en dépression et s'étend latéralement sous la couche de calcin, qu'elle fragmentera par un processus de sape (déjà entamé dans la partie droite de l'extension latérale).

Evolution télogénétique du Calcaire grossier

Le Calcaire grossier présente des modes d'altérations et des durabilités en œuvre variées. Les faciès micritique type Courville présentent même une légère gélivité s'ils sont utilisés dans des positions architecturales contraignantes, notamment en bandeau ou en soubassement. Nous avons aussi constaté la diversité des comportement en œuvre, presque aussi importante que la variété des microfaciès de la formation (Fig. 84).

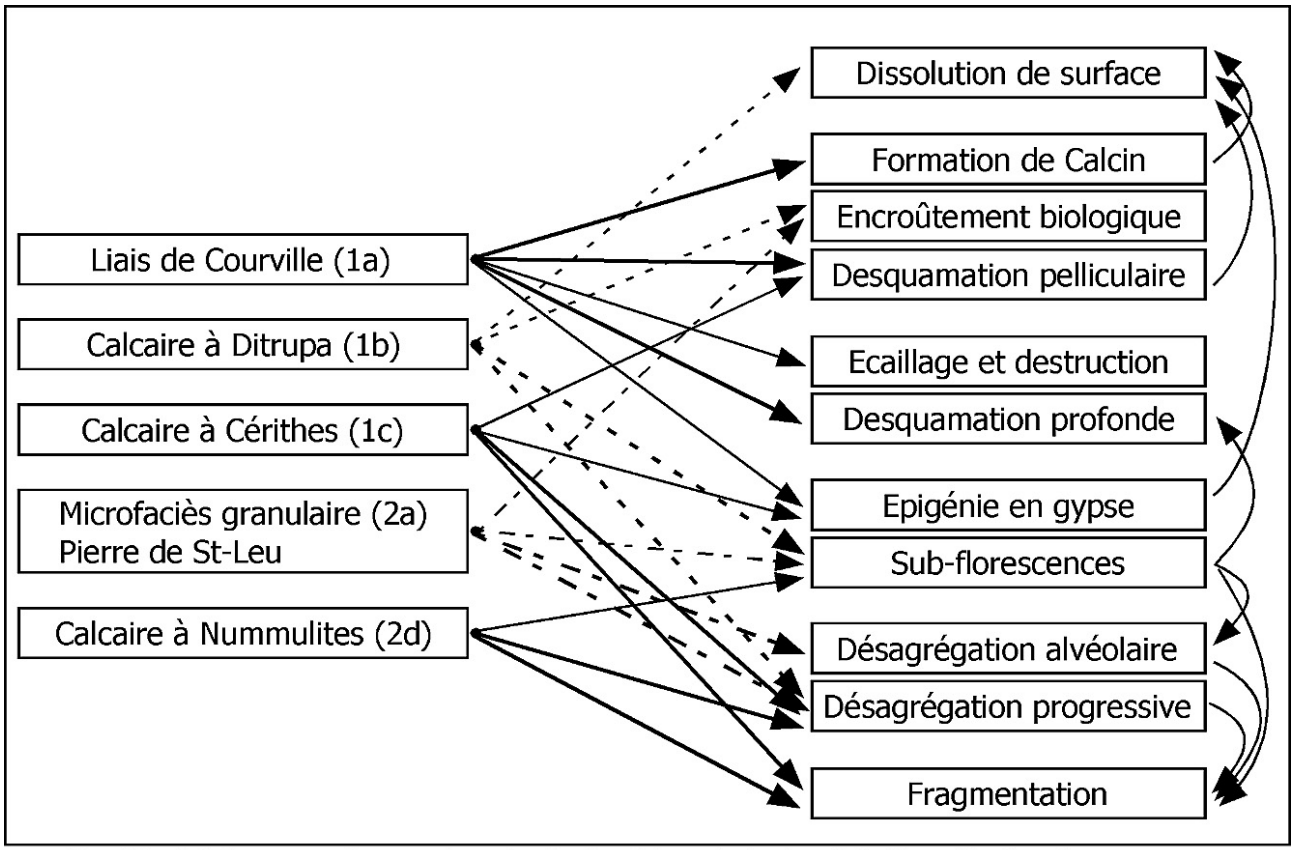


Fig. 84 : Relations complexes entre microfaciès et les principales altérations développées en oeuvre
Calcaire grossier, Lutétien moyen

La relative complexité de l'organisation de ces relations Pierre / Altération développée peut être analysée en rapportant, d'une part les microfaciès à matrice micritique (ici le Liais de Courville et le Calcaire à Cérithes) aux altérations type encroûtement, desquamation et fragmentation, d'autre part les faciès granulaires (soit la Pierre de Saint-Leu et le Calcaire à Nummulites) aux altérations de type subflorescences et désagrégation. D'autres particularités peuvent être signalées : par exemple, le Calcaire à Nummulites présente souvent des fragmentations puisque les foraminifères sont généralement peu cimentés et qu'ils peuvent se désolidariser du bloc, individuellement ou en groupe d'éléments formant des débris d'une taille supérieure au centimètre . Enfin, signalons que le comportement en œuvre du Calcaire à Ditrupa est relativement complexe à analyser car le microfaciès varie fortement (Fig. 45). De plus, à Reims, les éléments de construction pouvant être véritablement rapportés à cette unité lithologique sont rares. En effet, alors que celle-ci était très utilisée durant l'antiquité et le moyen âge, on constate que lors de la reconstruction de Reims, ces bancs ont été relativement délaissés.

La nature du réseau poreux et la taille des pores conditionnent la durabilité en œuvre du Calcaire grossier et ses propriétés pétrophysiques. Certains faciès montrent même une inaptitude prononcée à l'utilisation en bandeau. Leur mise en œuvre dans cette position architecturale (couramment observée à Reims) provoque leur quasi-destruction en moins de 100 ans.

Le taux de cohésion granulaire conditionne directement le type d'altération développée. D'autant plus que dans les microfaciès à support granulaire, les éléments sont faiblement cimentés et que la macroporosité intergranulaire résiduelle est très importante. A l'opposé, les faciès à matrice micritique présentent un très fort taux de cohérence granulaire, parfois renforcé par des recristallisations de la phase matricielle (microsparite et calcédonite). Ainsi, les modes d'altérations des calcaires micritiques faiblement macroporeux sont plutôt liés à des processus de *microfissuration* et les morphologies observées seront principalement des desquamations (calcaires de type Courville) et des fragmentations (calcaire à Cérithes). Les calcaires Lutétien fortement macroporeux sont rares à Reims, mais ils sont fréquemment observés en œuvre vers le Nord (Laon) et l'Ouest (Soissons, Meaux, St-Leu-d'Esserent, Paris…). Dans ce cas, les altérations liées à des décohésions granulaires prennent une morphologie de désagrégation et sont orientées selon les litages sédimentaires (Tab. 23).

Dans les altérations où intervient un stade de fissuration, les **hétérogénéités de texture** peuvent amplifier les dégradations car les limites entre les deux textures se comporteront comme de barrières de porosité (par exemple, entre deux microfaciès de granulométries différentes, Fig. 42, page 110). Ces zones d'anisotropie sont un site privilégié de fissuration et peuvent être à l'origine de desquamation ou d'exfoliation (selon le processus décris Fig. 79 page 180 mais sans les étapes A et B puisque l'anisotropie existe déjà dans la roche).

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altérations privilégiées par la caractéristique
Présence d'une matrice micritique Importante microporosité (microfaciès type 1)	Nature du faciès de dépôt, Nature de la porosité	Forte sensibilité à la desquamation Forte sensibilité à la recristallisation
Matrice micritique non recristallisée	Nature des phases diagénétiques	Tendance à la gélivité
Absence de matrice micritique, faible cimentation Grands macropores très abondants	Nature du faciès de dépôt et des phases diagénétiques Nature et valeur de la porosité	Forte sensibilité à la désagrégation Importante pénétration des solutions sulfatées : présence de subflorescences.
Hétérogénéités de texture, de porosité	Structure du calcaire	Fréquence des zones d'anisotropie
Hétérogénéités de structure, litages, niveaux argileux…	Structure du calcaire	Forte sensibilité à la fragmentation
Présence d'une couche de calcin	Evolution télogénétique	Protection contre les pénétrations de solutions sulfatées et des recristallisations.
Colmatage de la porosité de surface (croûte ou calcin)	Evolution télogénétique	Forte sensibilité au décollement pelliculaire

Tab. 23 : Caractéristiques du Calcaire grossier qui conditionnent son comportement en œuvre.

La présence ou l'absence d'un **calcin superficiel** influence la circulation des fluides, mais surtout la pénétration des solutions sulfatés. Or, les microfaciès à phase de liaison micritique présentent une forte sensibilité à la recristallisation en gypse (liée à la taille des nanograins et à leur importante surface de réactivité). La présence d'un calcin est donc très importante car elle modère la propagation des encroûtements vers l'intérieur du bloc, limitant l'altération à une accumulation vers l'extérieur et à un encroûtement superficiel. Pour ce type de microfaciès, la présence d'impacts d'outils, d'accidents de surface ou d'hétérogénéités (bioturbations, litages) modifiant ou détruisant le calcin, est donc dommageable. Ils provoqueront l'apparition de points d'altération, stades initiaux d'une altération généralisée de la surface.

Le colmatage de la porosité de surface provoque l'apparition des zones d'anisotropies qui seront le site privilégié de formation des décollements (desquamations, voir mécanisme Fig. 79). Ce type d'altération peut être provoqué par l'accumulation de particules en surface (dépôts éoliens, particules atmosphériques dont les cendres volantes) ou par leur migration depuis l'intérieur de la roche. Or, la couche de calcin, formée de calcite microcristalline, provoque elle aussi le colmatage de la porosité de surface et sa présence aura donc un impact négatif sur la durabilité de la roche. Nous montrons donc ici que le calcin et les patines théoriquement protectrices peuvent être une cause de dégradation (décollement pelliculaire des patines, Tab. 23), s'ils diminuent la perméabilité du milieu et provoquent la formation de subflorescences.

Les composants des faciès de Calcaire grossier peuvent aussi être classés selon leur sensibilité à altération :

- Les fissures passent préférentiellement dans les macropores (y compris intragranulaires) mais elles sont surtout situées aux limites texturales entres les zones de porosité différente : par exemple, entre le sédiment interne d'une bioturbation et le calcaire encaissant dont la matrice est plus recristallisée (à tendance microsparitique). De même, les niveaux micritiques non recristallisés sont plus sensibles à la fissuration que les zones de micrite recristallisée, ce qui témoigne de l'importance de l'infraporosité sur la sensibilité au gel ou à la fissuration.

- Les surfaces externes des bloc abrités, dont le microfaciès est micritique, sont très fréquemment recristallisées en gypse, sauf quand elles sont protégées par un calcin superficiel. La micrite matricielle est donc relativement sensible à la recristallisation Alors que la couche de calcin, elle aussi composée de micrite est très résistante à la recristallisation en sels, parfois plus que les matrices microsparitiques et que certains bioclastes. Remarque : la glauconie ne figure pas dans le tableau ci-dessous (Tab. 24) car elle est généralement oxydée, indépendamment de la mise en œuvre de la roche et du microclimat d'exposition.

Sensibilité à la microfissuration	
1	Hétérogénéités de texture
2	Bioclastes non obturés de sparite
3	Micrite matricielle
4	Ciments sparitiques
5	Eléments obturés de sparite
6	Quartz et glauconie

Sensibilité à la recristallisation	
1	Micrite non recristallisée
2	Microsparite recristallisée
3	Bioclastes
4	Calcin superficiel
5	Cristaux de sparite
6	Quartz

Tab. 24 : Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.

4/ Altération de l'Entroquite de la Meuse :

Généralités :

Altération in-situ :

L'altération in-situ des Entroquites de la Meuse peut s'observer dans les nombreuses carrières abandonnées des environs de Commercy et notamment celles du site « des Carrières » à Euville. Les fronts de taille généralement bien visibles ne montrent pas d'importantes traces d'altération. En revanche, les blocs laissés à l'abandon et gagnés par la végétation sont fragilisés par la pénétration des réseaux racinaires des végétaux (mousses vertes, lichens et plantes supérieures). La roche devient pulvérulente et se désagrège facilement en éléments individualisés ou en petits débris. Le processus à l'origine de cette désagrégation est complexe et composé de l'interaction de la *pénétration des racines des végétaux* et de l'*alternance des cycles thermiques*.

Altération en œuvre :

Des traces de dissolution de surface sont parfois observées, elles sont provoquées par l'érosion superficielle des éléments peu cimentés. Quelques ravinements se forment au niveau des traces de bioturbations, mais ils se produisent principalement quand la surface subit d'importantes circulations d'eau : par exemple au niveau de gouttières défectueuses ou de rigoles d'écoulement.

La désagrégation des angles des blocs est une altération très fréquente, elle est précédée d'un stade initial de desquamation sur chaque face. Cette désagrégation touche toute la zone en saillie et affecte parfois près de 10 centimètres de profondeur.

D'autres morphologies de desquamations peuvent être identifiées, par exemple : l'exfoliation d'une épaisse plaque, rapidement fragmentée. Cette altération se rencontre principalement dans les éléments en position de soubassement et se développe sur une longueur pluri-décacentimétrique. Nous différencierons une troisième morphologie de désagrégation, composée par la désagrégation progressive de la surface des éléments de maçonnerie en Entroquite, (sur une épaisseur assez faible : moins d'un centimètre), associée à une légère desquamation des angles et des zones encroûtées (Fig. 85).

Enfin, la présence d'encroûtements sulfatés et de recristallisations des entroques en gypse est parfois constatée. L'épigénie de ces éléments d'échinodermes progresse vers l'intérieur de la roche à partir de la périphérie des éléments, mais surtout le long des clivages des cristaux de sparite (selon le même modèle que les altérations décrites par Vergès-Belmin *et al.*, 1991 sur des marbres blancs de Carrare, Fig. 89).

Description des altérations :

Desquamation et désagrégation associées

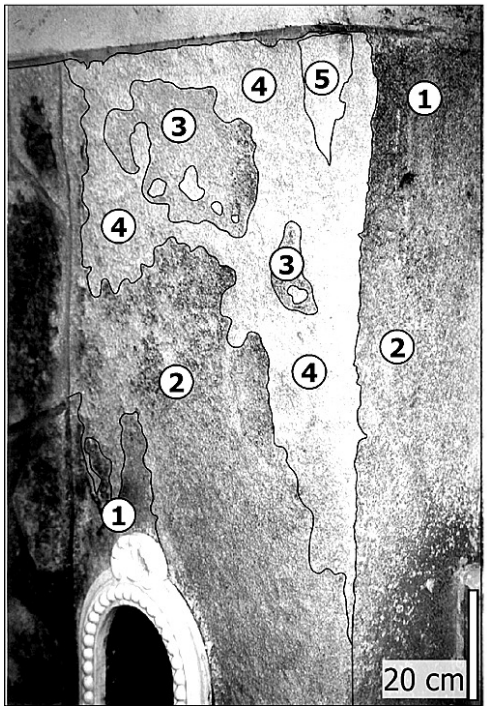
Les altérations en œuvre de la Pierre d'Euville sont généralement mixtes car elles contiennent à la fois des indices de desquamation, mais aussi de désagrégation par décohésion granulaire. Nous les classerons selon quatre types de morphologie (Tab. 25), dont l'extension spatiale et les processus de formation sont différents. Des variantes peuvent exister selon le microclimat d'exposition et la position de mise en œuvre de la roche.

Morphologie d'altération développée	Desquamation	Désagrégation	Position classique
Exfoliation et décollement d'une plaque rapidement fragmentée	+++	+	Face de bloc, soubassement lessivé
Desquamation à partir des arêtes puis profonde désagrégation	++	++	Angle sommital, bloc en saillie
Désagrégation de surface et desquamation des encroûtements	+	+++	Face de bloc, soubassement abrité
Désagrégation profonde de l'ensemble de la surface		++++	Roche peu cohérente, élévation

Tab. 25 : Morphologie des altérations desquamation / désagrégation sur la Pierre d'Euville.

- Dans un premier cas, l'altération desquamante est nette entraînant l'apparition d'une plaque parfois d'une épaisseur centimétrique. Le décollement de la plaque est progressive et peut s'initialiser à partir d'une arête de bloc. Cette morphologie s'observe généralement sur les blocs de soubassement exposé à la pluie battante (généralement en milieu urbain). Le processus de propagation de cette altération est sans doute lié aux variation thermiques (et l'action du gel ?) ainsi qu'aux circulations d'eau qui permettent la cristallisation de sels à l'intérieur de la roche. En effet, sous la plaque desquamée la roche est très pulvérulente et riche en gypse.

- Lors du deuxième type d'altération, les arêtes de très nombreux blocs d'Entroquites sont profondément érodées et les angles des éléments architecturaux sont tronqués sur presque toute leur longueur. Cette altération se développe en deux temps. 1) un stade initial de desquamation avec le décollement de deux feuilles de part et d'autre de la ligne d'arête du bloc. Le débit en mille-feuille est généralement très peu marqué du fait de la grande taille des éléments et plus particulièrement de l'ensemble (entroque + ciment syntaxial) qui dépasse fréquemment le millimètre de long. 2) Une désagrégation de la zone mise à nue suivie d'une érosion par décohésion granulaire (et microfracturation ?). L'altération tronque progressivement l'arête et l'intensité des desquamations latérales peut diminuer, parfois au profit d'une désagrégation de surface. Le résultat de cette érosion est figuré dans la Fig. 85, zone 5, où l'angle du bloc de soubassement est totalement désagrégé.



1 Calcaire peu altéré, légèrement encroûté
2 Calcaire peu altéré, légère dissolution de surface
3 Zones "reliques" en cours d'altération
4 Calcaire altéré, légère désagrégation de surface
5 Calcaire très altéré, désagrégation profonde

Fig. 85 : Altération d'un soubassement en Pierre d'Euville, Entroquite de la Meuse, Reims

Désagrégation progressive de la surface et légère desquamation

- Dans cette troisième morphologie d'altération, la désagrégation progressive de la surface du bloc est parfois associée à une légère desquamation des zones encroûtées et de la limite des zones en relief (surfaces reliques notées 3, Fig. 85). Sur l'exemple figuré ci-dessus (rue Emile Zola à Reims), l'érosion de la surface affecte une profondeur quasiment constante depuis la base du mur jusqu'à l'angle du bloc, où la désagrégation de surface se cumule avec une décohésion plus profonde, selon le processus décrit précédemment (desquamation puis désagrégation). L'atténuation de l'altération vers la base du mur et la présence des encroûtements (croûte noire) montre que cette désagrégation se produit dans les zones exposées à la pluie. Le processus d'altération est donc soit lié à la dissolution de la phase de cimentation soit à l'ouverture des surfaces d'accolements entre les ciments syntaxiaux, selon le même modèle que les marbres blancs (Bouineau et Perrier, 1995).

- Le 4ème type d'altération a été observée ponctuellement dans différents milieux d'exposition (mur du Palais de Justice, Place M. T. Herrick à Reims ; mur de soutien des anciennes carrières Fèvres et Cie à Euville…). La totalité de la surface de ces blocs est profondément altérée et se situe en retrait des autres éléments du même mur, eux aussi en Entroquite, mais qui sont intacts. Il s'agit de l'utilisation d'une roche de mauvaise qualité dont l'inaptitude à l'utilisation en œuvre n'a pas été détectée. Celle-ci s'altère beaucoup plus rapidement que les autres éléments de la construction. Dans le cas de ces blocs d'Entroquites, la morphologie d'altération est une désagrégation généralisée de la surface. Les éléments figurés externes sont progressivement désolidarisés du calcaire. Nous pouvons donc supposer les blocs très altérés ont un taux de cohésion granulaire plus faible que le faciès de référence, sans doute lié à une cimentation syntaxiale moins développée (Fig. 54, page 136).

Microfissuration

La désagrégation de la Pierre d'Euville et la desquamation sont en partie provoquées par une microfissuration parallèle à la surface du bloc (Fig. 65, page 152) ; l'autre processus étant une décohésion granulaire progressive. Dans ce type de calcaire, les fissures passent préférentiellement à la limite entre les ciments syntaxiaux et rejoignent les pores intergranulaires. Elles ont aussi tendance à fracturer les éléments micritiques. A l'opposé, elles contournent les éléments d'échinodermes, ne les fracturant que s'ils sont orientés perpendiculairement à la surface. L'orientation de ces fractures est alors conditionnée par les clivages des cristaux de calcite.

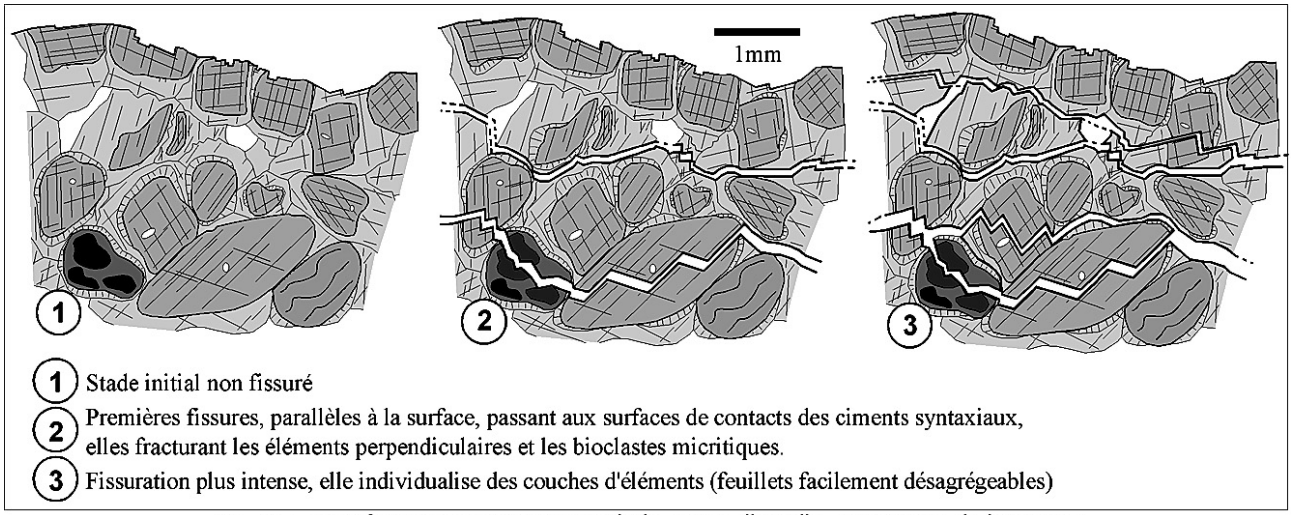


Fig. 86 : Microfissuration progressive de la Pierre d'Euville, Entroquite de la Meuse
Position des microfractures par rapport aux éléments du microfaciès

Encroûtements

Les encroûtements de l'Entroquite de la Meuse sont relativement superficiels car les macropores sont rares. Le calcaire est essentiellement sparitique et donc peu sensible aux recristallisations en gypse. Cependant, les quelques croûtes observées peuvent être très complexes, contenir des éléments progressivement épigénisés en gypse et être parcourus de fractures.

Dans le premier exemple (Fig. 87) la zone d'accumulation de particules atmosphériques est peu épaisse (environ 100 µm) alors que la couche interne riche en gypse est très développée. Des fragments de ciment syntaxial sont totalement intégrés dans la croûte interne et partiellement recristallisés en gypse (notés e). L'épigénie affecte même quelques entroques (en f).

La progression de l'épigénie le long des clivages est bien visible, elle correspond au mode de formation de la croûte interne gypseuse décrit dans les marbres blancs de Carrare (Vergès-Belmin *et al.,* 1991). On remarque aussi que les ciments intégrés à la croûte sont décollés des éléments auxquels ils étaient liés Ils semblent moins résistants à l'épigénie que les entroques (souvent non affectés par les recristallisations).

Les fissures sont généralement parallèles à la surface d'exposition. Elles sont parfois remplies par des cristallisations de gypse ou tapissent les bords des fractures sans totalement les colmater. Cette création de porosité secondaire par fracturation s'accompagne de la formation de quelques macropores par dissolution au sein de la zone recristallisée en gypse (croûte interne claire, par exemple près du f, Fig. 87).

Les éléments micritiques (pelletoïdes) ne semblent pas affectés par la recristallisation en gypse, alors que dans le cas du Calcaire grossier, la micrite est plus facilement épigénisée que la sparite. Cette différence peut s'expliquer par le fait que la micrite de l'Entroquite a déjà subi des recristallisations (liées à son histoire diagénétique), ce qui la rend moins sensible à l'épigénie en gypse.

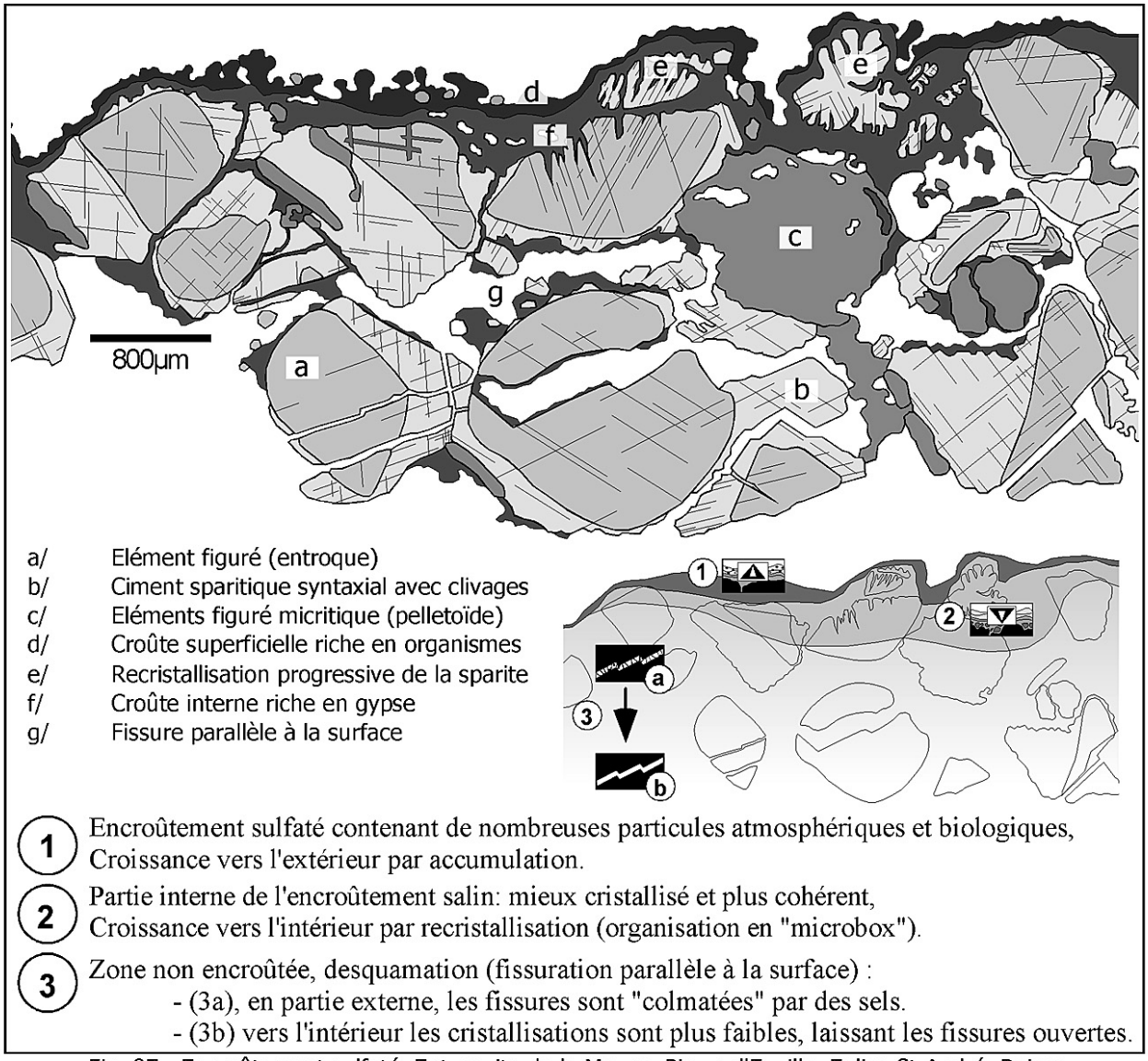


Fig. 87 : Encroûtement sulfaté, Entroquite de la Meuse, Pierre d'Euville, Eglise St-André, Reims

Recristallisation superficielle

L'observations en épifluorescence d'un encroûtement sulfaté sur un échantillon d'Entroquite de la Meuse, permet de préciser le processus de recristallisation de la sparite en gypse. En effet, on voit que la surface de cet échantillon (Fig. 88) est recouvert par une croûte noire et que la partie inférieure de l'encroûtement pénètre dans l'entroque en progressant le long des clivages du cristal. La fluorescence met en évidence des auréoles de luminescences à la surface de la roche (a), le long de clivages (e), dans le prolongement des zones recristallisées, dans les îlots reliques de calice déjà intégrés à la croûte (d) et le long des fissures qui pénètrent le calcaire. La croûte inférieure, riche en gypse (c) et les zones déjà épigénisées ne sont pas luminescentes.

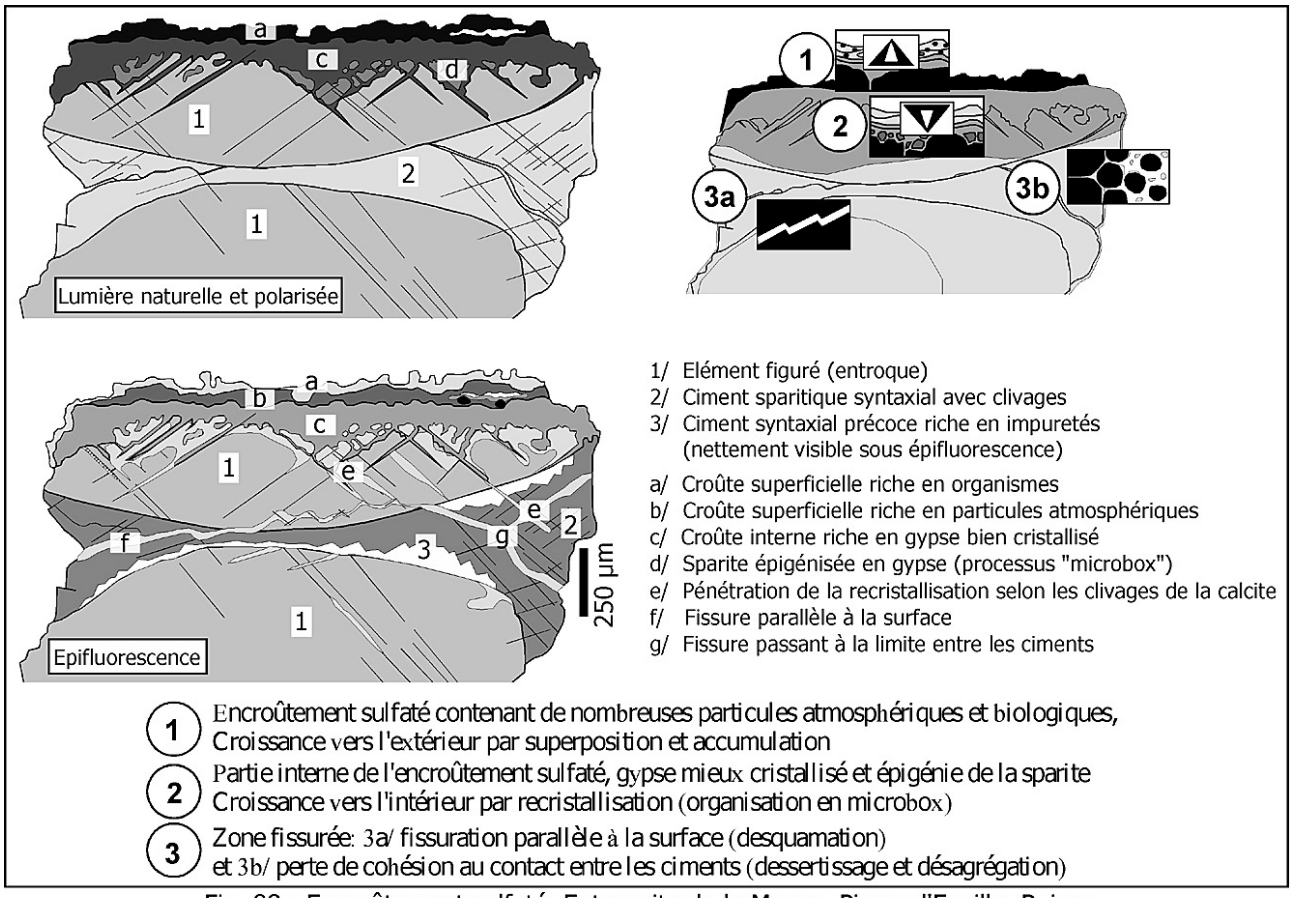


Fig. 88 : Encroûtement sulfaté, Entroquite de la Meuse, Pierre d'Euville, Reims

La cinématique d'altération par recristallisation en gypse progresse vers l'intérieur de la roche (notée 2, Fig. 88) et elle s'organise en plusieurs étapes :

- un stade préliminaire : diffusion de SO_2 autour des éléments, en surface et le long des fissures ou des fentes issues de la dilatations thermiques ;

- une phase initiale de l'altération : cristallisation de gypse le long des clivages cristallins et à la périphérie des éléments. Observé en épifluorescence, la calcite est fortement luminescente, ce qui indique la présence de matière organique. Durant cette phase des micro-organismes (bactéries) sont présents sans qu'il soit possible

encore de préciser s'ils participent à la transformation minéralogique, si celle-ci se produit à la suite de la colonisation organique, ou si les micro-organismes se développent de façon temporaire dans la frange où la transformation de la calcite en gypse commence ;

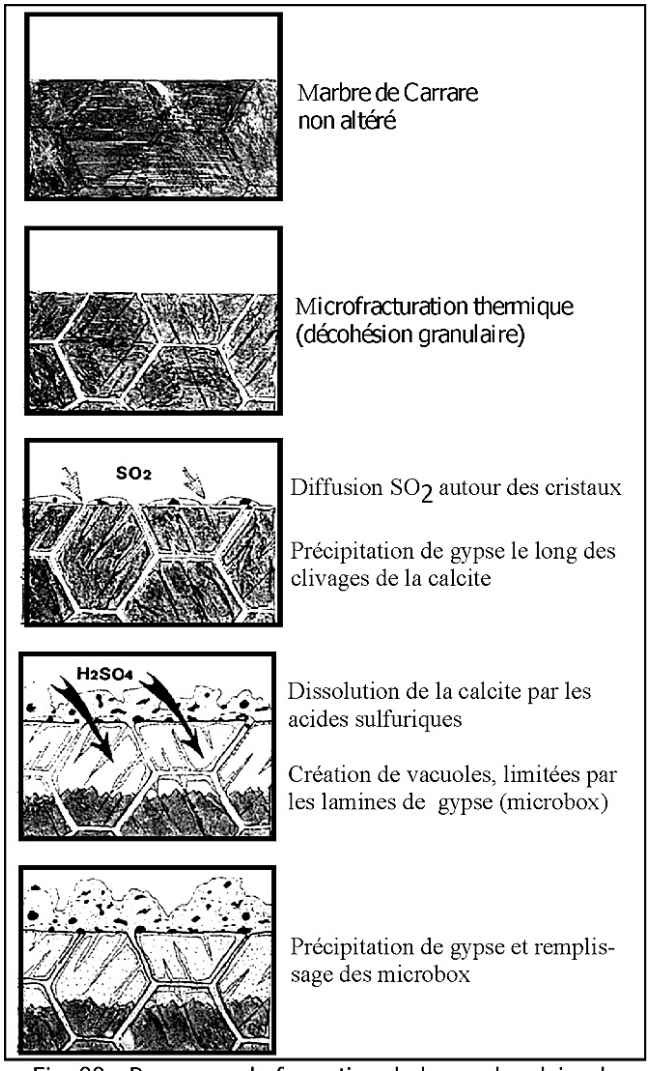


Fig. 89 : Processus de formation de la couche claire de gypse, sous-jacente- à la croûte noire superficielle d'après Vergès-Belmin *et al.*, 1991

- une phase de recristallisation : la formation de gypse le long des clivages de la calcite et à la périphérie des éléments individualise de petits espaces tridimensionnels indépendants les uns des autres. Le terme de « microbox-work » est utilisé par Vergès-Belmin *et al.*, 1991 (Fig. 89, ci-contre) pour nommer cette étape de la progression de la couche de gypse et nous le retiendrons ici. A l'intérieur de chacune des zones individualisées par les (re)cristallisations précoces de gypse, la transformation minéralogique s'effectue avec, selon ces auteurs, une phase intermédiaire de dissolution, mais elle pourrait progresser par épigénie.

La morphologie dentelée de certaines zones du front de recristallisation montre que le processus de pénétration le long des clivages cristallins se reproduit à une échelle inférieure (cristallographique ?).

Le gypse formé n'est pas fluorescent et les éléments recristallisés sont totalement incorporés à la couche interne de la croûte noire.

Nous supposons qu'il existe ensuite des phases de dissolution / recristallisation au sein de l'encroûtement sulfaté et de la couche interne claire, riche en gypse, semblables à ceux décrits pages 171 et 172 après l'observation d'un échantillon d'Oolithe vacuolaire (Fig. 75a et 75b). En effet, quelques pores s'observent à l'intérieur des encroûtements sur de l'Entroquite (Fig. 88, au niveau de f), mais nous ignorons encore s'il s'agit de pores provoqués par la dissolution du gypse (processus chimique) ou s'il apparaissent suite à la croissance de micro-organismes.

Evolution télogénétique de l'Entroquite de la Meuse

L'Entroquite de la Meuse est une très bonne pierre de taille, non gélive, qui possède une très grande durabilité en œuvre. Pourtant nous avons montré qu'il existe parfois des éléments dont la surface est entièrement altérée au milieu de blocs quasiment sains.

En Champagne-Ardenne, ce calcaire est le plus souvent mis en œuvre comme pierre de soubassement. Il montre alors une très bonne durabilité, même si on observe de nombreux types d'altération à sa surface (désagrégations et desquamations)

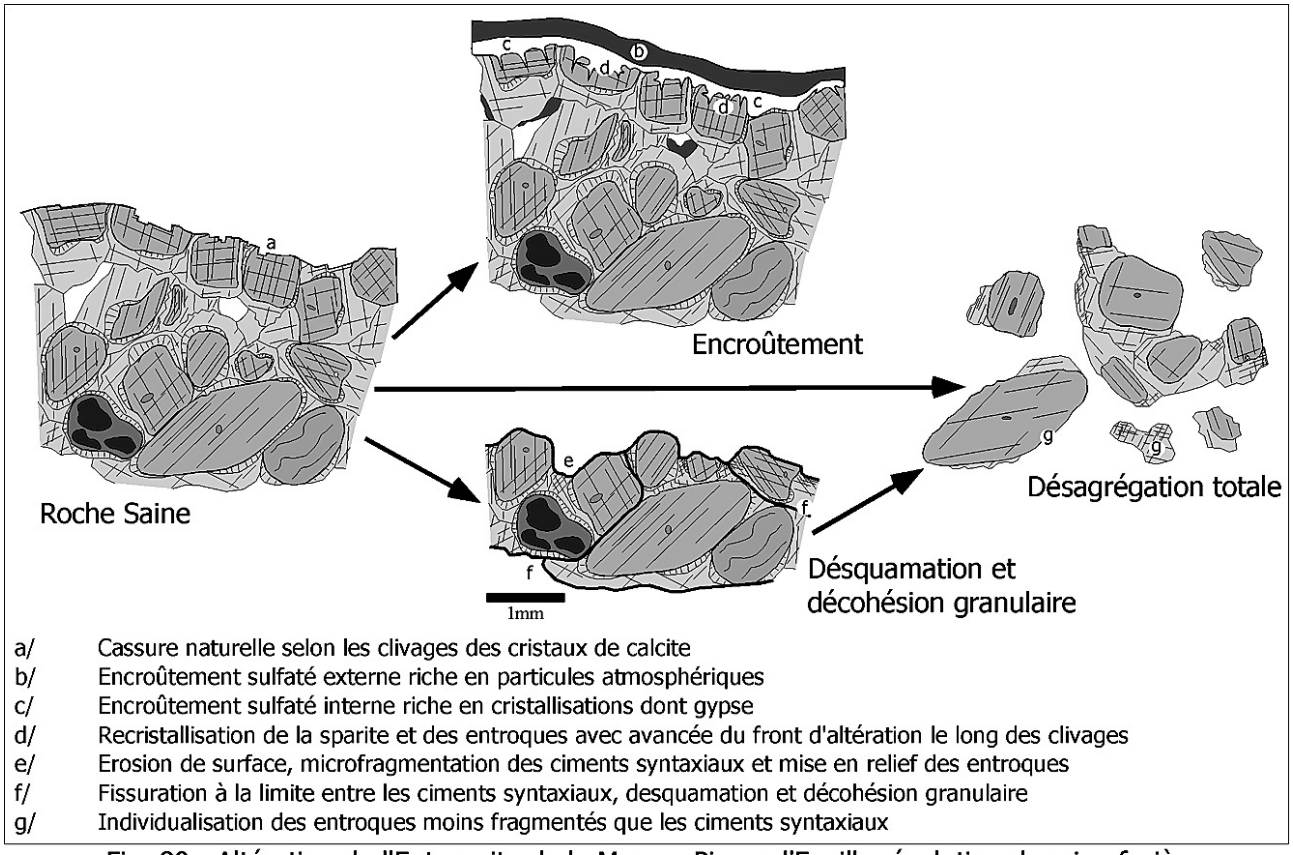


Fig. 90 : Altération de l'Entroquite de la Meuse, Pierre d'Euville, évolution du microfaciès

La **nature de la phase de cimentation** : les ciments syntaxiaux liés aux entroques, est particulièrement importante car elle assure la cohérence de ce calcaire. Les surfaces d'accolement de ces ciments sont facilement séparées par microfissuration et décollement, de la même façon que les grains de calcite des marbres blancs. En raison de cette cimentation particulière, les desquamations et les exfoliations qui se forment à partir des angles des blocs sont rapidement fragmentées et désagrégées. De même, les éléments à la surface de la roche et dans les zones altérées sont facilement désolidarisés par décohésion granulaire. **La grande taille des éléments** amplifie l'importance de ce type de dégradation.

Le **taux de développement de la phase de cimentation** (ciment syntaxial) est directement lié au taux de cohésion granulaire et donc à la qualité de la pierre de taille puisque la décohésion granulaire est la principale cause de dégradation de cette roche. L'observation de ravinements au niveau de terrier laisse supposer que le taux de cohésion peut-être plus faible à l'intérieur des **bioturbations** ce qui montre une importance de la structure du calcaire, même si celle-ci est généralement peu visible

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altérations privilégiées par la caractéristique
Ciment principal de type syntaxial	Nature des phases diagénétiques	Forte sensibilité à la fissuration et à la décohésion granulaire.
Obturation partielle de la porosité intergranulaire Plus faible développement de la cimentation	Développement de la cimentation, Valeur de la macroporosité	Forte sensibilité à la désagrégation
Grande taille des éléments figurés	Nature du faciès de dépôt	Plus grand impact des pertes d'éléments
Présence de bioturbation microfaciès bioturbé moins cohérent	Structure du calcaire	Augmentation de l'altérabilité au ravinements

Tab. 26 : Caractéristiques de la Pierre d'Euville qui conditionnent son comportement en œuvre.

Nous pouvons aussi comparer les composants du microfaciès selon leur sensibilité à l'altération :

- Les fissures passent préférentiellement à la limite d'accolement des ciments syntaxiaux (notée contacts Cs/Cs, Tab. 27) et à l'intérieur des éléments micritiques. Le léger ciment palissadique ne modifie pas l'orientation des microfissures dont le trajet est principalement orienté le long des clivages de la calcite (f, Fig. 90).

- Les ciments syntaxiaux sont plus facilement fragmentés que les éléments qu'ils entourent, les entroques ont alors tendance à être mis en relief à la surface de la roche (e, Fig. 90).

- Les entroques sont plus résistants à la recristallisation en gypse que les ciments syntaxiaux qui leur sont liés et le mode d'altération de ce calcaire (progression par les clivages de la calcite : des entroques et des ciments syntaxiaux, d, Fig. 90) se rapproche de certaines observations réalisées sur des marbres blancs. Enfin, les pelletoïdes micritiques de l'Entroquite ne présentent pas une très forte sensibilité à la recristallisation, contrairement à la micrite matricielle du Calcaire grossier.

Sensibilité à la microfissuration	
1	Pelletoïdes micritiques
2	Contacts Cs / Cs
3	Ciments syntaxiaux (Cs)
4	Entroques
5	Ciments palissadiques (Cp)

Sensibilité à la microfragmentation	
1	Ciments syntaxiaux (Cs)
2	Pelletoïdes micritiques
3	Entroques

Sensibilité à la recristallisation	
1	Ciments syntaxiaux (Cs)
2 ?	Entroques
3 ?	Pelletoïdes micritiques

Tab. 27 : Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.

5/ Altération d'autres calcaires, cités à titre de comparaison :

Les calcaires dévoniens de l'Ardenne :

A Reims, les calcaires dévonien de l'Ardenne ne sont utilisés que pour les trottoirs, la Pierre brune pour la zone de marche et la Pierre noire pour les bordures de caniveau. Les pavés montrent peu de traces d'altération, si ce n'est une légère déflation au centre du bloc. Celle-ci correspond à un fin décollement superficiel et donc à une morphologie de desquamation. Les blocs des bordures de trottoirs ont une longueur métrique, ils présentent de nombreuses traces de fragmentation progressive et parfois de légères désagrégation. Les altération les plus importantes s'observent soit aux deux extrémités de la bordure, soit sur toute la longueur de celle-ci (Pierre de moins bonne qualité).

Dans le Nord du département des Ardennes, la Pierre bleue est utilisée dans toutes les positions architecturales. Les traces d'altérations sont rares, mais on remarque parfois quelques desquamations des angles des blocs et des fragmentations selon le litage et/ou les bioturbations.

Description des altérations en œuvre :

La déflation des pavés de trottoirs ne s'observe que pour le faciès de Pierre brune et n'a jamais été constatée sur les pavés de Pierre noire. Initialement, nous avons considéré que cette altération se développait à partir du centre du bloc et gagnait progressivement la périphérie par desquamation. La reproduction de cette cinématique par décollement provoque un creusement progressif centre du pavé et l'approfondissement de l'altération (même si la desquamation est généralement limitée à quelques millimètres de profondeur). Pourtant, nous avons observé que les pavés desquamés sont toujours légèrement bicolores (brun et gris-bleuté) et que l'altération s'initialise toujours dans la zone grise des blocs. Le processus d'altération est donc conditionné par de très faibles variations de microfaciès, matérialisées par les différences d'états du fer (oxydé dans la zone brune et réduit dans la zone gris-bleutée). En revanche, nous n'avons pas encore mis en évidence de variation microfaciologique nette et nous manquions d'échantillons pour élaborer un protocole d'analyse d'images permettant la détermination des différentes signatures ternaires.

Il est possible de supposer que de très faibles différences des textures et de taux de recristallisation sparitique sont matérialisées par la variation de couleur. Et que la texture gris-bleutée est plus sensible à la desquamation (*action du gel ou des cycles de dilatation thermique*) que la texture brune.

La deuxième morphologie d'altération est celle des fragmentations de blocs, observées sur les bords de trottoirs à Reims ou sur les blocs, en élévation et en bandeau, des habitations de la vallée de la Meuse (Fumay, Vireux, Givet…). Dans les deux cas, les fissurations se développent en fonction des hétérogénéités de structures : suivant les veines de calcite, les bioturbations, les niveaux argileux et les litages sédimentaires.

Evolution télogénétique :

Ces calcaires compacts et peu poreux présentent une bonne durabilité en œuvre, même dans un climat plus rude qu'a Reims, comme celui de la pointe de Givet. La très faible porosité totale (moins de 5%) limite fortement la pénétration des fluides à l'intérieur du calcaire et donc la formation de subflorescences. La présence de calcite de blocage et la recristallisation de faciès induisent un très fort taux de cohésion granulaire. Ce microfaciès ne présente donc quasiment pas de traces de désagrégation.

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altérations privilégiées par la caractéristique
Obturation totale de la porosité intergranulaire Présence de calcite de blocage et de recristallisation	Nature et développement des phases diagénétique	Forte durabilité en œuvre, faible sensibilité à l'action du gel et à la recristallisation
Légères différences de textures	Développement des phases diagénétiques secondaires	Anisotropie de comportement thermique et forte sensibilité au décollement superficiel
Présence de veines de calcite	Développement des phases diagénétiques secondaires	Forte sensibilité à la fragmentation
Présence de niveaux argileux, de bioturbations	Nature du faciès de dépôt Structure du calcaire	Forte sensibilité à la fragmentation

Tab. 28 : Caractéristiques des calcaires givétiens qui conditionnent leur comportement en œuvre.

Le calcaire à entroques de Langres :

Utilisé dans la région de Langres, le calcaire à entroques Bajocien présente fréquemment une teinte rousse. Elle correspond à la formation d'un calcin riche en oxydes et hydroxydes de fer, il y a donc formation d'une patine superficielle avec accumulation de fer.

Les angles de certains blocs sont finement desquamés selon un débit en mille-feuille, tandis que les éléments utilisés en élévation sont fracturés selon les litages sédimentaires. La fragmentation adopte parfois des morphologies plus irrégulières qui semblent épouser la forme des traces de bioturbation.

Description des altérations en œuvre :

La formation d'une véritable patine de type calcin, avec un niveau riche en oxydes de fer n'a pas encore été observée avec certitude. Mais, la coloration superficielle (brun-rouge) permet de supposer son existence à la

surface des blocs peu encroûtés (in-situ ou en milieu rural), suivant une logique de développement globalement identique aux patines décrites sur des blocs de Calcaire à débris (Fig. 60 et 67).

Les desquamations observées sur la Pierre de Langres sont fréquemment de type débit en mille-feuille. Elles se développent principalement aux angles des blocs. Cette altération est liée à l'action conjuguée du gel et des variations thermiques, facteurs qui provoquent l'apparition de très nombreuses fissures qui laminent la roche et entraînent une perte de cohésion. A l'échelle du microfaciès, nous avons constaté que les fissures passent préférentiellement à l'intérieur de la matrice dolomitisée en contournant les entroques et les ciments syntaxiaux. Nous pouvons donc proposer que cette matrice soit microporeuse et qu'elle présente une forte tendance à la gélivité.

Les fragmentations se produisent le long des litages sédimentaires, particulièrement dans certains petits blocs qui présentent un net débit en plaquettes. D'autres morphologies sont parfois observées, fréquemment en relation avec des traces de terriers (bioturbations et perforations) dont le contenu ou le taux de dolomitisation est différent de la roche encaissante.

Evolution télogénétique :

La Pierre de Langres est un **calcaire granulaire hétérogène** composé de gros entroques liés d'une part par une matrice micritique partiellement recristallisée en dolomite et d'autre part par des ciments syntaxiaux (Fig. 56). Les microfractures sont généralement localisées à l'intérieur de la matrice dolomitisée et à la limite des hétérogénéités de texture. La **microporosité de la matrice** et la différence de phase avec l'ensemble entroque + ciment syntaxial contrôlent donc la gélivité du calcaire et sa sensibilité à la desquamation.

La structuration marquée de la roche : litages et bioturbations, implique la présence de nombreuses surfaces d'anisotropie et de barrières de porosité, ces **hétérogénéités de structure** conditionnent la fragmentation des blocs (remparts de Langres, par exemple).

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altérations privilégiées par la caractéristique
Présence d'oxydes de fer remobilisables	Nature des phases diagénétiques	Patine et encroûtements ferrugineux
Présence d'une matrice micritique dolomitisée	Nature du faciès de dépôt	Forte sensibilité à la desquamation Tendance à la gélivité
Hétérogénéités de dolomitisation du faciès Zones d'anisotropie de porosité	Développement des phases diagénétiques	Anisotropie de comportement thermique et tendance à la fissuration
Présence de litages sédimentaires marqués	Nature du faciès de dépôt Structure du calcaire	Forte sensibilité à la fragmentation
Présence de niveaux argileux, de bioturbations	Nature du faciès de dépôt Structure du calcaire	Forte sensibilité à la fragmentation

Tab. 29 : Caractéristiques de la Pierre de Langres qui conditionnent son comportement en œuvre.

Les calcaires micritiques du Barrois :

Ces calcaires ne sont pas de très bonnes pierres à bâtir, ils sont fréquemment gélifs et les blocs, soumis à *l'action du gel*, présentent des éclatements et un écaillage, allant parfois jusqu'à la destruction totale de l'élément de maçonnerie. En milieu rural, nous avons constaté quelques traces de ravinement dans les bioturbations et une fragmentation selon les litages (débit en plaquette).

En milieu urbain (par exemple Troyes et Bar-sur-Aube), les traces d'efflorescences et de desquamation sont très fréquentes. La roche est profondément altérée et pulvérulente.

Evolution télogénétique :

Certains calcaires du Barrois sont uniquement composés d'une **phase micritique matricielle** (texture mudstone) est fréquemment gélive (infraporosité, Fig. 58 page 141). Les bancs exploités pour la pierre de taille étaient d'ailleurs sélectionnés avec soin, car la pierre est généralement inapte à une mise en œuvre. Cependant, malgré cette sélection, la roche ne résiste pas à l'action du gel et se fissure.

De plus, la roche est très sensible aux *recristallisations sulfatées* et aux cristallisations de gypse à l'intérieur du calcaire. Ces processus d'altération provoquent des desquamations et une importante pulvérulence, parfois accompagnée d'efflorescences salines. Les échantillons observées ne présentaient pas de couche de calcin, mais par homologie avec la micrite matricielle non recristallisée observée sur des échantillons de Calcaire grossier (Fig. 83), nous pouvons supposer que la présence d'une patine superficielle protégerait la roche de l'épigénie en gypse.

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altérations privilégiées par la caractéristique
Très importante phase micritique non recristallisée Importante micro et infra porosité	Nature du faciès de dépôt Nature de la porosité	Tendance à la gélivité Forte sensibilité à la desquamation
Litages sédimentaires parfois marqués Barrières de porosité	Nature du faciès de dépôt Structure du calcaire	Forte sensibilité à la fragmentation

Tab. 30 : Caractéristiques des Calcaires du Barrois qui conditionnent leur comportement en œuvre.

Les calcaires oolithiques dijonnais :

La morphologie d'altération la plus couramment observée sur la Pierre de Dijon est une fragmentation des blocs selon les litages et les hétérogénéités de structure (d'origine sédimentaire ou tectonique). Des desquamations en mille-feuilles s'observent régulièrement aux angles des blocs en relation avec la position architecturale contraignante (*fréquence des cycles thermiques et action du gel*). Enfin, une autre forme de dégradation

s'observe sur les blocs plus épais, provenant de la base de l'unité (dite de Dijon-Corton), il s'agit d'un léger décollement superficiel qui se désagrège progressivement avec l'apparition d'alvéoles très peu profondes.

Description des altérations en œuvre :

A Dijon et à Talant (21), le calcaire oolithique utilisé dans les constructions est souvent délité selon les litages et les stylolithes sédimentaires, mais aussi au niveau des diaclases et des fissures verticales remplies de calcite (sparite secondaire). Cette fragmentation est particulièrement fréquente dans les blocs de petite taille, provenant sans doute de la partie supérieure de la formation (dite de Ladoix) dont nous avions souligné la tendance in-situ à se débiter en plaquettes (voir pages 141-142). D'autres blocs à l'aspect noduleux se délitent suivant les lits sédimentaires, soulignés par des accumulations de coquilles de brachiopodes. De plus, le faciès de ces blocs finement fragmentés paraît légèrement plus marneux que la Pierre de Dijon de référence.

Les desquamations sont de plusieurs types :

- un léger encroûtement recouvre la surface du calcaire et une grande plaque (exfoliation) se décolle, en mettant à nue une roche nettement pulvérulente. L'action des *cycles thermiques* semble ici aussi importante que les cristallisation salines à l'intérieur de la roche (*subflorescences*).

- sous les encroûtements plus importants, la desquamation en feuillets est nettement marquée et la différence entre la plaque externe et les feuillets internes est moins marquée. Les feuillets inférieurs ont une épaisseur millimétrique et la profondeur totale de cette altération (généralement centimétrique) est inférieure à celle de l'exfoliation citée précédemment. Dans ce cas, *l'action des sels* est prédominante et se matérialise par la microfissuration intense liée à la formation d'efflorescences ou de subflorescences.

Enfin, signalons la présence d'une morphologie d'altération particulière, observée sur des blocs épais, parfois bicolores, provenant de l'unité stratigraphique dite de Dijon-Corton. Ces blocs ne sont pas encroûtés et sont humidifiés par l'action des précipitations mais ils ne sont pas soumis à la pluie battante. En surface, la roche est légerement desquamée, avec décollements de fins feuillets millimétriques comprenant seulement une ou deux couches d'oolithes. Les feuillets sont très cohérents et restent en place, l'altération évolue alors en désagrégation progressive, dont le développement est limité à l'épaisseur de roche desquamée. Une alvéolisation se forme, mais sur une profondeur très faible, quelques millimètres seulement. Puis l'extension latérale des alvéoles augmente progressivement, jusqu'à destruction de l'ensemble du feuillet décollé et le décapage de la surface.

Evolution télogénétique :

L'Oolithe de Dijon est un calcaire compact et peu poreux qui présente une bonne durabilité en œuvre et est peu sensible à la pollution urbaine, pourtant dans des environnements très agressifs, quelques desquamations de surface peuvent s'observer.

La présence d'une **calcite en mosaïque** qui obture totalement la macroporosité intergranulaire donne à la roche un très fort taux de cohésion granulaire. Les désagrégations ne s'observent que dans les surfaces déjà desquamées. En effet, la cimentation intense maintient les éléments même si la roche est microfissurée parallèlement à la surface du bloc, elle conserve alors une certaine cohérence. La microfragmentation ne se produit donc que dans une seconde phase, par désagrégation progressive des feuillets déjà limités dans une dimension par des fissures.

Enfin, notons que **les structures sédimentaires** (litages), **diagénétiques** (stylolithes) et les **plans de fractures** (diaclases et failles) provoquent l'apparition de nombreuses fragmentations.. Ces altérations, par fissuration le long des hétérogénéités, s'observent principalement dans les pierres provenant de l'unité supérieure dite de Ladoix. Dans ce cas, les surfaces préférentielles de fragmentation sont les litages sédimentaires car les bancs ont une tendance naturelle à se déliter en plaquettes.

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altérations privilégiées par la caractéristique
Présence de litages marqués (unité de Ladoix)	Nature du faciès de dépôt	Forte sensibilité à la fragmentation
Présence de stylolithes et de fractures verticales	Nature des phase diagénétiques tardives, Structure du calcaire	Forte sensibilité à la fragmentation
Obturation totale de la porosité intergranulaire Présence de calcite de blocage	Nature et développement des phases diagénétique	Forte durabilité en œuvre, faible sensibilité à l'action du gel et à la recristallisation

Tab. 31 : Caractéristiques de la Pierre de Dijon qui conditionnent son comportement en œuvre.

Planches :

- C/ Principales altérations en œuvre du Calcaire à débris
- D/ Exemples de morphologies de désagrégation (généralisées ou alvéolaires)
- E/ Principales altérations en œuvre du Calcaire grossier
- F/ Autres exemples d'altération en œuvre
- G/ Evolution microscopique des calcaires en oeuvre

Planche C
Principales altération en œuvre du Calcaire à débris

1/ Evolution de la nature des encroûtements selon l'exposition des blocs

Basilique de Charleville-Mézières (08), échelle = 1 mètre environ

Dans la zone interne du porche, les blocs sont recouverts par une croûte noire (accumulation de particules éoliennes et atmosphériques : cendres volantes). Vers l'extérieur, la croûte noire disparaît progressivement et est remplacée par une croûte verte (micro-organismes, mousses et lichens). Dans ce cas, les deux types de croûtes ne provoquent pas de véritables altérations de la pierre, mais elles sont inesthétiques (comportement de type E). Enfin, sur la surface externe, exposée à la pluie battante, les encroûtements sont absents et les sculptures sont desquamées (desquamation en feuillets, comportement de type C).

2/ Désagrégation profonde en milieu très agressif

Charleville-Mézières (08), échelle = 40 centimètres environ

Les angles exposés à la pluie sont profondément altéré (désagrégation généralisée avec mise en relief de certains litages) : comportement de type D avec amplification de l'altération par la nature de la roche : cumul avec l'altération préférentielle. Alors que dans la partie plus abritée (à droite), le pilier est encroûté et est moins altéré (quelques desquamations superficielles ou en feuillets) : comportements de type E et F où l'altération développée est différente de l'altération préférentielle.

3/ Desquamation superficielle.

Tribunal d'instance de Charleville-Mézières (08), échelle = 40 centimètres environ

Les desquamations et les cloques apparaissent principalement selon des directions légèrement obliques, qui correspondent aux litages sédimentaire du calcaire. Elles se développent dans des niveaux plus altérables que le microfaciès de référence. Ce dernier n'est quasiment pas altéré, si ce n'est par un décollement superficiel de l'encroûtement et la patine (notamment sur le premier bloc d'élévation). Les blocs de soubassement par contre présentent quelques traces de dissolution liées à leur exposition à la pluie battante.

4/ Désagrégation profonde en milieu rural

Hannogne-saint-Martin (08), échelle = 25 centimètres environ

Toute la surface des blocs, de ce mur exposé à la pluie, est érodée est développe une morphologie de désagrégation généralisée. Certains litages sont complètement détruits (indiqué par la main) et le Calcaire à débris contient donc des microfaciès inaptes à l'utilisation en œuvre (comportement de type B1). De plus, on remarque une tendance à l'alvéolisation (au dessus de la main) dans la zone d'angle soumise à la pluie et au vent.

Planche D
Exemples de morphologies de désagrégation (généralisées ou alvéolaires)

1/ Alvéolisation de l'Oolithe vacuolaire

Pilier externe, Basilique de l'Epine (51), échelle = 30 centimètres environ

Ce pilier rond, très exposé à la pluie et au vent présente une profonde alvéolisation en nids d'abeille surmontée d'une érosion différentielle des litages(bloc du pilier à la limite supérieure de la photo) comportements de type B2 lié à la forte agressivité locale du microclimat d'exposition. De plus, les zones encroûtées plus noires présentent des desquamations en feuillets et des désagrégation généralisée liée à la pénétration des sels dans la roche.

2/ Désagrégation généralisée.

Chapiteau du porche, Basilique de l'Epine (51), échelle = 15 centimètres environ

Toute la surface du chapiteau sculpté est désagrégée et une légère desquamation peut parfois s'observer à la périphérie de la zone pulvérulente. Le comportement est de type D, car l'altération est amplifiée par la nature granulaire et très poreuse du calcaire.

3/ Désagrégation alvéolaire, orientée selon les litages sédimentaires.

Angle d'une habitation, Saint-Leu-d'Esserent, échelle = 20 centimètres environ

La désagrégation est nettement orientée selon la direction des litages obliques sédimentaires avec une érosion différentielle de certains niveaux. Cette altération, amplifiée par la nature du calcaire (microfaciès type 2a du Calcaire grossier) peut être considérée comme étant une alvéolisation, même si la structure en nids d'abeille n'est pas très nette. En effet, il s'agit d'une désagrégation, avec des surcreusements localisés et une amplification de l'altération aux extrémités de blocs, où l'alternance des cycles d'évaporation/imbibition est la plus importante (exposition à la pluie et au vent).

4/ Désagrégation profonde localisée à certains litages sédimentaires.

Hannogne-saint-Martin (08), échelle = 30 centimètres environ

Les blocs moins altérées (sur la droite) présentent une décoloration ou un début de désagrégation. Les autres blocs présentent une désagrégation localisée, à des stades plus ou moins avancés d'altération (selon l'agressivité du milieu d'exposition). La désagrégation est nettement orientée selon la direction des litages obliques sédimentaires avec une érosion différentielle très prononcée de certains niveaux. Dans ce cas, il ne s'agit pourtant pas d'une alvéolisation mais du creusement de certains microfaciès de la roche, localisés dans certaines lamines (microfaciès type 2) : comportement de type B1 : pierre localement inapte à l'utilisation en œuvre.

Planche E
Principales altérations en œuvre du Calcaire grossier

1/ Desquamation en feuillets des angles de blocs

Pilier extérieur, Mairie de Reims (51), échelle = 25 centimètres environ

Ce pilier à base carrée, très exposé à la pluie et au vent présente une altération de toutes ses arêtes et de certaines surfaces. La morphologie d'altération correspond à une desquamation en mille-feuille 'des angles) et des surfaces enrichies en sels. Il s'agit donc du altération conditionnée par le climat d'exposition (milieu urbain pollué, surface exposée à la pluie) et par les conditions de mise en œuvre (nombreuses arêtes de bloc). Mais l'importance de la dégradation est amplifiée par la nature du calcaire (à matrice micritique et principalement microporeux) : comportements de type C et D.

2/ Décollement pelliculaire.

Elévation de mur extérieur, Mairie de Reims (51), échelle = 25 centimètres environ

Des cloques et des desquamations s'observent sur toute la surface du mur. La patine et les légers encroûtements sont parfois décollés en larges feuillets (gauche de la photo) puis ils sont érodés et la roche légèrement pulvérulent est mise à nue.

3/ Remontées capillaires et efflorescences dans la zone de rejaillissement.

Mur récent, quartier Laon-Zola, Reims (51), échelle = 15 centimètres environ

Cette zone représente un bandeau de pierre dure avec des placages de Calcaire grossier lutétien en assise de rejaillissement. Non, seulement le Calcaire grossier est encroûté à la base, mais des efflorescences apparaissent dans la zone supérieure partiellement décolorée. Le maximum d'efflorescences se produit au niveau du liseré plus sombre, 20 centimètres au dessus du bandeau. L'utilisation de cette pierre à cette position architecturale se révèle donc être un mauvais choix puisque des traces d'altération apparaissent à la surface (et en profondeur) après seulement 10 ans de mise en œuvre (comportement de type B2 : pierre inadaptée à certaines utilisation en œuvre).

4/ Destruction de bandeaux en Calcaire grossier micritique

Quartier St-André, Reims (51), échelle = 40 centimètres environ

De la même façon, on voit ici que les bandeaux et les rebords de fenêtre en Calcaire grossier micritique sont quasiment totalement altérés (comportement de type B2, pierre détruite en moins de 100 ans de mise en œuvre). Alors que les reste du bandeau, en Oolithe vacuolaire ne présente pas de traces d'altération (comportement de type H).

Planche F
Autres exemples d'altérations

1/ Fragmentation selon les litages sédimentaires (Pierre de Dijon)

mur du Castrum, rue de Tivoli (21), échelle = 30 centimètres environ

et 2/ Fragmentation selon les litages sédimentaires (Pierre de Langres)

Rempart de Langres (52) échelle = 40 centimètres environ

De nettes fissurations selon les litages sédimentaires provoquent ou sont en train de provoquer la fragmentation des certains blocs (comportement de type B2). Alors que d'autres, qui ne contiennent pas cette structuration sédimentaire, ne sont pas altérés.

3/ Déflation au centre d'un pavé (Pierre de Givet).

Boulevard Lundy, Reims (51), échelle = 10 centimètres environ

La desquamation peu profonde paraît être localisée au centre du bloc, mai une petite différence de teinte (entre du brun et du gris-bleuté) témoigne de l'importance des différences de microfaciès (et de microporosité ?) à la surface de chaque pavé.

4/ Destruction de certains éléments dans un pan de mur (Pierre d'Euville)

Ancienne carrière Fèvres et C^{ie}, Euville (55), échelle = 75 centimètres environ

Alors que la majorité des blocs ne présentent pas de traces d'altération, certains éléments sont totalement altérés, parfois sur une profondeur supérieure à 20 centimètres. Il s'agit de la mise en œuvre accidentelle de blocs inaptes à une mise en œuvre (comportement de type A). Leur microfaciès est moins cimenté que le microfaciès de référence de Pierre d'Euville et est rapidement altéré par décohésion granulaire.

Planche G
Evolutions microscopiques des calcaires en oeuvre

1/ Encroûtement de gypse sur de l'Oolithe vacuolaire (microfaciès type 3b)

microfaciès de type 3b, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité inter et intragranulaire
a/ Macropore intergranulaire
b/ Macropore moldique intragranulaire

2/ Microfaciès bioclastique de l'Oolithe vacuolaire (fromentelle)

microfaciès de type 2a, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Biosparite, grainstone, à forte porosité inter et intragranulaire

3/ Microfaciès à nucleus conservés

microfaciès de type 3b, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oopelsparite, grainstone, à forte porosité intergranulaire et microporosité intragranulaire

4/ Microfaciès à gros lithoclastes micritiques

microfaciès de type 4, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite à lithoclastes, grainstone, à forte porosité intergranulaire
c/ lithoclaste micritique

5/ Microfaciès compacté du sommet de l'Oolithe vacuolaire

microfaciès de type 5c, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité inter et intragranulaire
d/ Oolithe préservée à nucleus non dissous
e/ Oolithe écrasée

6/ Microfaciès totalement dolomitisé

microfaciès de type 6c, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oodolosparite, grainstone, à très forte macroporosité
f/ cristaux de dolosparite qui ont remplacé la calcite des oolithes et des ciments

7/ Oolithe vacuolaire : variété à Milioles

microfaciès de Combles-en-Barrois, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité intergranulaire
g/ Miliole en nucleus d'oolithes de type β
h/ ciment syntaxial lié à la présence d'un débris d'échinoderme dans le nucleus d'une oolite

8/ Oolithe vacuolaire : variété à cimentation sparitique secondaire (Pierre de Chévillon)

microfaciès de Chévillon, objectif *40, barre de référence = 400 µm, LPA
Oosparite, grainstone, à forte porosité intragranulaire et à porosité intergranulaire réduite
i/ Phase de cimentation secondaire (sparite drusique de « blocage ») obturant presque totalement la macroporosité intergranulaire.

Chapitre 3 :

Comportements télogénétiques des Pierres à bâtir

- Altérabilité en œuvre des calcaires utilisés en Champagne-Ardenne. Relation entre microfaciès et altérations développées.
- Hiérarchisation de l'importance des composants du microfaciès dans l'altération en œuvre de la roche.
- Notion d'altération privilégiée.
- Comportements télogénétiques des calcaires utilisés comme pierre à bâtir en Champagne-Ardenne.

Chapitre 3 :

Comportements télogénétiques des pierres à bâtir

Généralités :

Dans ce chapitre, nous analyserons les modes d'altérations caractérisés et les mettrons en relation avec les paramètres qui contrôlent leur développement (microclimat d'exposition, position architecturale de mise en œuvre et composition de la roche elle-même).

Nous procéderons en trois étapes :

- Comparaison des altérations développées par l'ensemble des calcaires étudiés et mise en évidence de l'importance du microfaciès dans l'évolution en œuvre d'une roche ;
- Introduction de la notion d'altération préférentielle ;
- Définition de la notion de comportement télogénétique et application de ce concept.

1/ Altérabilité des calcaires utilisés en Champagne-Ardenne, relations entre microfaciès et altérations développées

Importance du faciès de dépôt et du séquençage diagénétique dans l'altérabilité d'un calcaire

L'étroite relation entre l'altération développée par un calcaire et le microclimat d'exposition est démontrée (voir annexe 2). Pour une roche donnée l'apparition, la répartition et la croissance des dégradations dépendent principalement des circulations d'eaux, de la composition de l'atmosphère ambiant et des composés chimiques présents.

On peut aussi considérer que la durabilité en œuvre d'une roche est conditionnée par son altérabilité aux divers agents d'agression. Dessandier (1995), montre ainsi que la durabilité du tuffeau de Touraine à l'action des sels est principalement corrélée à la qualité des liaisons intercristallines et de la cohésion entre les microparticules qui composent la roche. Ce point de vue modifie considérablement les interprétations sur l'altération des pierres à bâtir, car il implique que les dégradations observées en œuvre ne sont pas

simplement le résultat d'un facteur altérant sur un matériau inerte. Mais, qu'il s'agit de la réponse d'un géomatériau aux propriétés spécifiques à divers agents d'altération dont la nature et le degré d'agressivité sont conditionnés par le microclimat d'exposition et la position de mise en œuvre.

Dans le chapitre 2, nous avons déterminé pour chaque calcaire les caractéristiques du faciès et les composants du microfaciès qui influencent le développement des altérations (Tab. 19, 21, 23, 26, 28, 29, 30 et 31). Ces observations peuvent être synthétisées en un tableau unique (Tab. 32), fournissant des clefs d'altérabilité pour les calcaires étudiés dans ce travail, mais pouvant être appliquées à d'autres roches.

Caractéristique influençant le comportement en œuvre	Nature de la caractéristique	Altération privilégiée par la caractéristique
Présence d'une matrice micritique non recristallisée Importante infra et microporosité	Nature du faciès de dépôt	Forte sensibilité à la desquamation Forte sensibilité à la recristallisation Tendance à la gélivité
Grande taille des éléments figurés		Plus grand impact des pertes d'éléments
Petites dimensions des éléments figurés		Fortes propriétés d'absorption capillaire
Présence d'oxydes de fer remobilisables	Nature des phases diagénétiques	Patine et encroûtements ferrugineux
Ciment principal de type syntaxial		Forte sensibilité à la décohésion granulaire
Ciment principal de type palissadique		Résistance à la microfissuration
Obturation partielle de la porosité intergranulaire Absence de calcite de blocage Valeur de la macroporosité	Développement des phases diagénétiques	Forte sensibilité à la désagrégation
Grands macropores très abondants Nature et valeur de la porosité	Nature du faciès de dépôt et des phases diagénétiques, Développement des phases diagénétiques	Non gélivité, compensation des dilatations. Forte sensibilité à la désagrégation. Importante pénétration des solutions sulfatées : présence de subflorescences.
Obturation totale de la porosité intergranulaire Présence de calcite de blocage Valeur de la macroporosité	Nature et développement des phases diagénétiques	Forte durabilité en œuvre, faible sensibilité à l'action du gel et à la recristallisation
Hétérogénéités de dolomitisation du faciès Zones d'anisotropie de porosité		Anisotropie de comportement thermique et tendance à la fissuration
Hétérogénéités de texture et de microfaciès Hétérogénéités de porosité	Nature du faciès de dépôt, Structure du calcaire.	Fréquence des zones d'anisotropie (tendance à la fissuration)
Présence de litages sédimentaires marqués		Forte sensibilité à la fragmentation
Présence de niveaux argileux, de bioturbations		Forte sensibilité à la fragmentation ou au ravinements
Présence de stylolithes et de fractures verticales	Nature des phase diagénétiques tardives, Structure du calcaire	Forte sensibilité à la fragmentation
Présence d'une couche de calcin	Evolution télogénétique préliminaire	Protection contre les pénétrations de solutions sulfatées (recristallisations).
Colmatage de la porosité de surface (croûte ou calcin)		Forte sensibilité au décollement pelliculaire

Tab. 32 : Caractéristiques propres au calcaire qui conditionnent son comportement en œuvre.

Ces caractéristiques du faciès ou du microfaciès qui influencent la dégradation de la pierre en œuvre peuvent être hiérarchisées selon leur nature et leur importance (Fronteau *et al.*, 1997).

Le faciès de dépôt conditionne :

- la nature et la quantité des éléments figurés présents : par exemple, la Pierre d'Euville est entièrement constituée d'entroques, ce qui influence la nature et le taux de développement de la cimentation syntaxiale ; de plus ces éléments sont de grande taille, ce qui amplifie l'impact des décohésions granulaires. Dans le Calcaire à débris, les éléments sont de petite taille et conditionnent la morphologie du réseau poreux. Enfin, dans le cas des calcaires micritiques, le faciès de dépôt et la texture du microfaciès (mudstone à packstone) sont directement en relation avec la quantité d'éléments figurés.

- la nature de la phase de liaison : les faciès à matrice micritique possèdent généralement une infra et une microporosité importante (Calcaires oomicritiques du Barrois, Liais de Courville), alors que les calcaires granulaires sont plutôt macroporeux (Calcaire à débris, Oolithe vacuolaire).

- la structure sédimentaire de la roche : les bancs de certains calcaires sont plans et épais (Calcaire grossier du centre du bassin de Paris), d'autres se débitent en plaquettes (Pierre de Dijon, unité de Ladoix) ou s'organisent en litages obliques de grande amplitude ou en litages entrecroisés (Oolithe vacuolaire, Calcaire à débris). Et, dans certains cas, à une échelle inférieure , la structure des lamines sédimentaire conditionne la présence et la fréquence des microfaciès fortement altérable (cas du Calcaire à débris, Fig. 18, page 63).

L'évolution diagénétique et les phases successives de poronécrose (par cimentation ou compaction) et de porogenèse (par dissolution) modifient la porosité de la roche :

- les phases de cimentation : leur présence ou leur absence induisent directement l'importance de la macroporosité intergranulaire des calcaires sans matrice micritique. La calcite en mosaïque, dite calcite de blocage apparaît capitale puisque les calcaires où celle-ci est absente (Calcaire à débris, Oolithe vacuolaire, Pierre de Saint-Leu) ont une importante macroporosité résiduelle et un taux de cohésion granulaire faible. Par contre, les calcaires qui contiennent cette phase diagénétique ont une porosité totale faible et un très fort taux de cohésion (Pierre de Dijon, Calcaires dévoniens de l'Ardenne). De plus, certains types de cimentation sont plus ou moins favorables à certaines formes d'altérations : par exemple, les ciments syntaxiaux liés aux échinodermes (Calcaires à débris, Entroquite de la Meuse) dont les surfaces d'accolements montrent une tendance au décollement et donc à la décohésion granulaire (Fig. 85, 88 et 89). A l'inverse, les ciments palissadiques de l'Oolithe vacuolaire augmentent la cohésion granulaire de la roche et limitent l'altérabilité du calcaire à la microfissuration (et donc à la desquamation).

- les phases de dissolution : l'augmentation de la porosité causée par une phase diagénétique est principalement observée dans l'Oolithe vacuolaire, où 75% des nucléus oolithiques sont dissous (Fig. 26 et 31). Dans l'Entroquite de la Meuse, la microporosité est parfois aussi importante que la macroporosité

intergranulaire (Fig. 52, page 133). Cette microporosité, parfois facteur de gélivité est en partie provoquée par une dissolution partielle des éléments micritiques et des débris de madréporaires (Fig. 54, page 136). Enfin, remarquons que de nombreux macropores moldiques du Calcaire grossier correspondent à d'anciennes coquilles de gastéropodes, dont l'aragonite a été dissoute.

- les phases de cristallisation (hors cimentation) ou de recristallisation. Dans l'Oolithe vacuolaire, la dolomitisation totale rend la roche inapte à une utilisation en œuvre, nous avons constaté que les cristaux de dolomite sont moins sensibles à l'épigénie en gypse que la calcite (Fig. 75, page 171). Dans le Calcaire grossier, des silicifications de la matrice peuvent augmenter sa dureté et réduire l'altérabilité aux sels de la roche. Mais nous avons surtout montré que la recristallisation précoce de la matrice micritique diminue la microporosité du calcaire (Fig. 43 et 48, Tab. 15). Les bancs gélifs tels le bousin sont non recristallisés alors que les bancs de Moellon, de Liais et de Roche contiennent une quantité croissante de microsparite et de sparite : la recristallisation de la matrice est ici proportionnelle à la résistance à la compression et inversement proportionnelle à la porosité totale, qui passe de 50 à 20 et même 13%.

Nous montrons aussi que les différentes caractéristiques, mises en évidence et récapitulées dans le tableau 32, ont une importance variable selon chaque calcaire. Par exemple, la structure sédimentaire en litages obliques de l'Oolithe vacuolaire n'influence quasiment pas l'altération de la roche alors qu'elle influence l'altérabilité du Calcaire à débris (fréquence du microfaciès très altérable type 2) et qu'il s'agit de la principale cause d'altération de la Pierre de Givet ou de la Pierre de Dijon (fragmentation suivant les litages ou les bioturbations).

Mais nous remarquons aussi que les caractéristiques qui influencent le plus la durabilité générale de la roche sont celles qui conditionnent ou modifient la porosité ou le degré de cohésion granulaire. C'est pourquoi, lors de la mise en relation des altérations développées avec les microfaciès des pierres à bâtir, nous insisterons sur ces deux caractéristiques : texture et porosité (Fig. 91 à 92).

Relations entre microfaciès et altérations développées

A travers les deux chapitres précédents, nous avons défini des microfaciès de référence de chacune des pierres de taille étudiée (Fig. 91) ainsi que les altérations développées en œuvre ou in-situ (Fig. 93). De plus, nous avons comparé les propriétés pétrophysiques des principales pierres étudiées (Fig. 92) et quantifié les différences de microfaciès par analyse d'images (voir annexe 1 et Fig. 15, 18, 29, 30, 48, 49…).

Si nous considérons l'ensemble des calcaires étudiés en fonction de la nature du faciès de dépôt (Fig. 91), nous pouvons classer ces pierres en trois grands groupes :

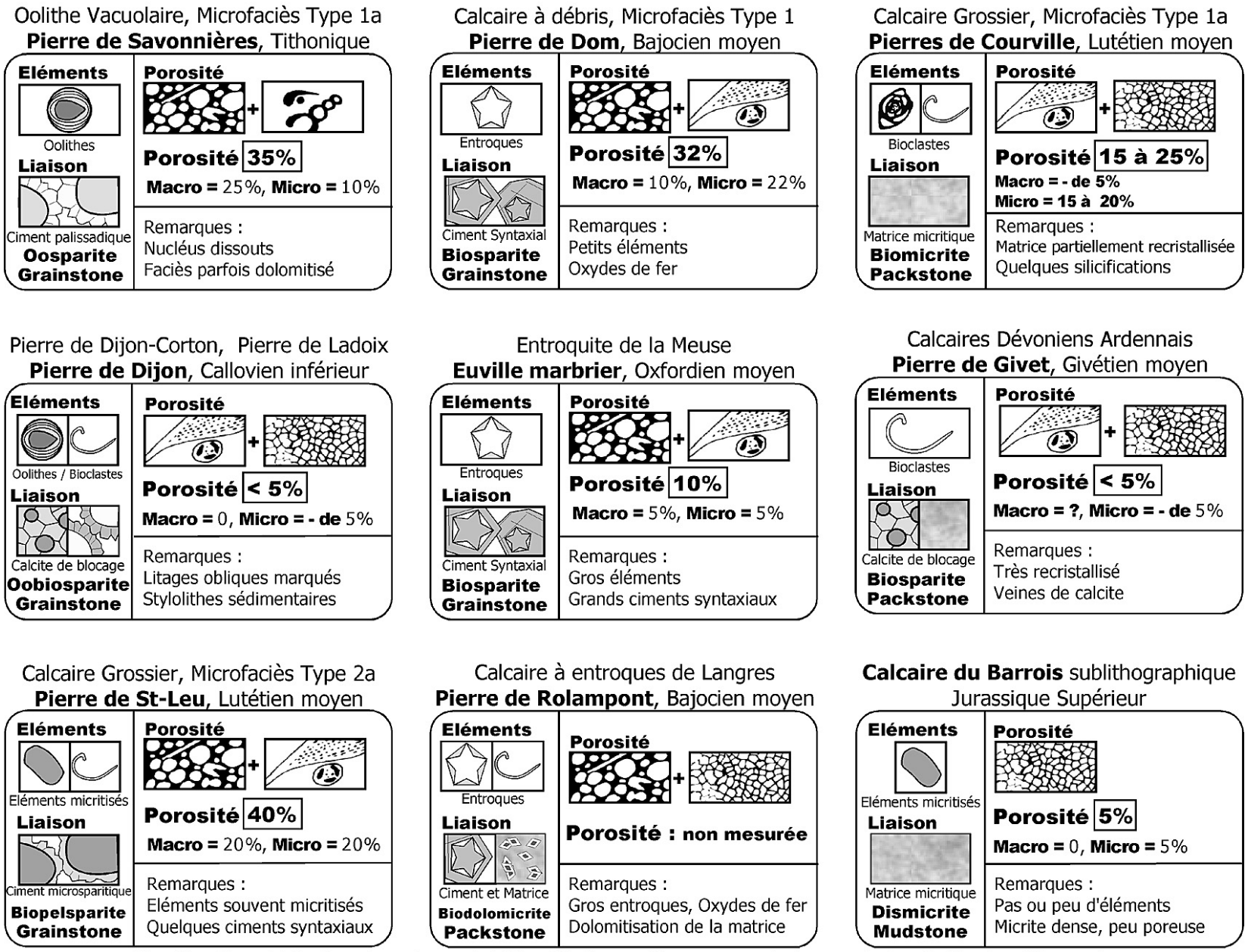


Fig. 91 : Caractérisation des pierres à bâtir utilisées en Champagne-Ardennes (microfaciès de référence)

1) - les calcaires à support granulaire (grainstone) à oolithes et/ou bioclastes, comprenant l'Oolithe vacuolaire, la Pierre de Dijon et les variétés granulaires de Calcaire grossier comme la Pierre de St-Leu.

2) - les calcaires à support granulaire (grainstone) à entroques, regroupant le Calcaire à débris et les Entroquites de la Meuse.

3) - les calcaires à micrite matricielle (mudstone à packstone), avec les calcaires type Courville et les Calcaires à cérithes (formation du Calcaire grossier), les calcaires dévoniens de l'Ardenne et les calcaires du Barrois. La Pierre de Langres se place aussi dans cette catégorie bien que la matrice soit dolomitisée.

Cependant, la caractérisation pétrophysique et le séquençage diagénétique permettent de regrouper différemment ces calcaires en tenant compte des types de porosité (Fig. 92) et des taux de cohésion granulaire (par exemple, la porosité totale varie entre moins de 5% et plus de 40%).

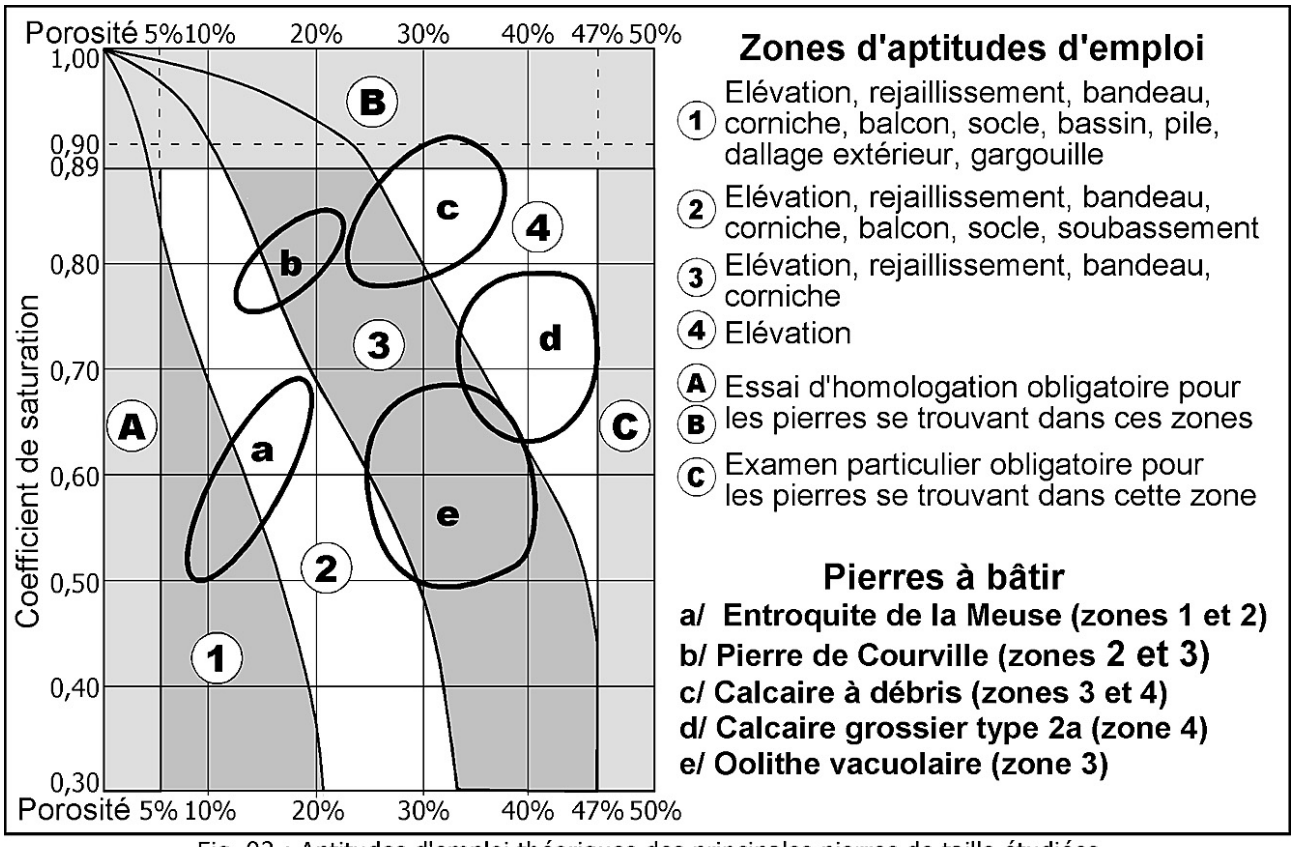


Fig. 92 : Aptitudes d'emploi théoriques des principales pierres de taille étudiées

Ainsi, nous pouvons classer les pierres selon leur porosité, en tenant compte du volume totale des vides et de la taille des pores :

A) - **les calcaires à macroporosité dominante :** Oolithe vacuolaire, Calcaire à débris et calcaires granulaires du Calcaire grossier ;

B) - **les calcaires à infra et microporosité dominantes :** Calcaires oomicritiques du Barrois, Calcaires à entroques de Langres et calcaires micritiques du Calcaire grossier (type Courville ou à cérithes) ;

C) - **les calcaires peu poreux :** Entroquite de la Meuse (type marbrier), Calcaire givétiens, Calcaires sublithographique du Barrois et Oolithe de Dijon.

Dans l'objectif de ce travail, il est apparu important de rapporter la morphologie du milieu poreux au microfaciès sédimento-diagénétique. En effet, la porosité d'un calcaire donnée par son faciès de dépôt et par son séquençage diagénétique (voir pages 25 à 27) et la caractérisation des microfaciès établie au chapitre 1, nous permettront de recouper nos deux classements :

A) - Les pierres macroporeuses ont une texture de type grainstone, sans cimentation secondaire de sparite (calcite en mosaïque).

B) - Les calcaires microporeux ont des textures wackestone à packstone et contiennent une matrice micritique plus ou moins recristallisée.

C) - Les calcaires peu poreux ont soit une texture grainstone dont les pores intergranulaires sont totalement obturés pas la cimentation (Euville marbrier, Oolithe de Dijon), soit une texture packstone avec colmatage de la microporosité intercristalline lors de la diagenèse d'enfouissement (Pierre de Givet, calcaires dévonien de l'ardenne), soit une texture mudstone, avec une micrite sans éléments de nanotexture très dense (Pierre de Gudmont, Calcaires du Barrois).

Nous obtenons alors des regroupements sédimento-diagénétiques tenant compte à la fois de la porosité et du taux de cohésion granulaire :

- **CM**/ : calcaires à **C**imentation sparitique et à forte **M**acroporosité : Calcaire à débris, Oolithe vacuolaire, Euville construction et les différentes pierres granulaires du Calcaire grossier (type St-Leu).

- **C0**/ : calcaires à **C**imentation sparitique peu poreux **(0)** : Entroquites de la Meuse (Euville marbrier), et Pierre de Dijon.

- **Mm**/ : calcaires à **M**atrice micritique et à forte **m**icroporosité : Pierres de Courville et Calcaires oolithiques du Barrois.

- **M0**/ : calcaires à **M**atrice micritique peu poreux **(0)** : Calcaires du Barrois sublithographiques.

- **Rm**/ : calcaire à phase de liaison **R**ecristallisée et à forte **m**icroporosité : Calcaire à entroques de Langres (Pierre de Rolampont).

- **R0**/ : calcaire à phase de liaison **R**ecristallisée peu poreux **(0)** : Calcaires givétiens de l'Ardenne.

Auxquels nous pourrions rattacher d'autres types, mais ceux-ci resteront théoriques, car nous n'en avons pas d'exemples nets dans ce travail :

- **Cm/** : calcaires à **C**imentation sparitique et à forte **m**icroporosité.
- **MM/** : calcaires à **M**atrice micritique et à forte **M**acroporosité.
- **RM/** : calcaire à phase de liaison **R**ecristallisée et à forte **M**acroporosité

Nous pouvons alors comparer les altérations en œuvre des différentes pierres de taille et observer les éventuelles similitudes ou les divergences (Fig. 93).

Calcaire à débris : CM

Patine rousse
Désagrégation généralisée
Désagrégation alvéolaire localisée
Desquamation en feuillets
Fragmentation
Encroûtement et recristallisation en gypse

Oolithe vacuolaire : CM

Ravinements
Desquamation
Désagrégation alvéolaire
Désagrégation généralisée
Fragmentation
Encroûtement et recristallisation en gypse
Développement d'organismes

Pierre de Courville : Mm

Calcin
Dissolution de surface
Décollement pelliculaire
Desquamation en feuillets
Fragmentation
Encroûtement et recristallisation en gypse

Pierre de Saint-Leu : CM

Dissolution de surface
Désagrégation alvéolaire
Desquamation en feuillets
Développement d'organismes
Encroûtement et recristallisation en gypse

Entroquite de la Meuse : Cm et C0

Dissolution de surface
Exfoliation et microfragmentation
Desquamation et désagrégation des angles
Désagrégation de surface
Désagrégation généralisée

Pierres de Givet : R0

Déflation (desquamation)
Fragmentation progressive
Désagrégation
Desquamation des angles
Fragmentation

Pierre de Langres : Rm

Patine
Desquamation en feuillets
Fragmentation

Calcaires du Barrois : Mm et M0

Eclatement et écaillage
Ravinements
Fragmentation
Encroûtement et recristallisation en gypse

Pierre de Dijon : C0

Desquamation en feuillets
Décollement superficiel et désagrégation
Fragmentation

Fig. 93 : Principales altération des pierres de taille utilisées en Champagne-Ardenne

Les calcaires de type **CM** (à ciment sparitique et à forte macroporosité) développent fréquemment des désagrégations et plus précisément des **alvéolisations** (Calcaire à débris, Oolithe vacuolaire et calcaires granulaires type St-Leu).

Les calcaires de type **C0** (à ciment sparitique et peu poreux) présentent une forte proportion de **desquamations** (Pierre de Dijon) et de **désagrégations** progressives (Entroquite de la Meuse).

Les calcaires sublithographiques du Barrois (type **M0** et **Mm**) sont relativement gélifs et subissent des éclatements et des écaillages, de plus, ils apparaissent très sensibles à l'action des sels. Les calcaires micritiques du Lutétien moyen (type **Mm**) présentent de nombreuses **desquamations en feuillets**, dont notamment des décollements pelliculaires.

La Pierre de Langres, dont la matrice micritique est dolomitisée (**Rm**) est affectée de **desquamations** en feuillets et de **fragmentations**. Les calcaires du Givétien (type **R0**) sont fréquemment **fragmentés** (Pierre noire) et légerement **desquamés** (déflation des pavés de Pierre brune).

2/ Notion d'altération préférentielle :

L'observation des altérations développées par les différentes roches de Champagne-Ardenne a mis en évidence l'hétérogénéité des comportements en œuvre, même dans des microclimats d'exposition similaires (Tab. 33).

	Desquamation	Dissolution	Désagrégation	Fragmentation
Calcaire à débris	+	/	+++	+
Oolithe vacuolaire	/	/	+++	/
Calcaire grossier micritique 1a	+++	+	/	/
Calcaire grossier micritique 1c	+	+	+	+++
Calcaire grossier granulaire 2a	+	+	+++	+
Entroquite de la Meuse	+++	+	+++	/
Pierre noire de Givet	+	/	/	+++
Pierre brune de Givet	+++	+	/	/
Calcaire à entroques de Langres	+++	/	/	+++
Calcaire du Barrois	+++	+	/	/
Pierre de Dijon	+	/	+	+++

Tab. 33 : Fréquence d'observation des différentes altérations en œuvre sur les pierres à bâtir utilisées en Champagne-Ardenne.

/ : altération très rarement observée (moins de 5% des cas)

+ : altération parfois observée (de 5% à 25% des cas)

+++ : altération souvent observée (plus de 25% des cas)

Le tableau 33 dans lequel est reporté la fréquence d'observation des grands classes d'altérations, montre que certaines pierre à bâtir développent de façon préférentielle un type d'altération plutôt qu'un autre. Par exemple l'Oolithe vacuolaire présente fréquemment des morphologies de désagrégations et les desquamations où les fragmentations ne sont que des cas ponctuels, souvent directement liés à des encroûtements et des cristallisations de gypse. Autre cas, à la surface de la Pierre de Courville se développent de nombreuses desquamations, mais pas de traces de désagrégation.

Mais nous avons montré que les morphologies adoptées par ces altérations étaient très différentes selon les calcaires : par exemple, la désagrégation de l'Oolithe vacuolaire peut évoluer en alvéolisation ou en désagrégation progressive de la surface ; alors que l'Entroquite de la Meuse se désagrège sans apparition d'alvéoles, principalement aux angles des blocs. Nous pouvons donc préciser les différences de comportements en œuvre en utilisant une classification plus détaillées des altérations en œuvre (Tab. 34 et 35) que celle utilisée dans le tableau précédent (Tab. 33).

Type d'altération	Description
Patine	Pellicule superficielle d'épaisseur millimétrique (« calcin ») composée de calcite microcristalline et parfois d'oxydes de fer.
Encroûtement	Accumulation superficielle de particules d'origine atmosphérique (quartz éoliens, cendres volantes), de cristallisation de sels (gypse, thénardite…) et d'organismes.
Dissolution de surface	Erosion superficielle avec désolidarisation des éléments peu cohérents et mise en relief des éléments les plus résistants (généralement des bioclastes).
Ravinement	Creusement et érosion localisés, soulignant parfois les hétérogénéités de dureté ou de cohésion granulaire du calcaire (bioturbations, litages, silicifications).
Décollement superficiel	Desquamation de surface d'une pellicule millimétrique sous la forme d'un large feuillet ou de cloques, s'observant généralement sur les blocs en élévation.
Desquamation en feuillets	Débit en feuillet provoqué par une fine microfacturation de la roche en surface, s'observant fréquemment aux arêtes des blocs.
Exfoliation	Desquamation d'une large et épaisse plaque qui se décolle progressivement de la surface du bloc (souvent en soubassement ou en élévation).
Décohésion granulaire progressive	Désagrégation de la surface du bloc avec décohésion granulaire et pulvérulence.
Alvéolisation	Désagrégation profonde de la roche avec érosion différentielle et creusement d'alvéoles ou de litages plus altérables. Mise en relief des bords de blocs et de zones internes « irrégulièrement réparties ».
Fragmentation	Division des éléments architecturaux par fissuration selon des zones d'anisotropies et des barrières de porosité puis individualisation de débris centimétriques.
Activité biologique	Perforations de la surface des blocs, recristallisations minéralogiques, variations de couleur, encroûtements et production d'acides organiques…

Tab. 34 : Liste de principales altérations observées sur les pierres à bâtir de Champagne-Ardenne

Cette classification reflète à la fois la diversité des morphologie d'altération observées, mais contient une référence sous-jacente aux positions d'observation de ses dégradations et donc de leur position de mise en œuvre.

- Les dissolutions s'observent sur les surfaces exposées alors que les encroûtements se développent dans des microclimats abrités de l'action de la pluie battante. Les croûtes noires ou les recristallisations en gypse se forment principalement dans les milieux urbains pollués (voir annexe 2). Les ravinements traduisent généralement un milieu très exposé à la pluie battante ou subissant des circulations d'eaux anormalement importantes (gouttières défectueuses, rigoles d'écoulement).

- Les desquamations en feuillets se situent préférentiellement aux limites de blocs, aux arêtes des moellons ou de la statuaire et dans les positions de bandeau, de rebord ou de corniche (action du gel et de la fréquence des cycles thermiques). Il s'agit alors de fines desquamations, parfois en mille-feuilles, dont la forme épouse les contours des blocs. Les exfoliations sont plutôt observées sur des blocs de soubassement ou au centre des murs en élévation et plus particulièrement dans les zones dont la température de surface et/ou la teneur en eau est supérieure à celle des blocs environnants (Kwon *et al.*, 1999). Les décollements superficiels s'observent préférentiellement sur des roches encroûtées (influence des cristallisations de sels).

- Les désagrégations progressives de surface s'observent sur des blocs parfois humides abrités de la pluie battante, ou sur des surfaces encroûtées ou présentant des cristallisations de sels (dont le gypse). Les alvéolisations s'observent plus couramment sur les blocs exposés à la pluie et aux intenses circulations d'eaux, comme les piliers non abrités par les corniches ou les blocs d'élévation aux angles des murs. Elles sont particulièrement bien développées en milieu peu pollué (zones rurales notamment).

	Patine	Encroûtement	Dissolution de surface	Ravinement	Décollement superficiel	Desquamation en mille-feuilles	Exfoliation	Décohésion granulaire	Alvéolisation	Fragmentation	Activité biologique
Calcaire à débris	+++	+++	+++	/	+++	+++	/	+++	+	+	+
Oolithe vacuolaire	/	+++	+	+	+	/	/	+++	+++	+	+
Calcaire grossier micritique 1a	+++	+++	+	+	+++	+++	/	/	/	/	+
Calcaire grossier micritique 1c	?	+++	+	+	+	+++	+	/	/	+++	+
Calcaire grossier granulaire 2a	/	+++	+++	+ ?	+ ?	+ ?	/ ?	+	+++	+ ?	+
Entroquite de la Meuse	/	+	+++	+	/	+++	+++	+++	/	/	/
Pierre noire de Givet	/	/	/	/	/	/	+	/	/	+++	/
Pierre brune ou bleue de Givet	/	/	/	+	+++	/	/	/	/	+++	/
Calcaire à entroques de Langres	+ ?	+	?	+	/	+++	+	/	/	+++	?
Calcaire du Barrois	?	+ ?	+	+	+	+++	?	/	/	+	?
Pierre de Dijon	/	+	/	/	+	+	+	/	+	+++	/

Tab. 35 : Répartition des altérations observées sur les pierres à bâtir de Champagne-Ardenne

/ : altération non observée ; + : altération observée dans quelques cas.

+++ : altération observée dans de nombreux cas. ? : nombre d'observations peu significatif.

Or, dans la première section de ce chapitre, nous avons montré l'importance du microfaciès sédimento-diagénétique dans le développement des altérations en œuvre. Nous avons notamment corrélé la nature du faciès de dépôt, du séquençage diagénétique et la structure du calcaire avec les altérations développées en œuvre (Tab. 32 et Fig.93).

Nous montrons donc que non seulement la morphologie des altérations peut être rapportées à la nature de la roche et que la fréquence des grands types d'altération varie selon les différents calcaires (Tab. 34). Mais nous mettons en avant, une altération préférentielle (Fig. 93, Tab. 34) qui correspond à la morphologie d'altération la plus fréquemment observée pour un calcaire bien spécifié (Tab. 35). Cette dégradation peut être observée dans des milieux variés (urbains et ruraux) et son mode d'évolution est principalement conditionné par le microfaciès de la roche. Par exemple, pour les trois calcaires principalement étudiés :

- l'altération préférentielle de **l'Oolithe vacuolaire** est une désagrégation généralisée de la surface de la roche, avec une tendance à l'alvéolisation. Cette morphologie de dégradation est favorisée par la faible cohésion granulaire des éléments figurés (des oolithes) et par l'importante macroporosité intergranulaire ;

- l'altération préférentielle du **Calcaire à débris** est une désagrégation limitée à certains litages de la roche qui seront profondément creusés alors que le reste du calcaire est relativement épargné par l'altération. Cette morphologie de dégradation est également aussi favorisée par la faible cohésion granulaire des éléments figurés (des entroques) et par l'importante macroporosité intergranulaire qui dans ces litages (microfaciès type 2) est plus importante que dans le microfaciès de référence ;

- l'altération préférentielle de la **Pierre de Courville** est une desquamation en feuillets prenant une morphologie de décollement pelliculaire (blocs en élévation) ou de desquamation en feuillets (aux angles et aux limites des blocs). Cette morphologie de dégradation est favorisée par la forte cohésion granulaire des éléments figurés (des bioclastes), liée à la présence d'une micrite matricielle plus ou moins recristallisée en microsparite. Alors que les **Calcaires à cérithes** sont souvent fragmentés et fissurés avec une tendance à la desquamation des angles des blocs. Cette altération préférentielle est conditionnée par la matrice micritique non recristallisée et par l'hétérogénéité des bancs avec la présence de zones micritiques plus gélives.

La caractérisation de l'altération préférentielle d'un microfaciès permet de mieux comprendre le comportement en œuvre des différents calcaires. En effet, cette notion peut être appliquée à tous les types de pierres à bâtir, la comparaison des morphologies d'altérations développées permettant de corréler les types d'altérations préférentielles. Des tendances générales de comportements peuvent donc être caractérisées, notamment vis à vis de l'agressivité du milieu de mise en œuvre ou de la durabilité de le roche utilisée.

3/ Notion de comportements télogénétiques :

Les altérations observées en œuvre sont le résultat de l'interaction entre l'agressivité du milieu d'exposition et la résistance de la roche (Fig. 94). Nous venons de mettre en évidence que certaines dégradations dites « altérations préférentielle » sont fortement conditionnées par la nature du calcaire et plus précisément par son microfaciès sédimento-diagénétique. Mais il reste à expliquer qu'il puisse se développer d'autres altérations que l'altération privilégiée.

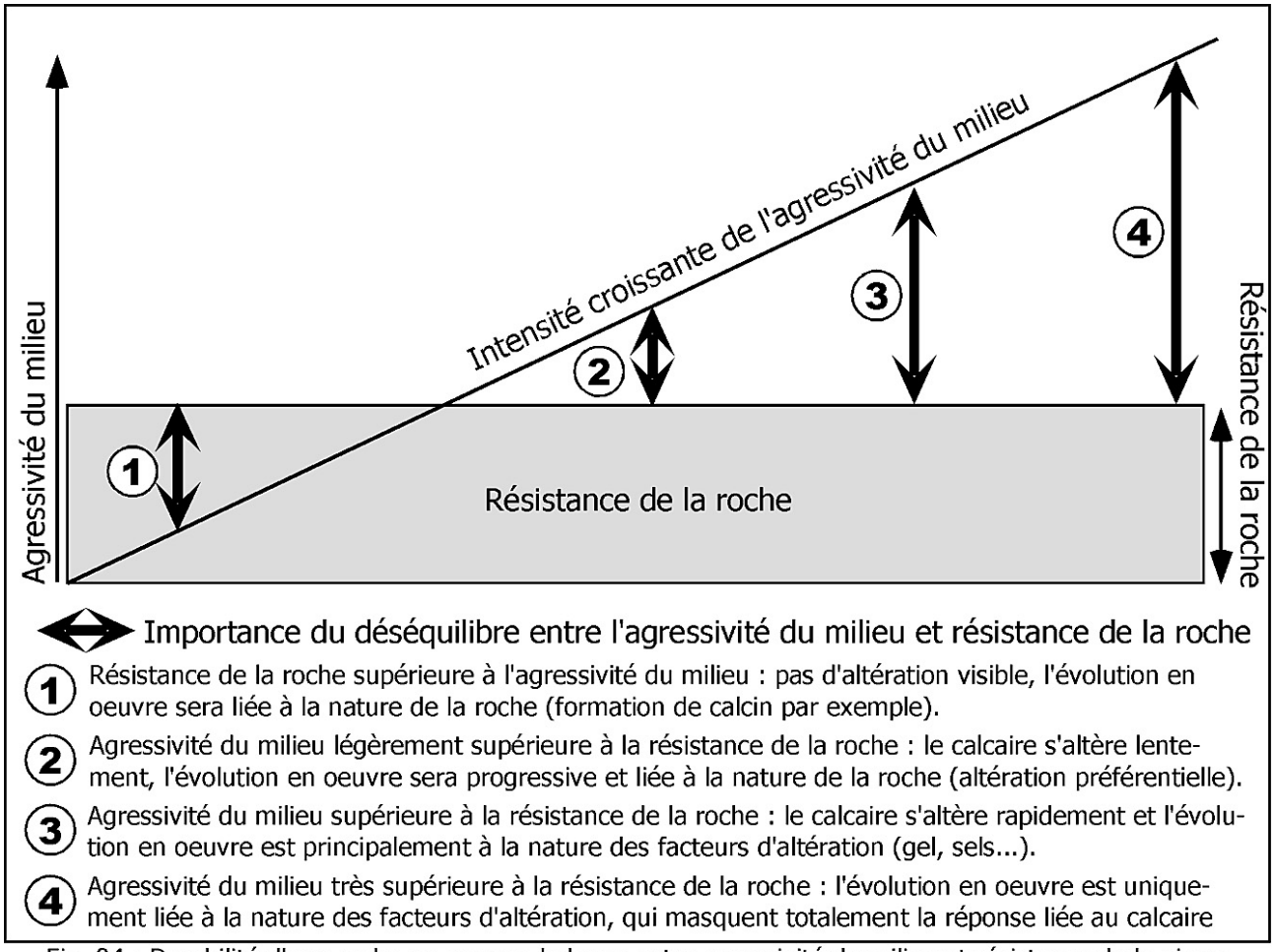


Fig. 94 : Durabilité d'une roche en oeuvre, balance entre agressivité du milieu et résistance de la pierre

Pour cela, il faut mettre en balance la résistance à l'altération de la roche (ou son altérabilité à un processus d'altération) et l'agressivité du milieu, soit pour une roche homogène et diverses intensités d'agressivité (Fig. 94) soit pour un milieu donné et une roche à l'altérabilité hétérogène (Fig. 95).

Dans certains cas, la résistance de la roche à un facteur altérant est suffisamment forte pour que la pierre ne développe pas d'altération (1, Fig. 94 et 2, Fig. 95). Cette préservation de la pierre est généralement temporaire, puisque le calcaire peut se révéler sensible à d'autres facteurs agressifs et qu'une légère

altération subie sur une longue période provoquera finalement la dégradation de la roche. Cette situation peut également se produire quand le milieu est peu agressif et que le déséquilibre avec la résistance de la roche est faible. Alors, l'altération se développe lentement et sa morphologie correspondra généralement à l'altération préférentielle liée au microfaciès (cas 2, Fig. 94, cas 1 Fig. 95).

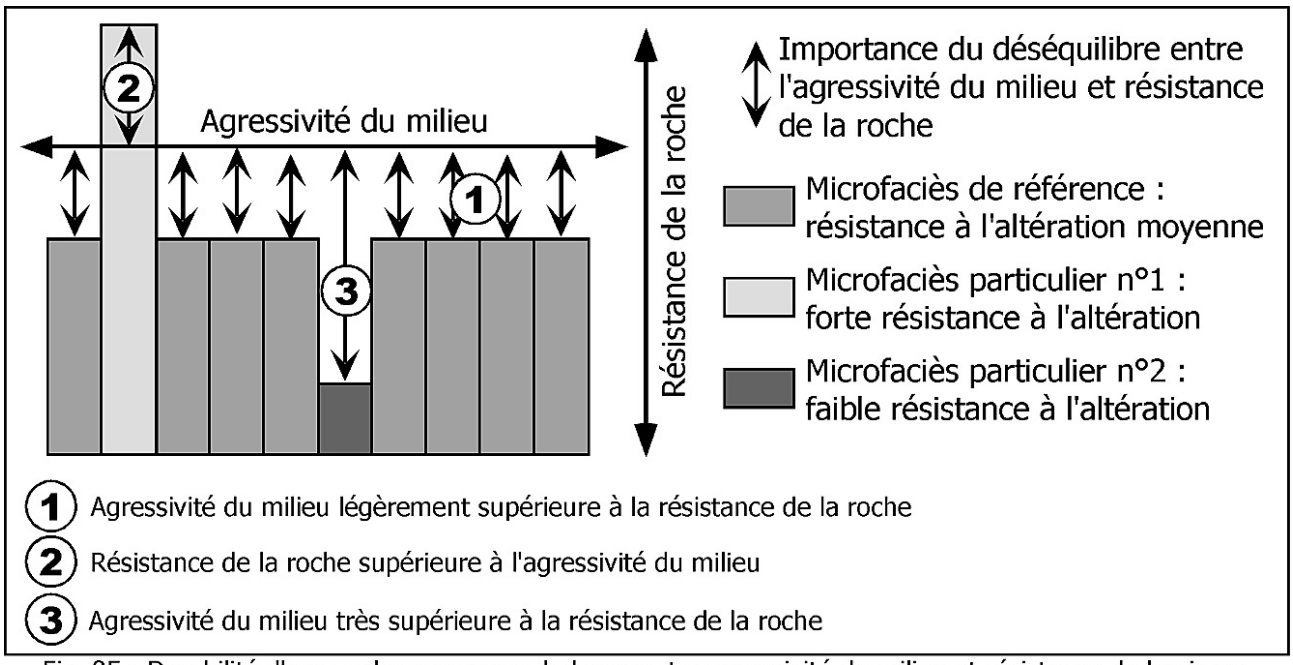


Fig. 95 : Durabilité d'une roche en oeuvre, balance entre agressivité du milieu et résistance de la pierre: cas d'une roche ou d'un ensemble architectural hétérogène

Quand le déséquilibre entre les deux paramètres est plus important (si la résistance à l'altération est faible : cas 3, Fig. 95, ou si le milieu est très agressif : cas 3 et 4, Fig. 94), l'altération se développe rapidement, selon une morphologie différente de l'altération préférentielle.

- Les morphologies d'altérations conditionnées par un milieu d'exposition très agressif seront quasiment identiques pour toutes les pierres et l'évolution propre à la roche sera totalement masquée. Les meilleurs exemples de ce comportement sont les encroûtements sulfatés (liés à l'accumulation de particules d'origine atmosphérique et à des cristallisations de gypse) et les desquamations en mille-feuilles des angles des blocs (liées à la fréquence des cycles thermiques et/ou d'imbibition/évaporation).

- Dans le cas d'une résistance à l'altération ponctuellement inférieure à celle du microfaciès de référence, l'altération se développera rapidement et sera conditionnée par le facteur local d'altérabilité (fissuration des hétérogénéités de porosité, désagrégation des microfaciès moins cimentés…). Parfois, la dégradation adopte une morphologie proche de l'altération préférentielle du microfaciès, mais la vitesse de dégradation est très importante et la morphologie spécifique de cette altération ne s'affirme pas totalement.

Pour matérialiser ces rapports entre les paramètres autogènes ou intrinsèques (liés à la roche elle-même) et allogènes (liés à l'environnement de mise en œuvre), nous proposons la notion de comportement télogénétique. Qui, pour une pierre de taille donnée, caractérise ses potentialités d'évolution en œuvre, en considérant à la fois la diversité des milieux d'exposition, l'altération préférentielle de la roche (fonction du microfaciès sédimento-diagénétique) et sa durabilité (Fig.96).

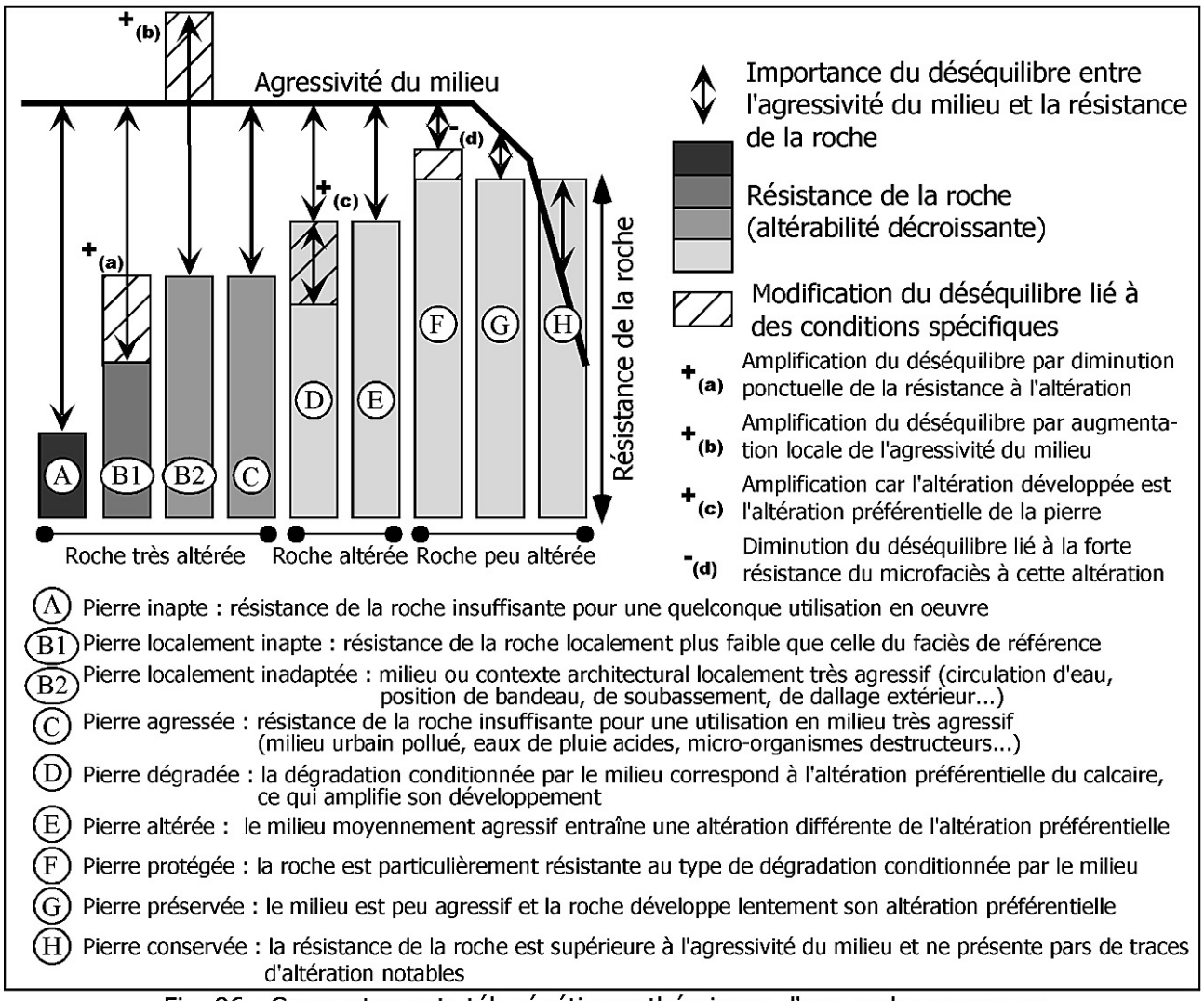


Fig. 96 : Comportements télogénétiques théoriques d'une roche en oeuvre

Une même roche, au microfaciès bien défini, peut évoluer selon différents comportements télogénétiques fonctions de sa position d'utilisation et de l'agressivité du microclimat d'exposition. Pour une même pierre, les modes d'évolution en œuvre caractérisés lors de l'analyse des altérations développées ont un nombre limité. L'utilisation du concept de comportement télogénétique permettra de replacer ces différentes altérations dans un contexte plus large, en tenant compte des conditions d'observation et de mise en œuvre de la roche. Les variétés de microfaciès du calcaire considéré, qui présentent des comportements

télogénétiques légèrement ou totalement différents de ceux du microfaciès de référence, seront eux aussi intégrés à l'analyse, afin de caractériser l'altérabilité de la totalité de l'appellation de pierre de taille étudiée. Par exemple, nous avons montré la variabilité du microfaciès du Calcaire à débris ainsi que la rapide désagrégation des litages de microfaciès type 2. Or, ces microfaciès sont toujours conjointement présents dans un élément architectural et évoluent différemment. La définition des comportements télogénétiques de cette pierre de taille doit donc tenir compte de ces observations et les matérialiser (Fig. 98).

	Comportements télogénétiques		
Pierre très altérée	A	Pierre inapte	Résistance de la roche insuffisante pour une quelconque utilisation en œuvre
	B1	Pierre localement inapte	Résistance de la roche localement plus faible que le microfaciès de référence
	B2	Pierre localement inadaptée	Milieu ou contexte architectural localement très agressif
	C	Pierre agressée	Résistance de la roche globalement insuffisante pour un milieu très agressif
Pierre altérée	D	Pierre dégradée	Le milieu moyennement agressif provoque une altération progressive de la roche en œuvre, correspondant à l'altération préférentielle (amplification)
	E	Pierre altérée	Le milieu moyennement agressif provoque une altération progressive de la roche en œuvre, suivant une altération différente de son altération préférentielle
Pierre peu altérée	F	Pierre protégée	La roche est naturellement résistante au type d'altération conditionné par le milieu d'exposition ou les conditions de mise en œuvre
	G	Pierre préservée	Le milieu est peu agressif et la roche développe lentement son altération préférentielle
	H	Pierre conservée	La résistance de la roche est supérieure à l'agressivité du milieu et la pierre ne présente pas de traces notables d'altération

Tab. 36 : Comportements télogénétiques d'une roche en œuvre

De plus, les mauvaises pierres de taille ou les variétés de microfaciès à faible durabilité pourront facilement être différenciés des microfaciès peu altérables en construisant des diagrammes de fréquence d'observation des différents comportements télogénétiques caractérisés (Fig. 97). Les roches dont la durabilité en œuvre est faible, auront principalement des comportements de type A à C, alors que les bonnes pierres de taille auront plutôt des comportements D à H. De même, ce mode de représentation graphique de la durabilité en œuvre permet de mettre en évidence des problèmes particuliers. Par exemple, l'observation de fortes altérabilités liées à une mauvaise utilisation d'une pierre de taille (cas du Liais de Courville, Fig. 100) ou à la présence ponctuelle de microfaciès moins résistants que la pierre de référence (cas du Calcaire à débris : Fig. 98, ou de la Pierre d'Euville : Fig. 101).

La juxtaposition des fréquences d'observation des différents comportements ainsi que leur caractérisation en relation avec les milieux d'exposition, les positions de mise en œuvre et la variabilité des microfaciès, permet de dresser de véritables plans d'altérabilité, représentatifs de la durabilité en œuvre de chaque appellation de pierres à bâtir (Fig. 97).

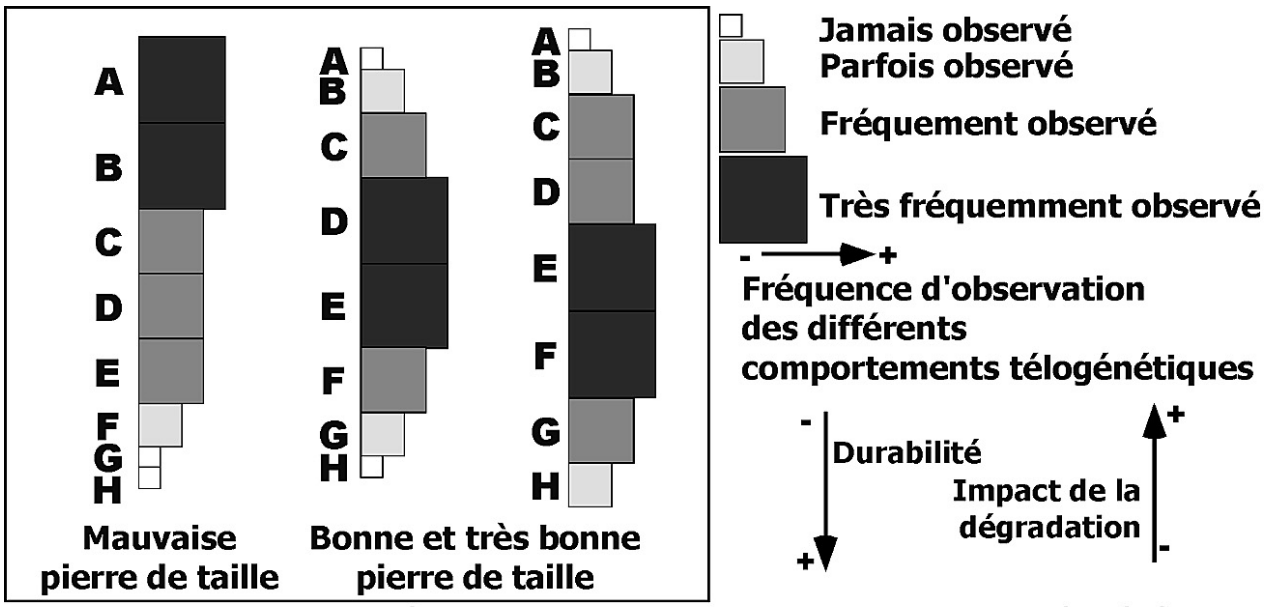


Fig. 97 : Exemples de fréquences d'observation des comportements télogénétiques d'une pierre de taille, relation avec sa durabilité générale

Ces schéma sont établis à partir d'une observation des évolutions en œuvre et d'une analyse du comportement de la roche afin de déterminer les altérations privilégiées ou contrariées par le microfaciès et la nature du calcaire. Ils pourraient être complétés d'une description de la pierre avec photographie (macroscopique et microscopique), de sa caractérisation pétrophysique (porosité, capillarité, saturation en eau, résistance à la compression…) et de renseignements sur son altérabilité en vieillissement simulé. Et finalement, cette compilation de données, fournirait un bilan complet, facilement synthétisables, du comportement en œuvre de la pierre ainsi que de ses potentialités réelles.

4/ Les comportements télogénétiques des principales pierres à bâtir utilisées en Champagne-Ardenne :

1/ Selon le microfaciès considéré, le Calcaire à débris présente une durabilité en œuvre hétérogène (bonne pour le microfaciès type 1 et très mauvaise pour le microfaciès type 2, Fig. 98). Les litages de microfaciès type 2 sont érodés quelque soit leur position de mise en œuvre et le microclimat d'exposition. Nous pourrions considérer qu'il s'agit d'un comportement de type Pierre inapte (à l'utilisation en construction). Mais nous n'avons jamais observé de bloc uniquement composé de ce microfaciès, nous préférons donc montrer qu'il s'agit d'une variété très altérable du Calcaire à débris et donc un comportement de

type B1 (localement peu résistant). C'est pourquoi le diagramme de fréquence des comportement télogénétique indique à la fois des évolutions type Pierre localement inapte (B1) et Pierre préservée (G).

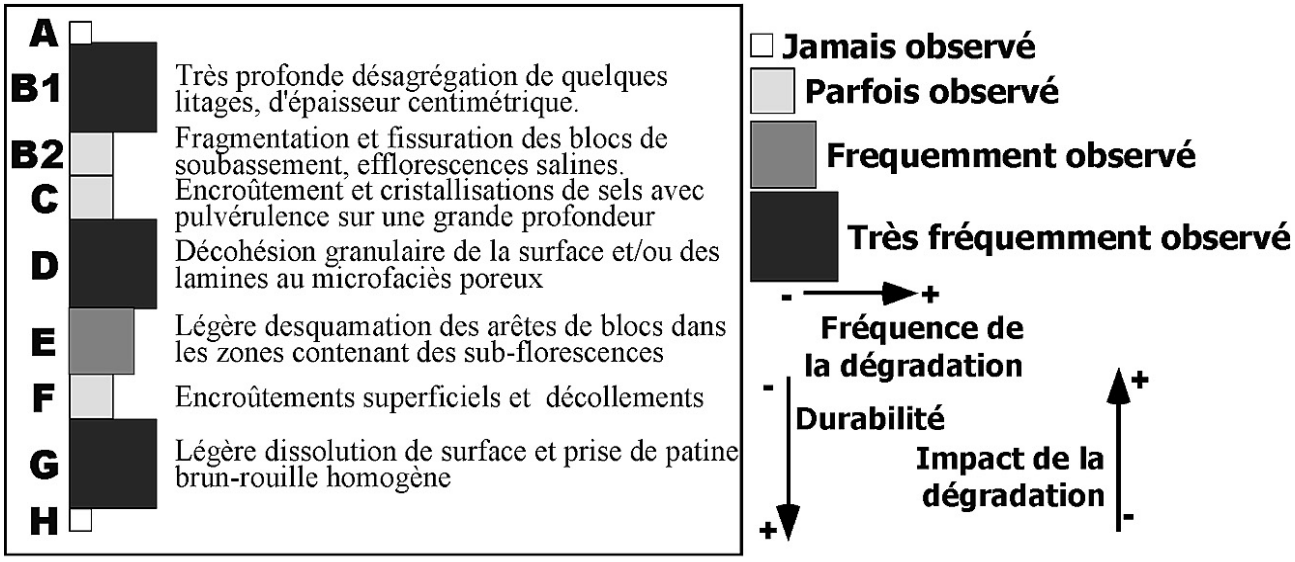


Fig. 98 : Comportements télogénétiques du Calcaire à débris

Les altérations de type fragmentation et les efflorescences fréquemment observées à la base des murs sont liées à l'utilisation de Calcaire à débris en position de soubassement et à ses fortes propriétés capillaires. Il s'agit donc d'un comportement type B2, principalement lié à la position d'utilisation de la roche et à l'agressivité locale de ces conditions d'exposition (Pierre localement inadaptée).

Les encroûtements accompagnés de profondes cristallisations de gypse sont conditionnés par le milieu d'exposition et la position de mise en œuvre (zone urbaine polluée et surface abritée de la pluie battante), comportement de type B2, où l'altération développée est principalement d'origine allogène, même si la forte perméabilité de la roche st nécessaire à la pénétration des sels en profondeur.

A l'inverse, les très fréquentes désagrégations ou érosions superficielles (dissolution de surface) sont liées à la faible cohésion granulaire de ce calcaire et l'altération entraînée n'est pas très profonde. Ce mécanisme de dégradation se produit dans tous les types de milieux et son impact sur la roche est variable selon la cohérence du microfaciès et l'agressivité des conditions de mise en œuvre. Dans le cas du Calcaire à débris, l'altération préférentielle de la roche se manifeste donc à divers ordres de grandeur et dans divers comportement :

- B1 : Pierre impropre : le microfaciès de type 2 est très peu cohérent et est rapidement désagrégé, ce qui provoque le creusement de tous les litages composés de cette variété de microfaciès.

- D : Pierre agressée : le microfaciès de référence est relativement sensible à la décohésion granulaire et parfois toute la surface des blocs est profondément désagrégée.

- G : Pierre préservée : les éléments peu cimentés se trouvant en surface sont érodés et quelques « dissolutions de surface » s'observent par désagrégation progressive.

Enfin, notons que le comportement de type H : Pierre conservée n'est jamais observé pour le Calcaire à débris. En effet, les blocs contiennent toujours quelques litages de microfaciès type 2 (érodés) et la surface est toujours légèrement altérée (décohésion granulaire ou prise de patine brun-rouille).

2/ L'Oolithe vacuolaire présente une très bonne durabilité en œuvre (fréquents comportements de type D à F, Fig. 99) quelque soit le milieu d'exposition ou la position d'utilisation.

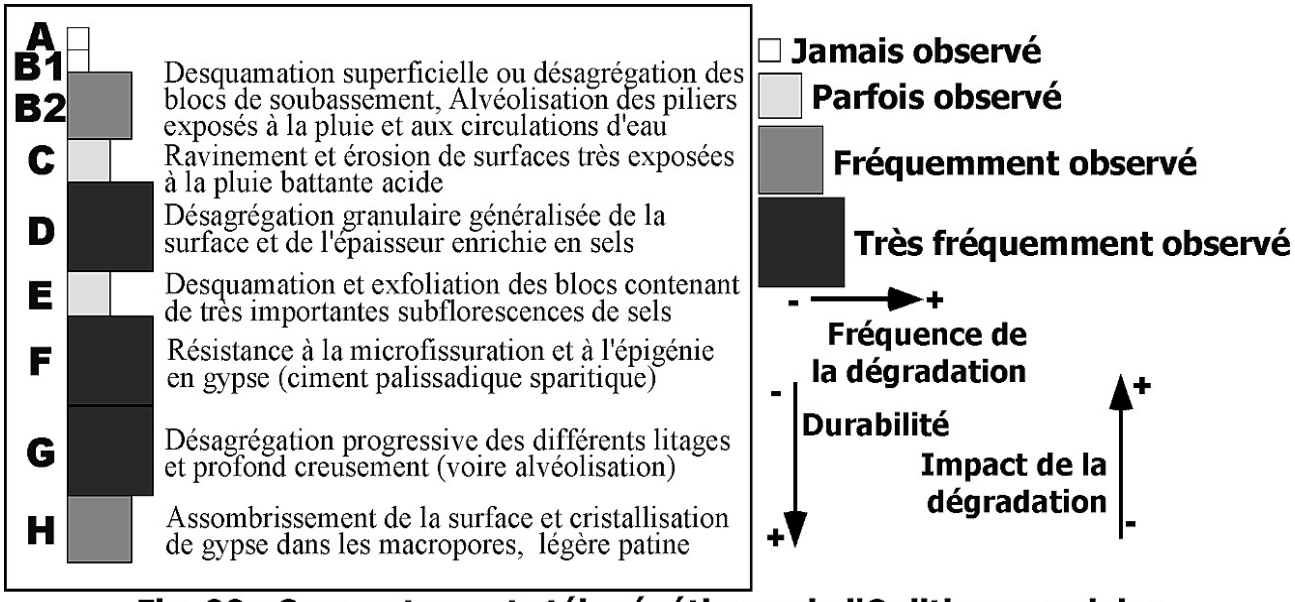


Fig. 99 : Comportements télogénétiques de l'Oolithe vacuolaire

Les véritables morphologies d'alvéolisations sont assez rares et généralement observées sur des blocs très exposés à la pluie et au vent, il s'agit donc d'un comportement télogénétique lié à un microclimat localement très agressif : type B2. Les ravinements et les érosions de surface sont plutôt liées à une forte exposition à des circulations d'eaux ou à la pluie battante, mais elles sont moins courantes que les alvéolisations.

La désagrégation progressive est l'altération préférentielle de ce calcaire, elle peut être observée en milieu urbain, généralement sur des surfaces légèrement abritées avec des cristallisations de sels en surface (comportement type D). Mais cette morphologie de dégradation se développe aussi en milieu rural, sur des profondeurs parfois importantes, avec un creusement selon les litages obliques (comportement type G).

Les desquamations sont rares et limitées par la forte résistance du microfaciès à la fissuration, elles ne s'observeront donc que ponctuellement (comportement type E ou F).

Enfin, fréquemment, l'Oolithe vacuolaire n'est pas véritablement altérée et ne contient que quelques cristallisations de sels dans les macropores intergranulaires ou dans les pores intragranulaires ouverts sur l'interface avec l'atmosphère.

3/ Le Liais de Courville est une bonne pierre de taille, mais sa durabilité en œuvre varie fortement selon l'agressivité du milieu (Fig. 100).

- le calcaire peut-être très altéré (comportements de type A, B1 et B2) et les éléments architecturaux pratiquement détruits. Pourtant nous avons montré que la gélivité parfois mentionnée (diverses communications orales) pour cette pierre, est due à trois facteurs :

- le banc de pierre de taille est entouré de deux bancs gélifs (bousins) et le passage au Liais est progressif. Parfois, le calcaire mis en œuvre est mal délimité et contient au sommet ou sa base un horizon de bousin gélif (comportement type A : roche inapte à la construction).

- le calcaire de Courville contient parfois des bioturbations dont le sédiment interne est plus fin que la roche environnante et il est parfois gélif (comportement de type B1 : Pierre localement inapte).

- l'utilisation de ce calcaire à des positions architecturales de soubassement, de bandeau ou d'assise de rejaillissement provoque sa rapide dégradation (respectivement par fissuration, écaillage ou à cause des cristallisations salines : efflorescences et subflorescences). Dans ce cas, l'altération est principalement liée au milieu d'utilisation, trop agressif pour la résistance de la roche (comportement de type B2 : Pierre localement inadaptée).

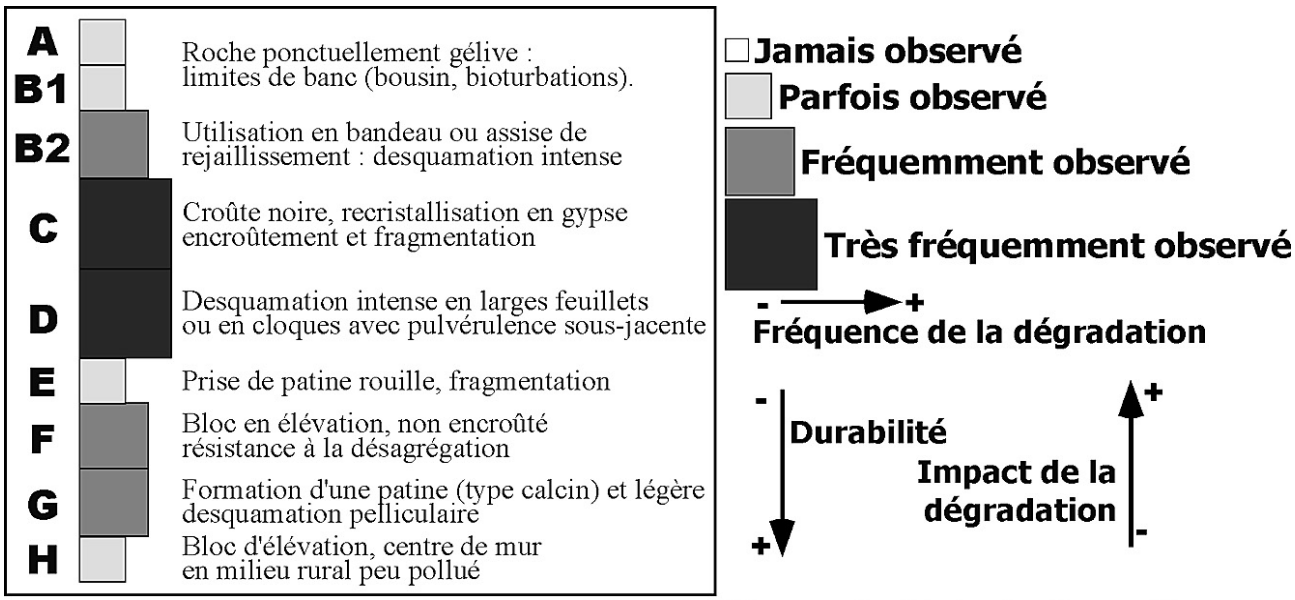


Fig. 100 : Comportements télogénétiques du Liais de Courville

Dans des conditions d'utilisation moins agressives, la pierre offre une meilleure durabilité en œuvre, pourtant les sels (dont le gypse) très présents en milieu urbain et certaines positions de mise en œuvre provoque l'apparition de desquamations. Or, ce calcaire, peu macroporeux et à matrice micritique est très sensible à la microfissuration et à la recristallisation en gypse, le développement des desquamation s est donc favorisé par le microfaciès de la roche et cette altération s'observe très couramment (comportement de type Pierre dégradée : D, avec amplification du développement de l'altération par cumul avec l'altération préférentielle de la roche).

Paradoxalement, les autres morphologies d'altérations sont rares ou affectent peu la durabilité de la roche : peu d'altération de type E (Pierre altérée). Cette remarque est d'ailleurs soulignée sur la figure par la forte fréquence d'observation des comportements de type F, où les propriétés du microfaciès limitent le développement d'une morphologie d'altération. En effet, de petits ravinement et des érosions s'observent parfois au niveau des bioturbations, mais le sédiment environnant est plus résistant à cette « micro-désagrégation » progressive de la matrice micritique et il reste quasiment intact.

Enfin, remarquons que certains blocs de Calcaire grossier micritique type Courville (microfaciès type 1a, pages 115-116) ne présentent pas de traces d'altération, mis à part un léger changement de couleur lié à l'apparition d'une patine superficielle. Ces observations se font généralement en milieu urbain peu pollué et peu agressif (pas d'encroûtements ni de circulations capillaires) où la protection du calcin n'est pas remise en cause. Elles témoignent de la bonne durabilité de ce calcaire qui, utilisé dans un environnement peu agressif (position de mise en œuvre et microclimat d'exposition), se révèle être une très bonne pierre à bâtir.

4/ Les Entroquites de la Meuse sont des pierres de tailles dont à bonne durabilité en œuvre, elles sont principalement utilisées en position de soubassement et présentent des morphologies d'altération de type désagrégation (décohésion granulaire).

Pourtant, certains éléments architecturaux sont totalement altérés (désagrégation) alors que les blocs voisins sont apparemment sains. Il existe donc des variétés de microfaciès nettement plus altérables que la roche de référence, ce comportement en œuvre étant ici classé comme de type A car il s'agit de blocs entiers de roche inapte et non de microfaciès localisés à l'intérieur du microfaciès de référence. Cette définition correspond par contre aux microfaciès contenus dans les bioturbations, qui est parfois raviné ou désagrégé alors que le reste du bloc est intact (comportement de type B1).

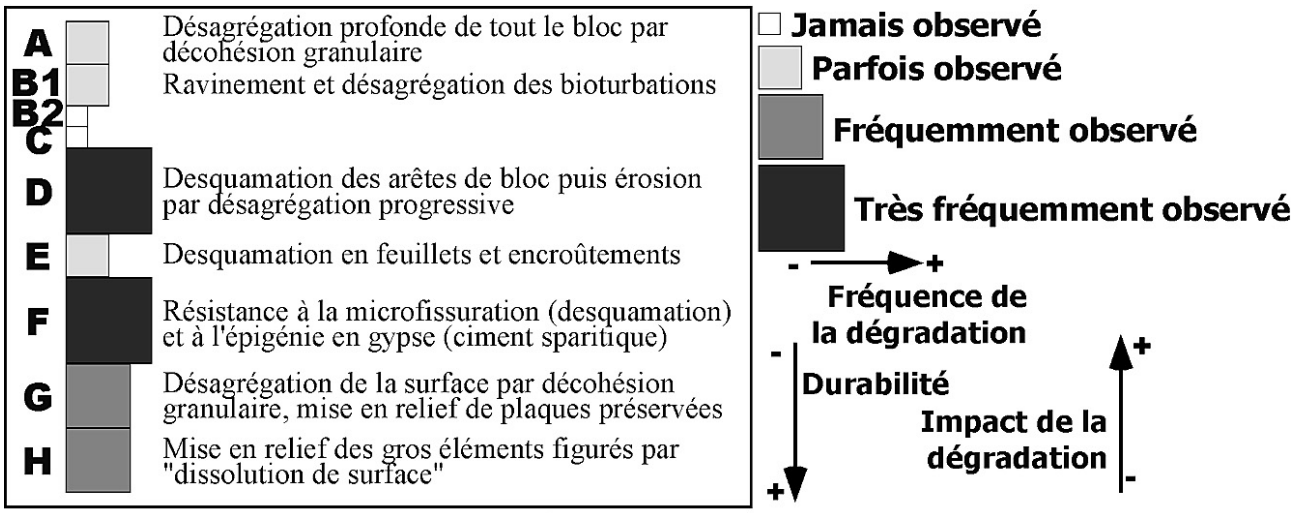


Fig. 101 : Comportements télogénétiques de l'Entroquite de la Meuse

Les comportements de type B2 et C ne sont jamais observés sur les Entroquites de la Meuse (Fig. 101), ce qui souligne la forte résistance mécanique et la très faible gélivité de ce calcaire. La pierre de référence peut être utilisée dans presque toutes les positions architecturales et les milieux d'exposition sans développer d'altération mettant en cause la durabilité en œuvre du bloc dans son intégralité.

Les comportements de type D (Pierre dégradée) avec amplification de l'altération par cumul entre altération développée et altération préférentielle du microfaciès sont très nombreux et s'observent parfois sur tous les éléments mis en œuvre (milieu urbain pollué). Il s'agit généralement de l'érosion de arêtes de blocs par desquamation puis désagrégation (décohésion progressive). A l'inverse le développement d'autres morphologies d'altération est assez rare et généralement lié à des encroûtements et à la présence de sels (comportement de type E, essentiellement allogène).

Enfin, les blocs d'Entroquites sont souvent altérés de façon superficielle et l'impact de ces dégradations par désagrégation superficielle est plus esthétique que structural (comportements de type G et H).

Conclusions :

Conclusions

La durabilité d'un géomatériau est fonction de l'intensité du mécanisme d'altération ET de la résistance de la roche à ce mécanisme.

Il a été montré que les pierres à bâtir calcaires utilisées en Champagne-Ardenne présentent des morphologies d'altérations différentes : desquamation en feuillets, désagrégation superficielle généralisée, alvéolisation… Et que les altérations développées convergent, mais que leur mode d'évolution, leur cinématique de progression dans la roche et leur impact sur la durabilité du calcaire sont variables. Or, l'altération d'un géomatériau en œuvre est régie par différents facteurs qui se répartissent en 3groupes :

- Le milieu d'exposition, c'est à dire le climat et le microclimat d'exposition qui forment un ensemble complexe de paramètres incluant l'importance des précipitations reçues, les variations saisonnières de températures, l'humidité de l'air, la présence de vent (plus ou moins turbulents)… Son agressivité peut être augmentée par la pollution atmosphérique (diffusion de SO_2), la présence de particules chimiquement actives (cendres volantes), l'acidité des eaux circulant en surface ou à l'intérieur de la roche, la présence d'organismes (perforation, production d'acides organiques, d'oxalates de calcium)…

- Le contexte de mise en œuvre qui comprend principalement la situation architecturale : bandeau, soubassement, corniche, élévation, statuaire…, il conditionne la relation de l'élément en pierre avec l'environnement de mise en œuvre (voir micro-environnement) : fréquence des cycles thermiques, d'évaporation / imbibition, lessivage de la surface ou accumulation de particules… Mais la structure de la maçonnerie et sa composition (nature du mortier : Furlan, 1990 ; présence d'attaches métalliques…), ainsi que l'état de surface des éléments architecturaux peuvent aussi modifier le développement des altérations.

- La nature de la roche et de son microfaciès avec notamment sa résistance mécanique, son altérabilité au gel, à la fissuration, à la désagrégation, à l'action des sels (recristallisation en gypse).

L'altération d'un géomatériau en œuvre est principalement due à l'action d'un phénomène agressif, généralement externe à la roche. Mais elle est aussi conditionnée par la résistance de la roche à l'altération considérée (la durabilité *sensu* Dessandier, 1995). L'importance du déséquilibre entre le mécanisme d'altération et la résistance de la roche à ce processus conditionne le développement de la dégradation. Pour comprendre l'évolution des altérations, il faut donc étudier les mécanismes qui sont à leur origine, mais aussi la nature et le comportement de la roche elle même. Les analyses d'altérations doivent donc inclure un bilan complet du contexte de mise en œuvre en intégrant à la fois les paramètres agressifs, c'est à dire les causes de la dégradation, mais aussi l'altérabilité de la pierre à cette agressivité.

Les calcaires sont de géomatériaux complexes, ils n'ont pas une résistance à l'altération homogène.

La durabilité d'un calcaire est généralement rapportée aux différents paramètres pétrophysiques mesurés (porosité, résistance à l'écrasement, coefficient de saturation en eau, résistance aux attaches…) mais les pierres à bâtir calcaires ne sont pas des matériaux homogènes à l'organisation aléatoire. **En effet, les géomatériaux ont une histoire complexe et les calcaires sont le résultat d'une longue évolution (dite diagénétique), à partir d'un sédiment initial et d'un faciès de dépôt.**

Caractériser ces géomatériaux uniquement avec des mesures physiques ou chimiques n'aboutit qu'à une compréhension partielle de la nature de la pierre. Il faut compléter ces mesures pétrophysiques par une analyse sédimentologique fine. Comme par exemple le cas du Calcaire à débris, Fig. 9 page 47 ou du Calcaire grossier, Fig. 39a et 39b pages 104 et 105. Cette analyse doit être réalisée selon une méthodologie différente de l'étude habituelle des microfaciès et elle doit être capable de mieux interpréter les données pétrophysiques mesurées afin de compléter la caractérisation de la résistance en œuvre du calcaire.

Aussi a-t-il fallu développer une méthodologie d'étude pétrographique intégrant l'analyse d'images : les signatures ternaires. Elle permet de matérialiser les variations microfaciologiques au sein d'un échantillon donné, ou de comparer des échantillons par rapport à un microfaciès de référence (voir par exemple la figure 30b page 89, représentant différents microfaciès d'Oolithe vacuolaire).

En appliquant cette analyse microfaciologique orientée vers la compréhension du comportement en œuvre du calcaire, il a été montré que :

- dans le Calcaire à débris, les lamines sédimentaires ont une macroporosité intergranulaire très variable, liée au développement de la cimentation sparitique syntaxiale. La porosité peut doubler sur une épaisseur inférieure à un centimètre et ces variations n'apparaissent pas dans les mesures de porosité réalisées sur de gros échantillons (pages 47 et 48).

- dans l'Oolithe vacuolaire, la porosité est fonction du taux de dissolution des nucleus micritiques et de la cimentation palissadique sparitique (Fig. 33, page 92). La pierre présente aussi une variabilité sédimentologique avec notamment la présence locale d'une micrite matricielle, de lentilles lumachelliques de coquilles et d'une évolution verticale à la base ou au sommet du banc d'Oolithe vacuolaire (page 90).

- dans la carrière de St-Julien à Courville (Calcaire grossier), la porosité du calcaire varie entre 15% et plus de 50%. Les bancs exploités ont une matrice micritique partiellement recristallisée (microsparite) et une porosité plus faible que les bancs gélifs dont la matrice est uniquement micritique (Fig. 43, page 111).

De même, les bioturbations contiennent un sédiment plus fin que le calcaire encaissant et leur contenu peut présenter une résistance au gel inférieure à la roche de référence.

- dans l'Entroquite de la Meuse (Pierre d'Euville), la porosité intergranulaire est obturée par un ciment syntaxial, parfois unique phase de cimentation. Le développement de ce ciment conditionne l'importance de la porosité et de la cohésion granulaire. Le taux de cimentation varie selon les différentes appellations commercialisées (Euville marbrier et Euville construction) et selon les structures de bioturbations conservées.

Toutes les roches étudiées présentent donc une hétérogénéité à l'échelle de la formation géologique (comme le Calcaire grossier et l'Oolithe de Dijon), mais aussi dans les bancs (comme l'Oolithe vacuolaire, Fig. 31 page 90), les litages ou les lamines sédimentaires (voir Calcaire à débris, Fig. 18 et Fig. 20). **La caractérisation du faciès et du microfaciès sédimento-diagénétique permet de comprendre ou de mettre en évidence la nature de ces hétérogénéités.**

Il faut donc définir des faciès de référence dont la nature sédimentologique est précise, les propriétés pétrophysiques mesurées et dont la durabilité en œuvre est estimée.

Parallèlement, nous avons utilisé les données pétrophysiques et les caractérisations de microfaciès pour définir des faciès types. La notion de faciès de référence et de variétés de microfaciès est très importante, car elle permet de comparer objectivement des échantillons de pierre de taille. Elle permet aussi d'organiser les variétés discriminées selon leur durabilité en œuvre. En effet, mettre en évidence des différences de microfaciès, corrélées à des variations de résistance à l'altération, permet de mieux analyser certaines inégalités d'altérabilité, puisque la durabilité en œuvre est à la fois fonction de l'agressivité du mécanisme d'altération et de la résistance de la roche à ce mécanisme (exemple du Calcaire à débris Fig. 64, page 151 ou du Calcaire grossier Fig. 183, page 183).

Pour définir ces faciès et microfaciès de référence, il faut utiliser des échantillons dont la nature microfaciologique correspond effectivement à cette référence (nécessité d'une synthèse sédimentologique préliminaire). Les échantillons doivent être caractérisés par des analyses pétrophysiques et pétrographiques réalisées conjointement et leur durabilité doit être estimée par des études de vieillissement (naturel et à long terme, ou artificiel et en accéléré). Enfin, l'étude doit caractériser les principales variétés de microfaciès afin de comprendre l'importance de ces variations sur la durabilité du calcaire.

Les calcaires ont des natures variées et celles-ci influencent directement leur durabilité en œuvre.

Non seulement les calcaires ne sont pas des roches homogènes, mais ils ont des natures très variées : depuis leur phase de liaison (matrice micritique ou ciments sparitiques) à la nature de leurs éléments figurés (oolithes, bioclastes, quartz…) et à la fréquence de ceux-ci (voir classifications de Dunham et de Folk, Fig. 4 et 5 pages 22 et 23).

La nature du calcaire influence le développement des altérations en œuvre ainsi que la morphologie adoptée par ces dégradations (voir chapitre 2 ou Tab. 33 et 34).

Par exemple :

- Les calcaires granulaires peu cimentés, dont le taux de cohésion granulaire est faible (Oolithe vacuolaire, Calcaire grossier granulaire, Calcaire à débris) présentent de nombreuses désagrégations alors que les calcaires plus cohérents sont surtout fissurés : desquamation et fragmentation (cas de la Pierre de Dijon, des calcaires du Barrois, du Liais de Courville).

- Les calcaires uniquement cimentés par des ciments syntaxiaux sont très sensibles à la décohésion granulaire, au même titre que les marbres blancs de Carrare (Bouineau et Perrier, 1995). L'Oolithe vacuolaire, cimentée par un ciment palissadique, est plus cohérente (malgré une macroporosité parfois supérieure à 40%) et doit être intensément fissurée avant que les éléments figurés ne se désolidarisent (désagrégation progressive ou alvéolisation).

- Les calcaires micritiques comme les variétés du Calcaire grossier type Courville présentent préférentiellement une desquamation en cloques ou en feuillets, ceux-ci sont peu épais et se développent sur de grandes surfaces par décollement pelliculaire. Sur l'Entroquite de la Meuse, les desquamations sont plus rares et elles ont un développement limité car elles se désagrègent au fur et à mesure de leur développement, la desquamation est donc suivie d'une décohésion « granulaire ». Notons que dans le cas de ce microfaciès, les éléments dissociés sont composés des entroques plus du ciment syntaxial qui leur est lié.

Les principales morphologies d'altérations développées sur chaque type de pierres ont été caractérisées (macroscopiquement et microscopiquement). Ces observations nous ont conduit à redéfinir la terminologie de classifications des altérations (voir Tab. 34, page 216) notamment en séparant les alvéolisations et les décohésions granulaires (groupe des désagrégations) ou les desquamations en feuillets et les décollements pelliculaires (groupe des desquamations).

La notion d'altération préférentielle qui correspond la morphologie d'altération dont le développement est privilégié par le microfaciès de la roche est introduite. L'importance de la structure sédimentaire, de la texture sédimentologique et de la nature des phases diagénétiques sur le comportement en œuvre de

la roche est démontrée et hiérarchisée. La détermination et la caractérisation de l'altération préférentielle de chaque pierre à bâtir peut être mise en correspondance avec la connaissance du développement en œuvre des altérations afin d'éviter qu'elles ne soient amplifiées par la nature de la roche. Par exemple : les calcaires micritiques type Liais de Courville sont très sensibles aux recristallisations de sels (subflorescences) qui provoquent une fissuration et une intense desquamation en feuillets. Or la position architecturale d'assise de rejaillissement est un milieu d'exposition particulièrement propice au développement de ce type d'altération. Il faut donc éviter d'y placer des pierres de taille du type Liais de Courville (un calcaire micritique à bioclastes, voir définition du microfaciès de référence pages 115-116), car cela provoquerai leur rapide altération.

Pour mieux comprendre le comportement en œuvre d'une pierre de taille, il faut classer les différentes altérations observées en tenant compte de l'agressivité des différents micro-climat d'exposition, de la durabilité de la pierre et de son altérabilité préférentielle (conditionnée par le microfaciès sédimento-diagénétique).

La définition, pour une même pierre de taille, de différents comportements de mise en œuvre met en évidence l'interaction entre la roche et le milieu d'exposition. Ces comportements dits télogénétiques (Fig. 96) montrent qu'un calcaire n'est pas un matériau inerte et que sa nature peut amplifier ou diminuer l'impact d'un processus d'altération. Un découpage en 8 comportements majeurs, organisés suivant une décroissance du déséquilibre entre l'agressivité du milieu et la résistance de la roche, matérialisant une diminution de l'impact des altérations sur la durabilité d'un géomatériau en œuvre est proposé (Tab 36).

La hiérarchisation des comportements en œuvre avec l'intégration des diverses altérations observées permet de comparer objectivement les modes de dégradations de pierres de taille différentes (voir Fig. 98 à 101). La représentation graphique des comportements en œuvre permet de matérialiser l'altération et de cerner la durabilité de la roche (ce qui est souvent difficile à effectuer à partir de descriptions génétiques sédimentologiques ou de résultats de mesures physiques).

Le concept de comportements télogénétiques est donc un moyen de concilier les différents types d'analyses actuellement pratiqués pour caractériser l'altérabilité des calcaires utilisés en construction. Il faudra alors le compléter par des analyses pétrophysiques normalisées ou une caractérisation quantifiée du vieillissement du calcaire. Le modèle proposé pouvant être aisément affiné et calibré par des expérimentations ou des quantifications en laboratoire (porosimétrie mercure, simulation de vieillissement) ou en intégrant l'étude de la durabilité d'autres pierres à bâtir.

Bibliographie :

ANONYME. 1890. *Répertoire des carrières de pierre de taille exploitées en 1889, Ministère des Travaux Publics*. Paris : Librairie Polytechnique et Cie. 321 pages.

ANONYME. 1980. *Les pierres de France : pierres calcaires, roches marbrières, granit et grès*. Centre d'assistance technique et de documentation. Documentation Française de Bâtiment, 1 vol. Editions du Moniteur. Paris. 120 pages. 36 fiches.

ABRARD R. 1925. Le Lutétien du bassin de Paris : Essai de monographie stratigraphique. Thèse de géologie, Angers, 388 pages

ALARCON-PARRA A., M.GARCIA-VALLES et M. VENDRELL-SAZ. 1994. The decay of monumental limestones on a rural mediterranean environment. *Actes du Troisième Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen* Venise (Italie). p. 523-531.

ANSELMETTI F. S., S. LUTHI S. et G. P. EBERLI 1998. Quantitative characterization of carbonate pore system by digital image analysis. *AAPG Bull.* 82 (10) : p. 1815-1836.

ARDAENS R., A. BLONDEAU et M. RENARD. 1983a. Carte géologique et notice, Raucourt-et-Flaba 1/50 000 : BRGM. Notice de 41 pages.

ARDAENS R., A. BLONDEAU et M. RENARD. 1983b. Etude des Ardennes mésozoïques à partir de la carte Raucourt-et-Flaba. *Bull. Inf. AGBP* 20 (1) : p. 9-43.

ARNOLD A et A. KUENG. 1985. Crystallization and habits of salt efflorescences on walls 1. *Actes du 5ème Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre,* Lausanne (Suisse). p. 255-267.

ARNOLD A et K. ZEHNDER. 1985. Crystallization and habits of salt efflorescences on walls II. *Actes du 5ème Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre,* Lausanne (Suisse). p. 269-277.

ARNOLD A et K. ZEHNDER. 1990. Salt weathering on monuments. Congrès "*Analitycal Methodologies for the Investigation of Damaged Stones*", Pavia (Italy). p. 31-57.

ARROYO G., I. ARROYO et C. VIVAR. 1995. Microbiological analysis of mortars from the church of San Juan del Mercado at Banavente, Spain. *The Science of the Total Environment* 167 : p. 221-229.

AUGER F. 1989. World limestone decay under marine spray conditions. *1er Symposium International. sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Bari (Italie). p. 65-69.

AUGER F. 1996. Durabilité des pierres calcaires utilisées dans le patrimoine architectural. *Mem. Soc. géol. France*. Volume de la sécance spécialisée : Carbonates intertropicaux. n.s. n°169 : p. 415-420.

AUSSET P., R. LEFEVRE et J. PHILIPPON. 1989. Atmospheric alumino-silicate microspherules inside the black-crust of altered limestone at Fontevraud Abbey (France). European symposium "*Science, Technology and European Cultural Heritage*", Bologne (Italie). p. 452-455.

AUSSET P., R. LEFEVRE, J. PHILIPPON et C. VENET. 1991a. Large scale distribution of fly-ash particles inside weathering crust on calcium carbonate substrates some examples on french monuments. *2ème Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Genève (Suisse). p. 121-139.

AUSSET P., R. LEFEVRE et J. PHILLIPPON. 1991b. Interactions entre les microsphérules silicatées atmosphériques et les surfaces de monuments en calcaire et en bronze. Actes du Congrès *« Airbone Particles, their Negative Effects on the Cultural Heritage and his Enviromnement »*, Ravello, 1989,1990. p. 135-147.

AUSSET P., F. BANNERY et R. LEFEVRE. 1992. Les microparticules dans l'air et dans une croûte noire de Sainte-Trophime d'Arles. *Actes du 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisbonne (Espagne). p. 325- 334.

AUSSET P., R. LEFEVRE, J. PHILIPPON et C. VENET. 1994. Présence constante de cendres volantes industrielles dans les croûtes noires d'altération superficielle de monuments français en calcaire compact. *C.R. Acad. Sci. Paris* 318 (II) : p. 493-499.

AUSSET P., J.-L. CROVISIER, M. DEL MONTE, V. FURLAN, F. GIRARDET, C. HAMMECKER, D. JEANNETTE et R. A. LEFEVRE. 1996. Experimentalt study of limestone and sandstone sulphation in polluted realistic conditions : the Lausanne atmospheric simulation chamber (LASC). *Atm. Envi.* 30. 18. : p. 3197-3207.

AUSSET P., M. DEL MONTE et R. A. LEFEVRE. 1999. Embryonic sulpahted black crusts on carbonate rocks in atmospheric simulation chamber and in the field : role of cabonaceous fly-ash. *Atm. Envi.* 33. 10. : p. 1525-1534.

BAKER A., P. L. SMART, R. L. EDWARDS et D. A. RICHARDS. 1993. Annual growth banding in a cave stalagmite. *Nature* 364 : p. 518-520.

BAKER A., N. MOCKLER et W. BARNES. 1999. Fluorescence intensity variation in speleothem-forming groundwaters : implications for paleoclimate reconstruction. *Water Resources Resarch* 35 (2) : p. 407-413.

BARBIN V., K. RAMSEYER, D. DECROUEZ, S.J. BURNS, J. CHAMAY et J.L. MAIER. 1992. Cathodoluminescence of white marbles : an overview. *Archaeometry* 34 (2) : p. 175-183.

BARBIN V. et M. SCHVOERER. 1997. Cathodoluminescence et géosciences. *C. R. Acad. Sci. Paris* 325 (IIa) : p. 157-169.

BATHURST R.G.C. 1995. Burial diagenesis of limestones under simple overburden. Stylolites, cementation and feedback. *Bull. Soc. géol. France* 166 (2) : p. 181-192.

BEAUDOIN J.P. 1991. Excursion AGBP, Arrêt n°13 : Aulnois-en-Perhois. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris* 28 : p. 25-28.

BEDON R. 1984. Les carrières et carriers de la Gaule Romaine. *Les carrières dans l'histoire*, PICARD Editeur.

BELIN S., Y. ANGUY, D. BERNARD, B. FRITZ et J.B. FERM. 1999. Caractérisation par analyse d'images de la micro-géométrie du réseau poreux d'un réservoir gréseux illitisé. *Bull. Soc. Géol. France* 170 (3) : p. 367-377.

BELL F.G. 1993. Durability of carbonate rock as building stone with comments on its preservation. *Env. Geol.* 21 : p. 187-200.

BERNARD P. 1988. La plate-forme niverno-icaunaise à l'Oxfordien supérieur et au Kimméridgien inférieur. Thèse de géologie, Université de Bourgogne, Dijon. 297 pages.

BERTRAND P., J-L. PITTION et C. BERNAUD. 1986. Fluorescence of sedimentary organic matter in relation to its chemical composition. *Org. Geochem.* 10 : p. 641-647.

BEZOUSKA J. R., J. WANG ET O. C. MULLINS. 1998. Origin of Limestone Fluorescence. *Applied spectroscopy* 52 (12) : p. 1606-1613.

BISCONTIN G., V. FASSINA, P. MARAVELAKI et E. ZENDRI. 1990. Venice : stone material behaviour in connection with the environment. Congrès "*Materials Issues in Art and Archaeology II*", 1990. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. 185. San-Francisco (USA).

BISCONTIN G., C. FELIX, P. MARAVELAKI et E. ZENDRI. 1991a. Characteristic, weathering forms and mechanisms of Istria stone in Venice. *2ème Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Genève (Suisse). p. 141-153.

BISCONTIN G., P. MARAVELAKI et E. ZENDRI. 1991b. The case of the "portale di S-Maria dei Servi" in Venice : results of physico-chemical inquiries. *2ème Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Genève (Suisse). p. 155-166.

BLANC A. 1972. Chémery, Bulson. Rapport de terrain et fiche signalétique. Bathonien – Ardennes. 4 pages. Non publié

BLANC A. 1972. Dom, Hannogne, Bulson. Rapport de terrain et fiche signalétique. Bajocien - Ardennes. 6 pages. Non publié

BLANC A. 1984 Courville, Romain. Rapport de terrain et fiche signalétique. Tertiaire – Marne. 6 pages. Non publié

BLANC A. 1991. Les Etudes Géologiques des Monuments Historiques. *Documents du Musée de la Pierre*. Fascicule 3. Maffle. (Belgique).

BLANC A. 1992. La restauration des monuments. In *Terroirs et monuments de France*, C. Pomerol éditeur. p. 365-368.

BLANC A. 1992. Le choix des pierres et leur mise en œuvre dans les monuments. *117° Congrès national des sociétés historiques et scientifiques*, Clermont-Ferrand. p. 43-56.

BLANC A. 1993. Faloise. Paris, Rapport de terrain et fiche signalétique. Tertiaire – Marne. 5 pages. Non publié

BLANC A. 1994. Utilisation du calcaire de Vertus (Marne) dans les monuments. *119° Congrès national des sociétés historiques et scientifiques*, 24-28 Octobre 1994, Amiens. p. 39-48.

BLANC A. 1998. La pierre et les carrières à Laon et dans le Laonnois. *Bull. Inf. Bass. Paris* 35 (3) : p. 9-15.

BLANC A., P. NOEL, J. BOUINEAU, C. ROCARD et J. JATON 1985. Les pierres employées pour la construction et la restauration des monuments du nord-est de la France, leur comportement en œuvre. *5ème Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, 25-27-9-1985, Lausanne (Suisse). p. 985-995.

BLANC A., C LORENZ et M VIRE. 1990. Le liais de Paris et son utilisation dans les monuments. *115° Congrès national des sociétés historiques et scientifiques*, Avignon. p. 247-259.

BLANC A et C. LORENZ. 1992. Ile-de-France et Champagne. Dans *Terroirs et monuments de France*, C. Pomerol éditeur. p. 111-138

BLANC A et J-P. GELY. 1997. Le Lutétien supérieur des anciennes carrières de Paris et de sa banlieue : essai de corrélation lithostratigraphiques et application à l'archéologie. Journées Claude Lorenz, Novembre 1995. p. 175-181.

BLASQUEZ F., M. GARCIA-VALLES, W.E. KRUMBEIN, K. STERFLINGER et M. VENDRELL-SAZ. 1997. Microstromatolitic deposits on granitic monuments : development and decay. *Eur. J. Mineral.* 9 : p. 889-901.

BLONDEAU A. 1965. Le Lutétien des bassin de Paris, de Belgique et du Hampshire, étude sédimentologique et paléontologique. Thèse de géologie, Paris. 465 pages.

BLONDEAU A. 1970. Le calcaire grossier du Bassin de Paris. *Bull; du B.R.G.M.* II (4) : p. 7-17.

BOUCHERET J., J. TETARD, A. WAECHTER, J. AUPRETRE, D. DETALLANTE et B. MENIS. 1998. Etude pétrophysique des calcaires lutétiens utilisés pour la construction de la cathédrale de Reims, la Pierre de Courville. *Rapport de projet de fin d'études*, I.U.T Léonard de Vinci, Département de Génie civil, Reims, 16 pages.

BOUINEAU J.P et R PERRIER. 1995. La décohésion granulaire, maladie des revêtements de façades en marbre. *Mines et Carrières - Industrie minérale* : p. 69-78.

BOUSQUIE P. 1979. Texture et porosité de roches calcaires : relations avec perméabilité, ascension capillaire, gélivité et conductivité thermique, Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure des mines de Paris, Paris, 191 pages.

de BRETIZEL, P.. 1962. Données nouvelles sur les "calcaires du Barrois" à l'ouest du fossé de la Marne. *Colloque sur le Jurassique*, Luxembourg. (Luxembourg). 16 pages.

BRGM (Ouvrage collectif). 1980. *Synthèse géologique du bassin de Paris*. 3 tomes. *Mem BRGM*. 101.

BROMBLET P. 1989. Les dégradations des pierres gréseuses des temples de Karnak (Egypte), analyse pétrologique des mécanismes et histoire de ces dégradations. Thèse de Géologie. Université de Paris VII, 201 pages.

BRUNO R., S. P. PAOLI, P. LAURENGE, M. COLICINNO, F. MUGE, V. RAMOS, P. PINA, M. MENGUCCI, M. CHICA OLMO ET E. S. OLMEDO. 1999. Image analysis for ornemental stone standard's characterisation. *Geovision'99*, 6-7 May 1999, Liège (Belgique). p. 29-32

BUVIGNIER A. 1854. *Statistique géologique, minéralogique et minéralogique de la Meuse.* 1 vol. 694 pages. 32 pl.

CAILLEUX A. 1953. Taffonis et érosion alvéolaire. *Cahiers géologiques de Thoiry* 16-17 : p.130-133.

CAMPY M. et MACAIRE J.J. 1987. Modifications superficielles des pierres en œuvre dans les bâtiments. Dans *Géologie des formations superficielles*, Ed. Masson. 423 pages.

CAMUFFO D. 1995. Physical weathering of stones. *The Science of the Total Environment* 167 : p. 1-14.

CAMUFFO D et A. BERNARDI. 1990. Atmospherique pollution and deterioration of monuments. *Congrès "Analitycal Methodologies for the Investigation of Damaged Stones"*, Pavia (Italy). 9 pages. 4 pl.

CAMUFFO D., M. DEL MONTE et C. SABBIONI. 1983. Origin and growth mechanisms of the sulfated crusts on urban limestone. *Water, Air and Soil Pollution* 19 : p. 351-359.

CARION B., A. CHARBAUT, C.A. HENRION, N. BLOCQUAUX, S. BRACHET et V. BRACQUEMART. 1999. Etude pétrophysique de la Pierre de Dom-le-Mesnil (Ardennes), pierre de construction utilisée dans la région de Charleville-Mézières. *Rapport de projet de fin d'études*, I.U.T Léonard de Vinci, Département de Génie civil, Reims, 2 volumes, Vol 1 : texte, 24 pages, Vol 2 : Annexes, 10 pages. Non publié.

CEBTP. 1993. Pierre de Jaumont : Essai sur pierres et granulats. Nancy : CEBTP. 10 pages. Non publié

CEBTP. 1997. Pierre de Jaumont, Banc Lacour : Essais sur pierres. Nancy : CEBTP. 6 pages. Non publié

CERCONE K.R et V.A. PEDONE. 1987. Fluorescence (photoluminescence) of carbonate rocks : instrumental and analytical sources of observational error. *Journal of sedimentary petrology* 57 (4) : p. 780-782.

De CHARPAL O., B.H. PURSER et P. TREMOLIERES. ? Compaction, dissolution et précipitation secondaire dans les calcaires du Dogger à l'est du Bassin Parisien. *?* ? : p. 121-132.

CHOQUETTE P.W et L.C. PRAY. 1970. Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Bull. A.A.P.G.* 54 (2) : p. 207-250.

CHOWDHURY A.N., R.P. ADINARAYANA et K.L. GAURI. 1990. Weathering of limestone beds at the Great Sphinx. *Environ. Geol. Water Sci* 15 (3) : p. 217-223.

COOTE A.T., T. YATES et H. A. VILES. 1988. A study of limestone decay, final report. *European cultural heritage* 2 (3) : p. 18-26.

COSTER M et J.-L. CHERMANT. 1989. *Précis d'analyse d'images*. Presses du CNRS. Paris. 560 pages

Cercle des Partenaires du Patrimoine. 1997-1999. Comptes-rendus des réunions des commissions scientifique des programmes « Produits protecteurs, 3 monuments » et « Efficacité comparée de produits protecteurs appliqués aux pierres des monuments de la région Champagne-Ardenne ». Responsables de projet : F. Boutin, L. Leroux, rapports internes. non publiés.

CUIF J-P., P. GAUTRET, G.F. LAGHI, A. MASTANDREA, B. PRADIER et F RUSSO. 1990. Recherche sur la fluorescence UV du squelette aspiculaire chez les desmosponges calcitiques triasiques. G*eobios* 23 (1) : p.21-31.

DAUBENFELD N. 1967. Contribution à l'étude du Lutétien de la feuille au 1/50000 de Craonne, DESSN mention géologie. Université de Reims, 2 Volumes, Vol 1 : texte, 73 pages, Vol 2 : Atlas, 56 pages. Non publié

DEL MONTE M. 1992. Stone monuments and air pollution : magnification of damage layer caused by previous biodegradation phenomena. *European cultural heritage* 6 (2) : p.23-34.

DEL MONTE M. et V. FURLAN. 1995. Croûtes noires, sulfatation et dégradation de la pierre. *Proceedings of the 1995 LCP congress. Preservation and restoration of cultural heritage.* Montreux (Suisse). p.349-369.

DEL MONTE, M et P. ROSSI. 1997. Fog and gypsum on building materials. *Atmospheric Environment* 31 (11) : p.1637-1646.

DEROIN J.P. 1990. Le choix de la pierre dans l'architecture cistercienne au XII° siècle, principaux résultats sur les filiations de Citeaux et Clairvaux. *115° Congrès national des sociétés historiques et scientifique*s, Avignon. p. 21-39.

DESSANDIER D. 1995. Etude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine. Application à la durabilité des pierres en œuvre. Thèse de l'Université de Tours en Sciences de la Terre, mention géomatériaux. 218 pages.

DIAKUMAKU E., P. AUSSET, K. STERFLINGER, U. WOLLENZIEN, E. KRUMBEIN et A. LEFEVRE. 1994. On the problem of rock blackening by fly-ash, fungal and other biogenic particles, and their detection in mediteranean marbles and monuments. *3ème Symposium international sur la conservation des monuments dans le Bassin méditerranéen*, 22-25 juin 1994, Venise. p. 305-310.

DOLFINI L. 1920. Recherches de Carrières. Reims, Monuments historiques, Cathédrale de Reims, Architecte en chef : Deneux. Ministère de l'Instruction Publique et des Beaux Arts, 25 pages. Non publié.

DRAGOVICH D. 1991. Marble weathering in an industrial environment, Eastern Australia. *Environm. Geol. Water. Sci.* 17 (2) : p. 127-132.

DRAVIS J.J et D.A. YUKEWICZ. 1985. Enhanced carbonate petrography using fluorescence microscopy. *Journal of sedimentary petrology* 55 (6) : p. 795-804.

DRGN ET COLLECTIF. 1995. *Pierre à bâtir traditionnelles de la Wallonie, Manuel de Terrain*. DGRN. Ministère des ressources naturelles et de l'environnement, 261 pages.

DUNHAM R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. *Mem. Amer. Ass. Petrol. Geol.* 1, p. 108-121.

DURLET C. 1996. *Apport de la diagenèse des discontinuités à l'interprétation paléo-environnementale et séquentielle d'une plate-forme carbonatée. Exemple des calcaires aaleno-bajociens du Seuil de Bourgogne*. Thèse de Doctorat de géologie. Université de Bourgogne, Dijon. 444 pages

DURLET C., J-P. LOREAU et A. PASCAL. 1992. Signature diagénétique des discontinuités et nouvelle représentation graphique de la diagenèse. *C. R. Acad. Sci. Paris* 314 (II) : p. 1507-1514.

DURLET C. et J-P. LOREAU. 1996. Séquence diagénétique intrinsèque des surfaces durcies : mise en évidence de surface d'émersion et de leur ablation marine, exemple de la plate-forme bourguignonne, Bajocien (France). *C. R. Acad. Sci. Paris* 323 (IIa) : p. 389-396.

DURLET C. et J-P. LOREAU. 1997. Influence des fonds durcis sur la croissance des ciments sparitiques pendant la diagenèse d'enfouissement. *6ème Congrès Français de Sédimentologie*, Nov 1997, Montpellier. p. 99-100.

EHRLICH R., S.K. KENNEDY, J.C. STERLING et R.L. CANNON. 1984. Petrographic image analysis, Image analysis of reservoir pore complexes. *Journal of Sedimentary Petrology* 54 (4) : p. 1365-1378.

ENAY R. et A. BOULLIER. 1981. L'âge du complexe récifal des côtes de Meuse entre Verdun et Commercy et la stratigraphie de l'Oxfordien dans l'est du Bassin de Paris. *Geobios*. 14. p. 727-771.

EXNER H. E ET H. P. HOUGARDY. 1988. *Quantitative image analysis of microstructures*. Ed. Verlag, *Information gesellschaft*. Germany. 235 pages.

FABRE R., T. LEBOURG ET J. RISS. 1999. Textural characteristics of till formation. *Geovision'99*, 6-7 May 1999, Liège (Belgique). p. 85-88

FASSINA V. 1995. New finding on past treatments carried out of stone and marble monument's surface. *The Science of the Total Environment* 167 : p. 185-203.

FELIX C. 1985. Altérations desquamantes et composés soufrés d'origine atmosphérique : cas des grès tendres molassiques des quelques monuments lausannois. *5ème Congrès international sur l'altération et la conservation de la pierre*, Lausanne. p. 391-409.

FERM J.B., R. EHRLICH et G.A. CRAWFORD. 1993. Petrographic image analysis and petrophysics : Analysis of crystalline carbonates from the permian basin, West Texas. *Carbonates and Evaporites* 8 (1) : p. 90-108.

FURLAN V. 1990. Causes, mechanismes and measurement of damage in cultural heritage material : The state of the art - Mortars, briks and renderings. *Congrés "Analitycal Methodologies for the Investigation of Damaged Stones"*, Pavia (Italy). 9 pages.

FURLAN V et f. GIRARDET. 1989. Quantification des effets de la pollution atmosphérique sur les pierres et contribution à l'étude des moyens de protection. In *Méthode de conservation des biens culturels*, Résultats de recherche du programme 16 du Fond National Suisse pour la Recherche. p. 47-51. 3 pl.

GALAN E. 1989. Carbonate rocks; alteration and control of stone quality : some considerations. *Actes du premier Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Bari (Italie). p. 249-254.

GARCIA J.-P.. 1992. Les variations du niveau marin sur le Bassin de Paris au Bathonien Callovien, impact sur les communautés benthiques et sur l'évolution des Ornithellidés (Terebratellidina). Thèse de géologie. Université de Bourgogne, Dijon, 295 pages + 5 planches photographiques.

GAURI K.L. 1978. La conservation de la pierre. *Pour la science* 10 : p. 62-69.

GAURI K. L et R.P. ADINARAYANA. 1989. Characterization and durability of limestones determined through mercury porosimetry. *Actes du premier Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Bari (Italie). p. 255-258.

GAURI K.L., S.S. TAMBE et E.N. CANER-SALTIK. 1992. Weathering of dolomite in industrial environment. *Environ. Geol. Water Sci* 19 (1) : p. 55-63.

GELY J.P. 1992. Utilisation des différents pierres de construction dans le Tardénois : exemple du château médiéval de Fère-en-Tardenois et de sa galerie Renaissance (Aisne, France). *117° Congrès national des sociétés historiques et scientifiques*, Clermont-Ferrand. p. 89-101.

GELY J.P. 1996. Le Lutétien du Bassin de Paris : de l'analyse séquentielle haute résolution à la reconstitution paléogéographique. *Bull. Inf. Bass. Paris* 34 (2) : p. 2-37.

GELY J.P. 1998. Le Lutétien du Valois et du Laonnois. *Bull. Inf. Bass. Paris* 35 (3) : p. 16-19.

GENTY D., A. BAKER et W. BARNES. 1997. Comparaison entre les lamines luminescentes et les lamines visibles annuelles de stalagmites. *C. R. Acad. Sci. Paris* IIa (325) : p. 193-200.

GERARD R. 1985. Détermination de la durabilité au gel par une méthode de capillarité. *5ème Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, Lausanne (Suisse). p. 157-167.

GERAUD Y., F. MAZEROLLE et S. RAYNAUD. 1993. Essai de quantification de la porosité d'un granite altéré : utilisation du scanner médical (tomodensitomètre X). *Bull. Soc. géol. France* 164 (2) : p. 243-253.

GERDAUX A. 1981. La carrière de craie de Chépy à exploitation artisanale en Champagne châlonnaise. *Bull Soc. d'agriculture de la Marne* : p. 197-240.

FLOQUET M., B. LAURIN, P. LAVILLE, D. MARCHAND, J.-C. MENOT, A. PASCAL et J. THIERRY. 1989. Les systèmes sédimentaires bourguignons d'âge Bathonien terminal - Callovien. *Bull. Soc. Nat. Elf-Aquitaine*. 13. p. 133-165.

FLÜGEL E. 1982. *Microfacies analysis of Limestones*. Springer-Verlag Ed. 2ème Edition. 633 pages, 53 pl. 78 fig.

FOLK R.L. 1959. Practical petrographical classification of limestones. *Amer. Ass. Petrol. Geol.* 43.1 : p. 1-38.

FOLK R.L. 1962. Spectral subdivision of limestone types. *Mem. Amer. Ass. Petrol. Geol.* 1 : p. 62-84.

FRANCOIS D et P. LE BRUN. 1992. Guide des carrières et des pierres. *Savonnières et Brauvilliers* : Documentation interne ROCAMAT, 2 pages. Non publié.

FRANCUS P. 1998. An image analysis technique to measure grain-size variation in thin section of soft clastic sediments. *Sedimentary geology* 121 : p. 289-298.

FRANCUS P., M. ABBORT, R. BRADLEY, C. BRAUN, D. HARDY ET B. PERREN. 1999. Applying image analysis to laminated sediments from Sawthooth Lake, Artic, Canada. Geovision'99, 6-7 May 1999, at Liège (Belgique). p. 93-96

FRANK T.D., K.C. LOHMANN et W.J. MEYERS. 1995. Chronostratigraphic signifiance of cathodoluminescence zoning in syntaxial cement : Mississippian Lake Valley Formation. *Sedimentary Geology* 105 : p. 29-50.

FRITZ B et D. JEANNETTE. 1981. Pétrographie et contrôle géochimique expérimental de transformations superficielles de grès de monuments. *Sci. Géol. Bull.* 34 (4) : p. 193-208.

FRONTEAU G. 1995. Caractérisation de discontinuités majeures dans le Kimméridgien de Bourgogne et du sud-est du Bassin de Paris : Sédimentologie, Diagenèse, micro et nanofaciès. DEA PAL&SED, Université, Dijon 50 pages. Non publié

FRONTEAU G., V. BARBIN et A. PASCAL. 1997. Importance du faciès sédimentaire et diagénétique dans le comportement en œuvre d'un géomatériau : le cas des calcaires de l'Est et du Nord-Est du Bassin de Paris. *6ème Congrès de Sédimentologie*, Montpellier. p. 123-124.

FRONTEAU G., V. BARBIN et A. PASCAL. 1999a. Impact du faciès sédimento-diagénétique sur l'altération en œuvre d'un géomatériau calcaire. *C. R. Acad. Sci. Paris* 328 : p. 671-677.

FRONTEAU G., V. BARBIN et A. PASCAL. 1999b. Microfacies characterization of heterogeneous limestones by image analysis, relation with quarry sites : some building stones frome the Paris basin. *Geovision'99*, 6-7 May 1999, Liège (Belgique). p. 97-100

FRONTEAU G., J.-C. PAICHELER. 1999. Rapport préliminaire de l'analyse des faciès et des microfaciès des éléments architecturaux de la rue Belin Site Gallo-Romain, Chantier A.F.A.N Reims. Rapport interne. 25 pages.

GOBBI G., G. ZAPPIA et C. SABBIONI. 1995. Anion determination in damage layers of stone monument. *Atmospheric Environment* 29 (6) : p. 703-707.

GÖTZE J. 1998. Principle and Advantages of Cathodoluminescence microscopy. *Microscopy and analysis* : p. 17-19.

GÖTZE J et M. MAGNUS. 1997. Quantitative determination of mineral abundance in geological samples using combined cathodoluminescence microscopy and image analysis. *Eur. J. Mineral.* 9 : p. 1207-1215.

GÖTZE J., D. HABERMANN, R. NEUSER et D. RICHTER. 1999. High resolution spectrometric analysis of rare earth element-activated cathodoluminescence in feldspar minerals. *Chemical geology* 153 :p. 81-91.

GOUDIE A.S. 1999. Experimental salt weathering of limestones in relation to rock properties. *Earth. Surf. Process. Landforms.* 24 : p. 715-724.

GUILLITTE O. 1995. Bioreceptivity : a bew concept for buildings ecology studies. *The Science of the Total Environment* 167 : p. 215-220.

HATRIVAL J.N et A. BEUGNIES. 1973. Carte géologique et notice, Charleville-Mézières 1/50 000 : BRGM, Notice: 23 pages.

HILLY J. 1992. Lorraine. In *Terroirs et monuments de France*, C. Pomerol éditeur, p. 157-167

HILLY J et D. FRANCOIS. 1991. Excursion AGBP, Arrêt n°14 : Euville. *Bulletin d'Information des Géologues du Bassin de Paris* 28 : p. 29-32.

HOLST G.C. 1998 *CCD Arrays, cameras and displays* SPIE Optical Enginering Washington.

HUMBERT L. 1971. Recherche méthodologique pour la restitution de l'histoire bio-sédimentaire d'un bassin. L'ensemble carbonaté oxfordien de la partie orientale du Bassin de Paris. Thèse d'état, Université de Nancy. 364 pages.

JACQUEMIN F. 1981. La carrière de craie de Chépy à exploitation artisanale en Champagne châlonnaise. *Bull Soc. d'agriculture de la Marne* : p. 123-146.

JATON C., G. ORIAL et A. BRUNET. 1985. Actions des végétaux sur les matériaux pierreux. *5ème Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, Lausanne (Suisse). p. 577-586.

JATON J.. 1997. Pierres (Maladies des), E. Universalis. 18 – 335a.

JAVAUX C. 1992. La plate-forme parisienne et bourguignonne au Bathonien terminal et au Callovien. Thèse de géologie. Université de Bourgogne, Dijon, *Mem. Géol. Univ. Dijon*. 16. 342 pages.

JEANNETTE D. 1981. Modifications superficielles de grès en œuvre dans des monuments alsaciens. *Sci. Géol. Bull.* 34 (1) : p. 37-46.

JEANNETTE D. 1992a. Morphologie des altérations des pierres en œuvre dans *La Conservation de la Pierre Monumentale en France*. Presses du CNRS. P. 63-72.

JEANNETTE D. 1992b . L'altération des monuments dans *Terroirs et monuments de France*, édité par C. Pomerol. p. 355-364.

JOWAY H.F. 1985. Méprises constructives provoquant l'altération des pierres. *5ème Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, Lausanne (Suisse). p. 997-1005.

KASIMI R et A. PREAT. 1996. Sédimentation de rampe mixte silico-carbonatée des coches de transition Eifféliennes-Givétiennes Franco-Belges : 2° Partie : Cyclostratigraphie et Paléostructuration. *Bull; Centres Rech. Explor-Prod. Elf-Aquitaine* 20 (1) : p. 61-90.

KRUMBEIN W.E. et A.A. GORBUSHINA. 1994. Organic pollution and rock decay. *Actes du 3ème Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen* Venise (Italie) p. 277-284.

KWON K. W., H. D. PARK, M. H. KIM et Y. S. CHANG. 1999. Application of thermal video system in the non-desctructive inspection of national stone treasures in Korea. *Geovision'99*, 6-7 May 1999, Liège (Belgique). p. 145-148

LATHUILLIERE, B. 1998. Visite des carrières d'Euville et de Pagny-sur-Meuse : livret guide géologique. 5ème Rencontres Géole, novembre 1998, Euville. 14 pages. Non publié.

LAURAIN J. 1998. Les associations de végétaux inférieurs, troisième partie : les lichens. *Bull. Soc. Et. Sciences Nat Reims* 12 : p. 15-37.

LAURAIN M. 1976. Carte géologique et notice, Fismes 1/50 000 : BRGM. Notice 26 pages.

LAURAIN M et L. BARTA. 1973. Faciès marins et lacustres de l'Eocène Tardénois. *Ann. Sci. Univ. Reims* 11 (3-4) : p. 69-79.

LAUTRIDOU J-P. et J.C. OUZOUF. 1987. Définitions des normes d'analyse physique des roches ; Fascicule 1 : acquisitions nouvelles sur la porosité et sur la perméabilité des roches au cours des 10 dernières années. Ed. CNRS. Centre de géomorphlogie de Caen 29 pages.

LAVILLE, P., R. CUSSEY, J. DURAND et M. FLOQUET. 1989. Faciès, structure et dynamique de mise en place de dunes bioclastiques au Callovien inférieur de Bourgogne. *Bull. Soc. Nat. Elf-Aquitaine*.

LAZZARINI L. et M.L. TABASSSO 1986 **Trad PHILIPPON** 1987. *La Restauration de la pierre*. Centre National des Lettres et Institut Français de la Restauration d'Oeuvres d'Arts. 263 pages.

LEBRUN V., J.-F. NIVART, E. BONINO et E. PIRARD. 1999. Development of specific acquisition techniques for field imaging, application to outcrops and marbles. *Geovision'99*, 6-7 May 1999, Liège (Belgique). p. 165-168

LEFEVRE R. et R BOUGRAIN-DUBOURG. 1992. Global study of the atmospheric environment and air pollution in relation to restoring the romanesque portal of the primatial church of St-Trophime in Arles, France. *International Workshop on conservation of architectural surfaces : stone and wall covering*. Unesco Venise. p. 137-141.

LIVINGSTON R.A. 1985. The role of the nitrogene oxides in the deterioration of carbonate stone. *5ème Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, Lausanne (Suisse). p. 509-515.

LOREAU J.P. 1972. Pétrographie de calcaires fins au microscope électronique à balayage : introduction à une classification des "micrites". *C. R. Acad. Sci. Paris* 274 : p. 810-813.

MACHEL H.G., R.A. MASON, A.N. MARIANO et A. MUCCI. 1991. Cause and emission of luminescence in calcite and dolomite. In *Luminescence microscopy : quantitative and qualitative aspects*, édité par SEPM. p. 9-25.

MAMILLAN, M. 1985. Tendances internationales vers une nouvelle approche pour l'interprétation des essais de durabilité des matériaux. *5ème Congrès International sur l'altération et la conservation de la pierre*, Lausanne (Suisse). p. 141-151.

MAMILLAN, M. 1990. Méthodes d'évaluation des dégradations des monuments en pierre. Congrès "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones", Pavia (Italie). 16 pages.

MARTINET G, J.-S. GUEDON et A. LE ROUX. 1993. L'altération d'un calcaire Lutétien dans un milieu urbain. Conservation of stone and other materials. p. 336-343.

MARTINET G et J.J MACAIRE. 1990. Etude des tuffeaux en œuvre dans la cathédrale St-Gatien de Tours (Indre-et-Loire). *115° Congrès national des sociétés historiques et scientifiques*, Avignon. p. 337-350.

MAUBEUGE P.L. 1953. *Observations Géologiques dans l'Est du Bassin de Paris*. 2 Tomes. p.756 –760.

MAUSOLEE. 1985. Les carrières de Brauvilliers et de Savonnières. *Le Mausolée* : p. 1263-1265.

MAUSOLEE. 1976. *Essai de nomenclature des carrières françaises de construction et de décoration*. Le Mausolée. 254 pages.

MAY A. 1994. Microfacies control on weathering of carbonate building stones : Devonian (northern Sauerland, Germany). *Facies* 30 : p. 193-208. 2 pl.

MEGNIEN F. 1977. Carte géologique et notice, Vertus 1/50 000 : BRGM. Notice 23 pages.

MEYERS W. J. 1991. Calcite cement stratigraphy : an overview. In Luminescence Microscopy : quantitative and qualitative aspects. Editeurs C.E. Baker et O.C. Kopp. SEPM. p. 133-147.

MONTENAT C. 1998. De l'usage du calcaire Danien dans les construction anciennes du Vexin Normand. *Bull. Inf. Bass. Paris* 35 (4) : p. 3-27.

MORAITI E et B. CHRISTARAS. 1991. Weathering of marly and biogenic limestones used in the antiquities of Cretes, Greece. Stratigraphy and mechanical consideration. *2ème Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Genève (Suisse). p. 483-492.

NION S. 1997. Traitement in situ des géomatériaux. Application aux grès de Pétra (Jordanie) Thèse de l'Université Henri-Poincaré-Nancy I en Géologie 158 pages + Annexes.

NOEL P. 1970. *Les carrières françaises de pierre de taille*. Société de diffusion des Bâtiments et Travaux Publics. 261 pages.

NOEL P.. 1998. *Le temps n'a plus d'empreinte* : Leon Noel, Restauration de Monuments Historiques.

O'BRIEN P.F., E. BELL, T.L.L. ORR et T.P. COOPER. 1995. Stone loss rates at sites around Europe. *The Science of the Total Environment* 167 : p. 111-121.

PARADISE T. R. 1995. Sandstone weathering threshold in Petra, Jordan. *Physical Geography* 16 (3) : p. 205-222.

PARADISE T. R. 1997. Disparate sandstone weathering beneath lichens, Red Mountains, Arizona. *Geografiska Annaler* 79A (3) : p. 177-184.

PARADISE T. R. 1998. Limestone weathering and rate variability, great temple of Amman, Jordan. *Physical geography* 19 (2) : p. 133-146.

PARADISE T. R. 1998. Sandstone weathering, Petra. *American Journal of Archeology* 102 (3) : p. 576-579.

PAULY J-P. 1996. Altération alvéolaire : évolution et climatologie. *Mem. Soc. géol. France* n. s. n°169 : p. 421-426.

PELLERIN F.M. 1978. Les altérations de maçonneries carbonatées de tunnels ferroviaires anciens. Thèse de Docteur-ingénieur en géologie de l'ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des mines, Paris. 232 pages.

PHILIPPON. J., D. JEANNETTE et R.-A. LEFEVRE. 1992. *La Conservation de la Pierre Monumentale en France.* Presses du CNRS. 267 pages

POMEROL C. 1992. *Terroirs et monuments de France*, Editions du BRGM.

PREAT A et R. KASIMI. 1995. Sédimentation de rampe mixte silico-carbonatée des coches de transition Eifféliennes-Givétiennes Franco-Belges : 1° Partie : Microfaciès et Modèle sédimentaire. *Bull; Centres Rech. Explor-Prod. Elf-Aquitaine* 19 (2) : p. 329-375.

PRICK A. 1995. Utilisation de la méthode dilatométrique dans l'étude expérimentale de l'altération de calcaires et de granites par du sulfate de calcium. *Proceedings of the 1995 LCP Congress. Preservation and restoration of cultural heritage P Montreux* (Suisse). p. 177-185.

PUNURU A., A.N. CHOWDHURY, N.P. KULSHRESHTHA et K.L. GAURI. 1990. Control of porosity on durability of limestone at the Great Sphinx, Egypt. *Environ. Geol. Water Sci* 15 (3) : p. 225-232.

QUENNEE B. 1990. Transformations minéralogiques et texturales de matériaux rocheux, mortiers et bétons d'ouvrage variés : approche de la cinétique des mécanismes et identification des facteurs responsables. Thèse de Géologie mention Géosciences et matériaux, Université de Nancy I. 192 pages.

RAT P. 1992. Bourgogne. In *Terroirs et monuments de France*, C. Pomerol Editeur. p. 42-61.

RAT P. 1992. Pierres roses, pierres rouges à Dijon, ville de pierres dorées. *117ème Cong. Nat. Soc. Hist. Scient*, Clermont-Ferrand. p. 309-321.

RAT P. 1994. La pierre de Dijon : variétés, emplois, carrières. *119ème Cong. Nat. Soc. Hist. Scient*., Amiens. p. 445-465.

RAUTUREAU M, G. PIERRE et P. BENDIMERARD. 1994. Incidence des joints stylolithiques sur le développement de l'altération des pierres calcaires. *Proceedings of the 3rd International symposium*. Venise (Italie) p. 65-68.

RAUTUREAU M et G. PIERRE. 1996. L'évolution des pierres en œuvre peut-elle être maîtrisée ? Altérations ou adaptations des pierres calcaires en œuvre ? *Mem. Soc. géol. France* n. s. n°169 : p. 407-414.

RAUTUREAU M. et collaborateurs. 1991 et 1999. « Tendre comme la pierre », monuments en tuffeau, guide pour la restauration et l'entretien. Ouvrage imprimé et Site internet : www.culture.fr/culture/conservation/preventi/tuffeau/index.html

RAVAUX J-P. 1979. Les matériaux de construction utilisés à Châlons-sur-Marne du XII° au XVII° siècle. In *Histoire et Traditions de Champagne*, J.-M. Arnoult Editeur. Châlons-sur-Marne. p. 407-414.

REMY J.M. 1993. Influence de la structure du milieu poreux carbonaté sur les transferts d'eau et les changements de phase eau - glace : application à la durabilité au gel de roches calcaires de Lorraine. Thèse de Géologie mention Génie civil et minier, Ecole Nationale Supérieure de Géologie, Nancy, 327 pages.

RENARD M. et G. RICHEBOIS. 1983. Etude géochimique des carbonates de la série Jurassique de la Feuille de Raucourt-et-Flaba. *Bull. Inf. AGBP* 20 (1) : p. 44-44 ter.

RIONTINO C., C. SABBIONI, N. GHEDINI, G. ZAPPIA, G. GOBBI, O. FAVONI. 1998. Evaluation of atmospheric deposition on historic buildings by combined thermal analysis and combustion techniques. *Thermochimica acta*. 321. p. 215-222.

ROBIN C., DURLET, C., RIVELINE et Collaborateurs 1998. Etude sédimentologique et stratigraphique d Lutétien du Bassin de Paris. *Livret-Guide Excursion pré-congrès*, Strati 2000 Novembre 1998 Paris. 97 pages.

ROCAMAT. 1997. Savonnières 1/2 fine et Brauvilliers Banc II. Fiches Techniques Rocamat. 2 Planches.

RODRIGUEZ-NAVARRO C. et E. SEBASTIAN. 1996. Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestones) sulfation. *The Science of the Total Environment 187* : p. 79-91.

RODRIGUEZ-NAVARRO C., E. SEBASTIAN et M. RODRIGUEZ-GALLEGO. 1997. An urban model for dolomite precipitation : autigenic dolomite weathered building stones. *Sedimentary Geology* 109 : p. 1-11.

RODRIGUEZ-NAVARRO C., E. DOEHNE et E. SEBASTIAN. 1999. Origins of honeycomb weathering : the role of salts and wind. *Geo.l Soc. Of America.* 111. 8. : p. 1250-1255.

RUFFINI R., A. BORGHI, P. CADOPPI, R. COSSIO et F. DELA PIERRE. 1999. Modal determination and image analysis performed by EDS/SEM system applied to sedimentary rocks. *Geovision'99*, 6-7 May 1999, Liège (Belgique). p. 209-212.

RUSS J. J. 1990. *Computer Assisted Microscopy, The measurement and analysis of images*. Édité par P. Press. New York, London. 435 pages.

SABBIONI C. 1995. Contribution of atmospheric deposition to the formation of damage layer. *The Science of the Total Environment* 167 : p. 49-55.

SABBIONI C., G. ZAPPIA, N. GHEDINI, G. GOBBI et O. FAVONI. 1998. Black crusts on ancient mortars. *Atmospheric Environment* 32 (2) : p. 215-223.

SALIN E. 1935. Monographie des Calcaires du Barrois. *Bull. Soc. Géol. France* 5 (5) : p. 117-165.

SAMSOM-GOMBERT C. 1993. Influences d'un environnement urbain et maritime sur les altérations d'un calcaire en œuvre : la pierre de Caen, Thèse de géologie, Université de Caen. 320 pages

SCHIAVON N. 1992. BSEM study of decay mechanisms in urban oolitic limestones. *European Cultural Heritage* 6 (3) : p. 35-46.

SERRA J. 1982. *Image analysis and mathematical morphology*. Academic Press Londres. 610 pages.

SOEDER D.J. 1990. Applications of fluorescence microscopy to study of pores in tight rocks. *A.AP.G. Bull.* 74 (1) : p. 30-40.

SONY. 1998. *3CCD Color Video Camera, Mode d'emploi*. DXC - 930 P.

STCHEPINSKY. 1949. Géologie de l'abîme de Savonières-en-Perthois (Meuse). Bull. Ass. Spéléo. Est. II. 4. p. 79-82

STCHEPINSKY. 1959. Carte géologique et notice, Bar-le-Duc, 1/50 000 : BRGM.

STCHEPINSKY. 1960. Carte géologique et notice, Joinville 1/50 000 : BRGM.

STCHEPINSKY V. 1969. Carte géologique et notice, Wassy 1/80 000 : BRGM. Notice 6 pages.

THIRY-BASTIEN. P., J. THIERRY, P. DEBOURSE et J.P. VIDIER. 1999. Nouveau découpage lithostratigraphique et évolution des paléoenvironnements sur la bordure S.W. du massif ardennais au Bathonien supérieur – Callovien inférieur 7ème *Congrès Français de Sédimentologie*, Nov 1999, Montpellier. p. 295-296.

TOURTEBATTE P. 1995. *La pierre de Courville*. Édité par Carrière et scieries de l'Ardre, 16 pages.

TUCKER M. E. et WRIGHT. V. P. 1990. *Carbonate sedimentology*. Blackwell scientific publications. Oxford. 2ème Edition en 1992. 482 pages.

ULENS K. 1994. Analyse van het patina van verweerde witte marmersoorten via stabiele isotopenanalyse 14C-onderzoek, cathodoluminescentie en laser ablation inductief gekoppeld plasma massaspectrometrie, Thèse de Physique, Anvers (Belgique).

VAGLIO S.A.. 1998. *Jaumont, La pierre jaune à travers mes siècles*. Documentation Vaglio S.A. 21 pages.

VAN VLIET-LANOE B. 1985. Apport de la microscopie en épifluorescence à l'étude de la porosité et de la fissuration des roches. *Bull. Centre de Géomorphologie du CNRS de Caen* 30 : p. 61-75.

VENDRELL-SAZ M., M. GARCIA-VALLES, S. ALARCON et J. MOLERA. 1996. Environmental impact on the Roman monuments of Tarragona, Spain. *Env. Geol.* 27 : p. 263-269.

VERAGUE J. 1998. Altération expérimentale et géomorphologie, l'exemple des granitoïdes et des cornéennes normano-manceaux (France). *Z. Geomorph N. F.* 42 (3) : p. 307-328.

VERGES-BELMIN V., G. ORIAL, D. GARNIER, A. BOUINEAU et R. COIGNARD. 1991. Impregnation of badly decayed Carrara marble by consolidating agents : comparison of seven treatments. *2ème Symposium International sur la Conservation des monuments dans le Bassin Méditerranéen*, Genève (Suisse). p. 421-437.

VILES H.A. 1990. The early stage of building stone decay in an urban environment. *Atmospheric Environment* 24A (1) : p. 229-232.

VIRE M. 1994. La carrière du "Chemin du Port-Mahon" à Paris. Etude d'exploitations médiévales par le textes et par l'archéologie. *119° Cong. Nat. Soc. Hist. Scient.* 24-28 Octobre 1994, Amiens. p. 265-277.

VIRE M. 1997. Le nom des bancs exploités dans le calcaire grossier à Paris : Etymologie et géologie. *Journées Claude Lorenz*, Novembre 1995. p. 183-186.

VLEUGELS G., R. DEWOLFS et R. VAN GRIEKEN. 1993. On the memory effect of limestone for air pollution. *Atmospheric environment* 27A (12) : p. 1931-1934.

VOIRON C. 1995. *Analyse spatiale et analyse d'images*, G. Reclus Ed., Montpellier. 190 pages.

VOUVE J., J. GAYET et P. MALAURENT. 1996. Essai de caractérisation fasciologique du calcaire de St-Emilion (Oligocène) dans une approche de sauvegarde du patrimoine monumental lithique. *Mem. Soc. Géol France* 169 : p. 427-434.

WEBER N., P. GUYOMARD et T. GARLAN. 1997. Utilisation de l'imagerie numérique pour l'étude des carottes sédimentaires. *6ème Congrès Français de Sédimentologie*, Nov 1997, Montpellier. p. 281-282.

WENDTE J., J.J. DRAVIS, L.D. STASIUK, H. QING, S.L.O. MOORE et G. WARD. 1998. High-temperature saline (thermoflux) dolomitization of Devonian Swan Hills platform and bank carbonates, Wild River area, west-central Alberta. *Bull. Can. Petrol. Geol.* 46. 2. p. 210-265.

WINKLER E.M. 1975. *Stone : Properties, durability on man's environment* Ed Springer-Verlag Vienne. 230 pages.

WILCZYNSKA-MICHALIK, W. 1999. Development of weathering crust on carbonate rocks in relation to different environmental conditions. 19*ème Regional European Meeting of Sedimentology*, Copenhagen (Danemark). p. 277-278.

WRIGHT V.P. 1992. A revised classification of limestones. *Sedim. geol.* 76 : p. 177-185.

YING X et L. CHEUNG. 1999. Image File Formats for digital microscopy. *European Microscopy and analysis* (57) : p. 9-12.

ZAPPIA G., C. SABBIONI, C. RIONTINO, G. GOBBI et FAVONI, O. 1998. Exposure test of building materials in urban atmosphere. *The Science of the Total Environment.* 224. p. 235-244.

ZEZZA F., F. MACRI, D. DECROUEZ, V. BARBIN, K. RAMSEYER, J. GARCIA-ROWE et C. SAIZ-JIMENEZ. **ZEZZA U.** 1990. Physical-mechanical properties of quarry and building stones. Congrès *"Analitycal Methodologies for the Investigation of Damaged Stones"*, Pavia (Italy). 21 pages.

ZEZZA F et F. MACRI. 1995. Marine aerosol and stone decay. *The Science of the Total Environment 167. 123-143.*

Tables :

- 1/ Table des matières
- 2/ Liste des figures
- 3/ Liste des tableaux

Table des matières

Avant-propos 3
Sommaire 5

Introduction :

Point sur les études de l'altération des pierres à bâtir calcaire 9
Problématique et objectifs de la thèse 10
Organisation des résultats 11
Mode d'approche 11
Liste des pierres à bâtir retenues 12

Présentation et Méthodes de travail 12
La Champagne-Ardenne :
Cadre géographique sommaire 12
➢ Carte géologique de la Champagne-Ardenne 13
Cadre géologique sommaire 14

Inventaire des calcaires utilisés en Champagne-Ardenne 16
Recherche bibliographique 16
Recherche sur le terrain : sites d'extraction et sites d'utilisation 16

Méthodes d'étude et appareillage 17
Microscopie optique en lumière naturelle ou sous luminescence 17
Numérisation et analyse d'images 18

Caractérisation des calcaires : faciès et microfaciès 19
Principes de base 19
Composition d'un calcaire : éléments et phase de liaison 20
Classification des carbonates 22
Porosité : caractérisation et quantification 23
- 1/ Classification de la porosité en fonction de la taille des pores 24
- 2/ Classifications de la porosité en fonction de la nature sédimentologique 25
- 3/ Autres termes descriptifs de la porosité 27
- 4/ Méthode d'étude de la porosité 29

Altération de la pierre en œuvre 32
Classification des altérations en œuvre 32
Relations entre microclimats d'exposition et altérations 33
L'importance de la porosité 33

Chapitre 1 : caractérisation des calcaires étudiés

L'inventaire des pierres à bâtir calcaires utilisées en région Champagne-Ardenne 35
Sélection des calcaires étudiés 42

1/ Le Calcaire à débris (Pierre de Dom-le-Mesnil et assimilées)
A/ Sites d'affleurements
1/ Cadre géographique et géologique 45

2/ Sites d'exploitations 46
3/ Répartition générale des microfaciès 47
B/ Caractérisation générale du Calcaire à débris
1/ Nature 47
2/ Caractéristiques chimiques 48
3/ Caractéristiques physiques et porosité 49
4/ Aptitudes d'emploi 50
C/ Description d'un affleurement de référence
Dom-le-Mesnil : La carrière dite de l'observatoire 52
Environnement de dépôt et cadre séquentiel 54
D/ Inventaire et caractérisation des variétés de microfaciès
1/ Généralités 55
2/ Inventaire des différents microfaciès du Calcaire à débris 55
Pierre de Jaumont, calcaire de substitution du Calcaire à débris 59
3/ Discrimination des microfaciès par analyse d'images
a/ Discrimination des microfaciès par signatures ternaires 60
b/ Analyse morphologique de la porosité 63
c/ Analyse de la variabilité du microfaciès (profil de niveaux de gris) 64
E/ Synthèse
1/ Le calcaire à débris : un calcaire poreux à petits bioclastes peu cimentés 65
2/ Paramètres contrôlant le microfaciès du calcaire 66

2/ L'Oolithe vacuolaire (Pierre de Savonnières et assimilées)
A/ Sites d'affleurements
1/ Cadre géographique et géologique 69
2/ Sites d'exploitations 70
3/ Répartition générale des microfaciès 72
B/ Caractérisation générale de l'Oolithe vacuolaire
1/ Nature 72
2/ Caractéristiques chimiques 73
3/ Caractéristiques physiques et porosité 73
4/ Aptitudes d'emploi 75
C/ Description d'un affleurement de référence
Brauvilliers : La carrière de la Fontaine 76
Environnement de dépôt et cadre séquentiel 80
D/ Inventaire et caractérisation des variétés de microfaciès
1/ Généralités 80
2/ Inventaire des différents microfaciès de l'Oolithe vacuolaire 81
3/ Discrimination des microfaciès par analyse d'images
a/ Discrimination des microfaciès par délimitation manuelle 87
b/ Discrimination des microfaciès par signatures ternaires 89
c/ Analyse de la base de la formation (signatures ternaires) 91
d/ Analyse morphologique de la porosité 93
E/ Synthèse
1/ L'Oolithe vacuolaire : un calcaire oolithique poreux peu cimenté 95
2/ Paramètres contrôlant le microfaciès du calcaire 96

3/ Le Calcaire grossier (Pierre de Courville, Calcaire à Ditrupa et autres pierres)
A/ Sites d'affleurements
1/ Cadre géographique et géologique 97

2/ Sites d'exploitations 99
3/ Répartition générale des microfaciès 100
B/ Caractérisation générale du Calcaire grossier
1/ Nature 103
2/ Caractéristiques chimiques 104
3/ Caractéristiques physiques et porosité 105
4/ Aptitudes d'emploi 106
C/ Description d'un affleurement de référence
Courville : La carrière Saint-Julien 110
Environnement de dépôt et cadre séquentiel 115
D/ Inventaire et caractérisation des variétés de microfaciès
1/ Généralités 115
2/ Inventaire des différents microfaciès de Calcaire grossier 117
3/ Discrimination des microfaciès par signatures ternaires
a/ Remarques sur la porosité du Calcaire grossier 123
b/ Discrimination des microfaciès micritiques de Courville 126
c/ Analyse des différents types de microfaciès 127
E/ Synthèse
1/ Le Calcaire grossier ou plutôt les Calcaires grossiers 130
2/ Facteurs caractéristiques du Calcaire grossier 131

4/ Autres calcaires :
A/ Pierre d'Euville et pierres assimilées
1/ Cadre géographique et géologique, sites d'exploitations 133
2/ Caractérisation des pierres à bâtir 134
B/ Autres pierres, citées à titre de comparaison
1/ Les calcaires dévoniens de l'Ardenne 140
2/ Le calcaire à entroques de Langres 141
3/ Les calcaires micritiques du Barrois 142
4/ Les calcaires oolithiques Dijonnais 143

Chapitre 2 : modes d'altération des calcaires étudiés

1/ Altération du Calcaire à débris
Généralités 147
Description des altérations
Patine 149
Desquamation 150
Désagrégation généralisée et progressive 151
Désagrégation localisée 152
Encroûtements 155
Evolution télogénétique du Calcaire à débris 158

2/ Altération de l'Oolithe vacuolaire
Généralités 161
Description des altérations
Desquamation 163
Désagrégation 165
Encroûtements 170

Recristallisation des oolithes en gypse 171
Evolution télogénétique de l'Oolithe vacuolaire 176

3/ Altération du Calcaire grossier
Généralités 179
Description des altérations
Patine 180
Desquamation 182
Désagrégation 183
Encroûtements 185
Evolution télogénétique du Calcaire grossier 188

4/ Altération de l'Entroquite de la Meuse
Généralités 192
Description des altérations
Desquamation et désagrégation associées 193
Encroûtements 195
Recristallisation superficielle 197
Evolution télogénétique de l'Entroquite de la Meuse 199

5/ Altération d'autres calcaires (cités à tire de comparaison)
Les calcaires dévoniens de l'Ardenne 201
Le calcaire à entroques de Langres 202
Les calcaires micritiques du Barrois 203
Les calcaires oolithiques dijonnais 204

Chapitre 3 : comportements télogénétiques des Pierres à bâtir

1/ Altérabilité des calcaires utilisés en Champagne-Ardenne
Importance du faciès de dépôt et du séquençage diagénétique dans l'altérabilité d'un calcaire 209
Relations entre microfaciès et altérations développées 211

2/ Notion d'altération préférentielle 217
3/ Notion de comportements télogénétiques 221
4/ Les comportements télogénétiques des principales pierres à bâtir de Champagne-Ardenne 225

Conclusions 233

Références bibliographiques 241
Table des matières 261
Liste des figures 265
Liste des tableaux 269

Annexes
Annexe 1 : Méthodes d'analyse d'images 273
Annexe 2 : Les altérations des calcaires en œuvre 287

Liste des figures

Fig. 1 Carte géologique de la Champagne-Ardenne, localisation des trois principaux calcaires étudiés. **p. 13**

Fig. 2 Auréoles sédimentaires recoupées en Champagne-Ardenne. **p. 15**

Fig. 3 Phase de liaison classiques. **p. 20**

Fig. 4 Classification de Folk (1959) *in* Flügel (1982) modifiée. **p. 22**

Fig. 5 Classification de Dunham (1962) simplifiée, relation avec le spectre textural de Folk (1962) simplifié. **p. 23**

Fig. 6 Types sédimento-diagénétiques de porosité (en noir) d'après Choquette et Pray (1970) modifié. **p. 26**

Fig. 7 Visualisation des microfaciès de référence (exemple d'un cartouche logotypique) **p. 31**

Fig. 8 Principaux groupes de calcaires utilisés pour la construction en Champagne-Ardenne. **p. 40**

Fig. 9 Localisation des anciens sites d'extraction. Calcaire à débris, Bajocien moyen. **p. 45**

Fig. 10 Porosité totale et vitesse des ondes acoustiques, Calcaire à débris, Dom-le-Mesnil. **p. 49**

Fig. 11 Aptitudes d'emploi théoriques de la Pierre de Dom, Calcaire à débris, Dom-le-Mesnil. **p. 51**

Fig. 12 Log de la carrière de l'Observatoire Dom-le-Mesnil (08) Calcaire à débris, Bajocien moyen. **p. 53**

Fig. 13 Microfaciès types du Calcaire à débris. **p. 56**

Fig. 14 Microfaciès spécial, Calcaire à débris ?, échantillon 4cm10. **p. 57**

Fig. 15 Pierre de Jaumont, pierre de substitution du Calcaire à débris. **p. 59**

Fig. 16 **a :** Discrimination par analyse d'images de 16 échantillons de Pierre de Dom (Signature ternaire moyenne) Calcaire à débris, Bajocien moyen. **p. 61**

b : Discrimination des microfaciès par analyse d'images (Signatures ternaires) Pierre de Dom. **p. 62**

Fig. 17 Morphologie de la porosité par analyse d'images, Pierre de Dom, Calcaire à débris. **p. 63**

Fig. 18 Signature ternaire d'un échantillon hétérogène par analyse d'images (image macroscopique de la lame et diagramme ternaire), Pierre de Dom, Calcaire à débris. **p. 64**

Fig. 19 Détermination de la variation verticale des microfaciès par analyse d'images. **p. 65**

Fig. 20 Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des 2 principaux microfaciès du Calcaire à débris. **p. 66**

Fig. 21 Sites d'exploitations d'Oolithe vacuolaire (carrières mentionnées dans la bibliographie). **p. 69**

Fig. 22 Localisation des sites d'échantillonnages, Oolithe vacuolaire, Tithonien inférieur. **p. 70**

Fig. 23 Aptitudes d'emploi de l'Oolithe vacuolaire, Pierre de Savonnières et de Brauvilliers. **p. 76**

Fig. 24 Log de la carrière de la Fontaine, Brauvilliers (55). Pierre de Brauvilliers, Oolithe vacuolaire, Tithonien inférieur, Affleurement 1Br. **p. 78**

Fig. 25 Carrière de la Fontaine, nom et épaisseur de diverses appellations exploitées (d'après Noël, 1970, François, 1992 et observations personnelles), Oolithe vacuolaire, Brauvilliers. **p. 79**

Fig. 26 Oolithe vacuolaire, représentation schématique du microfaciès typique (éléments figurés, phases de liaisons et phases diagénétiques. **p. 82**

Fig. 27 Oolithe vacuolaire, microfaciès totalement dolomitisé (éléments figurés, phases de liaisons et phases diagénétiques). **p. 85**

Fig. 28 Oolithe vacuolaire, microfaciès type. Pierre de Chévillon passant au microfaciès faiblement dolomitisé Microfaciès type 6a. **p. 86**

Fig. 29 **a :** Principaux microfaciès de l'Oolithe vacuolaire. Quantification des phases constituantes. **p. 87**

b : Variétés de microfaciès (Oolithe vacuolaire). Comparaison avec le microfaciès de référence. **p. 88**

Fig. 30 **a :** Signatures ternaires de 6 échantillons d'Oolithe vacuolaire (nuages de points et moyenne). **p. 90**

b : Signatures ternaires types de quelques microfaciès d'Oolithe vacuolaire. **p. 91**

Fig. 31 **a :** Position des prélèvements, site 1Sa. **p. 92**

b : Signatures ternaires des échantillons 1Sa1 à 1Sa6 (par analyse d'images). **p. 92**

Fig. 32 Oolithe vacuolaire, quantification des composants du microfaciès : Eléments, ciments et porosité, phases seuillées et transformées (ouverture puis fermeture). **p. 93**

Fig. 33 Oolithe vacuolaire, variation de la porosité selon le taux de cimentation et de dissolution. **p. 94**

Fig. 34 Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques de 3 microfaciès d'Oolithe vacuolaire. **p. 95**

Fig. 35 Sites d'exploitations et d'échantillonnages, Calcaire grossier, Lutétien moyen. **p. 97**

Fig. 36 Zones régionales du Calcaire grossier. **p. 99**

Fig. 37 Coupe simplifiée du Calcaire grossier (Région de Fisme/Reims). Unités lithologiques, épaisseurs moyennes et fossiles caractéristiques. **p. 101**

Fig. 38 Logs synthétiques du Calcaire grossier (Oise, Laonnois, Reims). Unités lithologiques, épaisseurs moyennes et fossiles particuliers. **p. 102**

Fig. 39 **a :** Caractéristiques pétrophysiques des Pierres à bâtir du Calcaire grossier : Porosité/Vitesse ondes acoustiques, d'après Blondeau, 1970. **p. 106**

b : Caractéristiques pétrophysiques des Pierres à bâtir du Calcaire grossier : Densité/Résistance écrasement, d'après Blondeau, 1970. **p. 107**

Fig. 40 Aptitudes d'emploi des différentes pierres de tailles extraites du Calcaire grossier (Lutétien moyen), d'après Blondeau, 1970, Bousquié, 1979 et Boucheret et *al.*, 1998. **p. 109**

Fig. 41 Log de la carrière de St-Julien, Courville (51). Pierre de Courville, Calcaire grossier, Lutétien moyen, Affleurement 1Co. **p. 111**

Fig. 42 Bioturbation (a) et auréole d'oxyde de fer (b), Pierre de Courville. Courville (51), Calcaire grossier, Lutétien moyen. **p. 112**

Fig. 43 Porosité des différents bancs des carrières souterraines de Courville et Romain (Fisme, région 2) d'après Blanc et *al.*, 1998. **p. 113**

Fig. 44 Représentation schématique du microfaciès type Courville 1a. **p. 117**

Fig. 45 Exemples de microfaciès du Calcaire à Ditrupa (éléments figurés et phases de liaisons). **p. 119**

Fig. 46 Représentation schématique du microfaciès type St-Leu (éléments figurés et phases de liaisons). **p. 121**

Fig. 47 **a :** Porosité du Calcaire grossier . Image et image analysée binaire non transformée. **p. 124**

b : Porosité du Calcaire grossier, image binaire transformée puis agrandie. **p. 124**

Fig. 48 **a :** Discrimination par analyse d'images des microfaciès des différents bancs de la carrière St-Julien. **p. 125**

b : Signatures ternaires moyennes des différents bancs de Courville. **p. 126**

Fig. 49 Discrimination par analyse d'images de différents microfaciès du Calcaire grossier (Nuage de points et signatures ternaires). **p. 128**

Fig. 50 Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques de 3 microfaciès de Calcaire grossier. **p. 131**

Fig. 51 Panorama de la carrière des Côtillons à Euville, d'après Lathuillière 1998 **p. 134**

Fig. 52 Histogramme de distribution des tailles d'accès aux pores (porosité bimodale) Pierres d'Euville et de Lérouville, Entroquites de la Meuse d'après Rémy, 1993. **p. 135**

Fig. 53 Aptitudes d'emploi de l'Entroquite de Commercy (Pierres d'Euville et de Lérouville). **p. 136**

Fig. 54 Entroquites de la Meuse, Pierre d'Euville (éléments figurés et phases de liaison). Microfaciès à ciment syntaxial seul ou à ciment palissadique et ciment syntaxial. **p. 137**

Fig. 55 Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des microfaciès de Pierre d'Euville. **p. 139**

Fig. 56 Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des Pierres de Givet et de Langres. **p. 140**

Fig. 57 Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques des microfaciès du Calcaire du Barrois. **p. 142**

Fig. 58 Histogrammes de distribution des tailles d'accès aux pores (micro et infraporosité unimodales). Pierre de Gudmont : Calcaire du Barrois Oolithique ou sublithographique, d'après Rémy, 1993. **p. 143**
Fig. 59 Cartouches-bilan sédimento-diagénétiques de la Pierre de Dijon. **p. 145**
Fig. 60 Importante patine superficielle à la surface d'un bloc abrité de Pierre de Dom recouvert pae une mince couche d'humus. (Dom-le-Mesnil, Ardennes). **p. 149**
Fig. 61 Variation du taux d'oxydes de fer en surface d'un bloc de Calcaire à débris. Profil de niveau de gris par analyse d'images et interprétation, Pierre de Dom. **p. 150**
Fig. 62 Etapes de l'altération privilégiée du Calcaire à débris, évolution macroscopique. **p. 151**
Fig. 63 Désagrégation progressive du Calcaire à débris (Dom-le-Mesnil). Images binaire de microfaciès, Macroporosité mesurée par analyse d'images (lumière polarisée). **p. 152**
Fig. 64 Etapes de l'altération en œuvre du Calcaire à débris, type Pierre de Dom. Influence de la porosité et du taux de cohésion granulaire de certain litages. **p. 153**
Fig. 65 Microfissuration du Calcaire à débris, position des fractures par rapport aux constituants du microfaciès **p. 154**
Fig. 66 Rapport Longueur/Largeur des particules issues de la désagrégation du Calcaire à débris (Charleville-Mézières). **p. 156**
Fig. 67 Encroûtement sulfaté, Calcaire à débris, Charleville-Mézières. **p. 157**
Fig. 68 Altération du Calcaire à débris, Evolution du microfaciès. **p. 159**
Fig. 69 Desquamation de l'Oolithe vacuolaire, dalles funéraires du XIX^{ème} siècle, Reims. **p. 164**
Fig. 70 Etapes de la désagrégation alvéolaire de l'Oolithe vacuolaire, évolution macroscopique. **p. 165**
Fig. 71 Zonation des altérations développées, Oolithe vacuolaire, mur à Châlons-en-Champagne. Evolution de la dégradation vers l'altération privilégiée (4 et 5). Alvéolisation et désagrégation. **p. 167**
Fig. 72 Microfissuration progressive de l'Oolithe vacuolaire. Position des microfissures par rapport aux éléments du microfaciès. **p. 168**
Fig. 73 Macroporosité colonisée par des micro-organismes végétaux, Oolithe vacuolaire, Bloc en œuvre en milieu rural (Savonnières-en-Perthois). **p. 170**
Fig. 74 **a :** Encroûtement sulfaté à la surface d'une desquamation, Oolithe vacuolaire, St-Dizier. **P. 171**
b : Analyse à la microsonde d'un encroûtement sulfaté, Oolithe vacuolaire (St-Dizier). **p. 172**
Fig. 75 **a :** Recristallisation d'une Oolithe en gypse, Oolithe vacuolaire, Microfaciès 6a, Reims. **p. 173**
b : Stades de la recristallisation d'une Oolithe en gypse, apparition de macropores secondaires, Oolithe vacuolaire **p. 173**
Fig. 76 Modèles d'altération de calcaires oolithiques selon Schiavon, 1992. **p. 175**
Fig. 77 Altération de l'Oolithe vacuolaire, Evolution du microfaciès. **p. 176**
Fig. 78 Décollement superficiel (desquamation), Calcaire grossier (faciès micritique), Eglise St-André, Reims (51). **p. 182**
Fig. 79 Etapes de la desquamation du tuffeau de Touraine d'après Rautureau et *al.*, 1999. **p. 183**
Fig. 80 Microfissuration du Calcaire grossier (microfaciès Type 1c), Organisation et orientation des microfractures. **p. 184**
Fig. 81 Morphologies macroscopiques de l'altération en œuvre des différents types de Calcaire grossier. **p. 185**
Fig. 82 Encroûtement sulfaté avec recristallisation, Calcaire grossier, Reims. **p. 186**
Fig. 83 Encroûtement sulfaté, Calcaire grossier, Reims. **p. 187**
Fig. 84 Relation complexes entre microfaciès et les principales altérations développées en œuvre, Calcaire grossier, Lutétien moyen. **p. 188**

Fig. 85 Altération d'un soubassement en Pierre d'Euville, Entroquite de la Meuse, Reims. Désagrégation progressive de la surface et la légère desquamation. **p. 194**
Fig. 86 Microfissuration progressive de la Pierre d'Euville, Entroquite de la Meuse. **p. 195**
Fig. 87 Encroûtement sulfaté, Entroquite de la Meuse, Pierre d'Euville, Eglise St-André, Reims. **p. 196**
Fig. 88 Encroûtement sulfaté, Entroquite de la Meuse, Pierre d'Euville, Reims. **p. 197**
Fig. 89 Processus de formation de la couche claire de gypse, sous-jacente à la croûte noire superficielle D'après Vergès-Belmin et *al.*, 1991. **p. 198**
Fig. 90 Altération de l'Entroquite de la Meuse, Pierre d'Euville, évolution du microfaciès. **p. 199**
Fig. 91 Caractérisation des Pierres à bâtir utilisées en Champagne-Ardenne (microfaciès de référence). **p. 213**
Fig. 92 Aptitudes d'emploi théoriques des principales pierres de taille étudiées. **p. 214**
Fig. 93 Principales altérations des pierres de taille utilisées en Champagne-Ardenne. **p. 216**
Fig. 94 Durabilité d'une roche en œuvre, balance entre agressivité du milieu et résistance de la pierre. **p. 221**
Fig. 95 Durabilité d'une roche en œuvre, balance entre agressivité du milieu et résistance de la pierre : Cas d'une roche ou d'un ensemble architectural hétérogène. **p. 222**
Fig. 96 Comportements télogénétiques théoriques d'une roche en œuvre. **p. 223**
Fig. 97 Exemples de fréquences d'observation des comportements télogénétiques d'une pierre de taille, relation avec sa durabilité générale. **p. 225**
Fig. 98 Comportements télogénétiques du Calcaire à débris. **p. 226**
Fig. 99 Comportements télogénétiques de l'Oolithe vacuolaire. **p. 227**
Fig. 100 Comportements télogénétiques du Liais de Courville. **p. 228**
Fig. 101 Comportements télogénétiques de l'Entroquite de la Meuse. **p. 230**

Fig. A1 Hétérogénéités du fond d'acquisition en microscopie optique. **p. 277**
Fig. A2 Variation de l'épaisseur d'une lame mince apparemment homogène et influence sur le niveau de gris. **p. 278**
Fig. A3 Image binaire modifiée par une opération de fermeture **p. 279**
Fig. A4 Seuillage, mesure et représentation graphique sur un diagramme ternaire **p. 280**
Fig. A5 Signature ternaire d'un échantillon **p. 281**
Fig. A6 Comparaison de signatures ternaires **p. 282**
Fig. A7 Variations dans une image laminaire homogène **p. 283**
Fig. A8 Variations dans un « sédiment » laminaire hétérogène **p. 284**
Fig. A9 Comparaison des profils de niveaux de gris obtenus par mesure directe et par analyse d'images **p. 285**
Fig. A10 Principales positions de mise en œuvre des différentes pierres à bâtir calcaires utilisées à Reims **p. 302**

Fig. PA1 à PA3 Principaux microfaciès du Calcaire à débris **planche A**
Fig. PA4 Microfaciès de la Pierre de Jaumont **planche A**
Fig. PA5 à PA8 Principaux microfaciès du Calcaire grossier **planche A**
Fig. PB1 à PB8 Principaux microfaciès de l'Oolithe vacuolaire **planche B**
Fig. PC1 à PC4 Principales altérations en œuvre du Calcaire à débris **planche C**
Fig. PD1 à PD4 Exemples de morphologies de désagrégation (généralisées ou alvéolaires) **planche D**
Fig. PE1 à PE4 Principales altérations en œuvre du Calcaire grossier **planche E**
Fig. PF1 à PD8 Autres exemples d'altération en œuvre (calcaires cités à titre de complément) **planche F**
Fig. PG1 à PD8 Evolution microscopique des calcaires en œuvre **planche G**

Liste des tableaux

Tab. 1	Classe de porosité selon différents auteurs et seuils retenus pour cette étude	**p. 24**
Tab. 2	Analyse géochimique du Calcaire à débris, d'après Renard et Richebois, 1983	**p. 48**
Tab. 3	Calcimétrie (Calcaire à débris, d'après Carion et *al.*., 1999)	**p. 48**
Tab. 4	Analyse de petits échantillons de Calcaire à débris, Carion et *al.*,1999	**p. 49**
Tab. 5	Prise en eau par capillarité d'après Bousquié, 1979 et Carion et *al.*, 1999	**p. 50**
Tab. 6	Aptitudes d'emploi supposées de la Pierre de Dom (Calcaire à débris)	**p. 51**
Tab. 7	Analyse chimique en fluorescence X, d'après Bousquié, 1979	**p. 73**
Tab. 8	**a :** Caractéristiques pétrophysiques de la Pierre de Savonnières, d'après Noël (1970)	**p. 73**
	b : Caractéristiques pétrophysique de la Pierre de Brauvilliers, d'après Noël (1970)	**p. 74**
	c : Caractéristiques pétrophysiques de l'Oolithe vacuolaire, d'après Bousquié (1979)	**p. 74**
	d : Caractéristiques pétrophysiques de l'Oolithe vacuolaire, d'après Rocamat (1996)	**p. 74**
Tab. 9	Aptitudes d'emploi de l'Oolithe vacuolaire	**p. 75**
Tab. 10	Composition du microfaciès de référence de l'Oolithe vacuolaire (type 1a)	**p. 96**
Tab. 11	Pierre de Courville (Calcimétrie d'après Boucheret et *al.*, 1998)	**p. 105**
Tab. 12	Pourcentage de $CaCo_3$ (calcimétrie) des différentes zones « biostratigraphiques » du Lutétien. Affleurement de la feuille 1/50 000ème de Craonne (Aisne), d'après Daubenfeld, 1967	**p. 105**
Tab. 13	Caractéristiques pétrophysiques de 4 Pierre du Calcaire grossier d'après Blondeau, 1970, Bousquié, 1979 et Boucheret et *al.*, 1998 (Moyennes)	**p. 106**
Tab. 14	Prise en eau par capillarité d'après Bousquié, 1979 et Boucheret et *al.*, 1998 (Moyennes)	**p. 107**
Tab. 15	Porosité totale des différents bancs de Courville, relation avec le caractère micritique de la matrice (Ecart de valeurs et moyennes)	**p. 127**
Tab. 16	Caractéristiques pétrophysiques des Entroquites de la Meuse, d'après Noël, 1970 ; Bousquié, 1979 et Rémy, 1993.	**p. 135**
Tab. 17	Prise en eau par capillarité d'après Bousquié, 1979 et Rémy, 1993.	**p. 136**
Tab. 18	Aptitudes d'emploi de l'Euville roche et de l'Euville marbrier (Noël, 1970).	**p. 137**
Tab. 19	Caractéristiques du Calcaire à débris qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 160**
Tab. 20	Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.	**p. 160**
Tab. 21	Caractéristiques de l'Oolithe vacuolaire qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 178**
Tab. 22	Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.	**p. 178**
Tab. 23	Caractéristiques du Calcaire grossier qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 189**
Tab. 24	Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.	**p. 190**
Tab. 25	Morphologie des altérations desquamation/désagrégation sur la Pierre d'Euville.	**p. 192**
Tab. 26	Caractéristiques de la Pierre d'Euville qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 200**
Tab. 27	Altérabilité différentielle et spécifique des différents composants du microfaciès.	**p. 200**
Tab. 28	Caractéristiques des Calcaires givétiens qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 202**
Tab. 29	Caractéristiques de la Pierre de Langres qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 203**
Tab. 30	Caractéristiques des Calcaires du Barrois qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 204**
Tab. 31	Caractéristiques de la Pierre de Dijon qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 206**
Tab. 32	Caractéristiques propre au calcaire qui conditionnent son comportement en œuvre.	**p. 210**

Tab. 33 Fréquence d'observation des différentes altérations en œuvre sur les Pierres à bâtir Utilisées en Champagne-Ardenne. **p.217**

Tab. 34 Liste de principales altérations observées sur les Pierre à bâtir de Champagne-Ardenne. **p.218**

Tab. 35 Répartition des altérations observées sur les Pierre à bâtir de Champagne-Ardenne. **p.219**

Tab. 36 Comportements télogénétiques d'une roche en œuvre. **p.224**

ANNEXES :

- 1/ Méthodes d'analyse d'images
- 2/ Les altérations des calcaires en œuvre

Annexe 1 : Méthodes d'analyse d'images :

Cette annexe ne traitera que des méthodes d'analyses d'images utilisées durant ce travail. Les méthodes d'analyses mathématiques des contours ou d'éléments par morphologie ou transformations ne seront pas détaillées : filtres morphologiques (ouvertures, fermetures, dilatations, érosions…), calcul par distance géodésique et reconstruction, segmentation d'image (squelettisation, watershed), etc… Pour plus de détails sur l'utilité et le fonctionnement de ces outils très performant se reporter aux différents ouvrages de référence (Serra, 1982 ; Exner et Hougardy, 1988 ; Coster et Chermant, 1989 ; Russ, 1990 ; Voiron, 1995…).

Dans cette étude, l'analyse d'images a principalement été utilisée comme un outil à part entière, dans le but d'améliorer la caractérisation des microfaciès. **En effet, la quantification ou la semi-quantification de phases par analyse d'images comble un grand défaut des analyses sédimento-diagénétiques de microfaciès** : leur relative subjectivité et leur manque de transparence pour des non spécialistes (importance de l'interprétation de l'opérateur, grande diversité dans les types d'éléments ou dans les phénomènes observés, utilisation pour les descriptions de terminologies très spécifiques…).

Pour cela, nous avons procédé à l'analyse d'un grand nombre d'images numérisées et enregistrées : qui contient une partie des images réunies durant cette thèse. Nous avons aussi effectué de très nombreux traitements sans enregistrement d'image, ne sauvegardant que le résultat de l'analyse afin de compléter la description du microfaciès de l'échantillon : plus de 100 lames minces ont été étudiées selon cette méthode avec entre 25 et 50 mesures par lames.

Les mesures d'objets ou de phases ont été effectuées à l'aide d'une suite logicielle développée par Microvisions Instruments®, elle intègre des programmes d'archivages d'images ou d'analyses statistiques des résultats. Cette suite logicielle est l'équivalent d'autres programmes comme AnalySIS® de Soft imaging system™ ou APHELION© de ADCIS™. Ces logiciels permettent tous un traitement immédiat de l'image et leur interface extrêmement simple autorise leur utilisation en routine.

Dans notre cas, **Saisam©** permet l'acquisition et l'archivage rapide des images ainsi que la mesure d'éléments ou de surfaces définies par l'utilisateur. **Aréas©** effectue le calcul du pourcentage représenté par une fraction de l'image, chaque phase est définie par le seuillage de l'image à partir de son profil de niveaux de gris (permet le multi-seuillage de 1 à 6 phases). **Granix©** et **Ellix©** effectuent la mesure automatique de formes simples comme la taille de grains ou de pores ainsi que la séparation d'objets. Enfin, **Candela©** calcule l'indice optique moyen ou le niveau de gris d'une surface définie par l'utilisateur.

Les traitements graphiques (graphiques ternaires) ou statistiques (univariés ou multivariés) ont été réalisés à partir des données obtenues par les logiciels de la suite Microvisions Instruments™. Pour cela nous avons utilisé des logiciels de traitement de banques de données : Excel® (Microsoft™), Deltagraph pro 3.5© (Deltapoint™), Statlab© (Slp Infoware™) ou Statistica® (Statsoft™) et des logiciels de dessin vectoriels : Canvas 5.03© de Deneba Systems™ et Corel Draw® 8.0 de Corel™.

Les méthodes d'analyse d'image, utilisées peuvent se regrouper en trois catégories :

❶- Les quantifications de surfaces par tracés manuels (logiciels Saisam) ou par seuillage de l'image et calcul automatique des pourcentages de phases (logiciel Aréas). Les résultats chiffrés de cette catégorie d'analyses ont une valeur quantitative (Götze et Magnus, 1997 ; Ruffini *et al.*, 1999).

❷- Les discriminations de microfaciès par multi-seuillages et détermination de la signature ternaire de l'échantillon (logiciel Aréas). Les valeurs obtenues composent des nuages de points dans un diagramme triangulaire, elles ont une valeur semi-quantitative et/ou un but descriptif.

❸- Les profils de niveaux de gris (Candela ou Aréas) par construction d'une courbe de variation du pourcentage de variation d'une phase seuillée selon une direction. Suivant les phénomènes mesurés, les valeurs ont une signification quantitative ou semi-quantitative, voire même indicative. D'autres types de profils peuvent être réalisés grâce au logiciel Candéla en mesurant les variations du niveau de gris moyen selon une direction, afin de mettre en évidence des variations de luminosité.

Ces trois techniques d'analyse d'images très différentes par leur méthodes et par les résultats obtenus, sont complémentaires. Elles seront appliquées pour répondre des objectifs précis : ❶ quantification d'un paramètre ou d'une phase, ❷ caractérisation objective de la roche dans sa totalité (à des fins de comparaison avec un autre échantillon) ou ❸ mise en évidence d'une évolution de couleur suivant une direction.

Acquisition d'images :

Matériel utilisé :

Le matériel utilisé pour obtenir les données vidéo se compose d'une caméra Tri CCD couleur Sony DXC-930P (720 lignes TV horizontales, 752 * 582 éléments actifs) montée sur optique Olympus pour s'adapter aux microscopes et d'une caméra noir et blanc CCD (Cohu 4912/5100) sur rampe réglable pour les prises de vue macroscopiques. La caméra couleur est reliée à un boîtier de réglage des paramètres d'acquisition vidéo : gain, luminosité, balance des couleurs, temps d'acquisition : de 1/25ème de seconde par saisie à 1/250, 1/500 ou 1/1000ème de seconde pour les images trop lumineuses…

La caméra Tri CCD couleur utilisée autorise l'empilage d'images (empileur MSP 930P) et leur superposition en cas de faible luminosité (images de fluorescence ou de cathodoluminescence par exemple). Même si cette opération entraîne une perte sensible dans la définition de l'image. En effet, la durée normale d'une saisie d'image d'1/56ème de seconde ne permet pas d'obtenir une image nette des zonations de luminescence. En photographie, l'empilage d'images correspond donc à l'augmentation du temps de pause pour des sujets sous exposés. Pour refroidir la caméra et éviter les parasites qui apparaissent après de longues périodes d'utilisation ou des empilements d'images de plus de 30 secondes, un refroidisseur à air (SP-713 A) est relié à la caméra Tri CCD. Le flux d'air froid circulant sur les capteurs de la caméra Tri CCD « dilue » les parasites lumineux dans un fond de ton noir (Holst, 1998), ce qui améliore très nettement les longues acquisitions d'images (empilement de 100 images et plus).

Calibrage de l'appareillage et homogénéisation des mesures :

Pour que des analyses soient comparables, il faut que les mesures soient réalisées dans des conditions d'expérimentations semblables et selon un protocole identique. Ces règles de base, mais elles sont malheureusement encore rarement appliquées à l'analyse d'images, ce qui conduit à travailler sur des données faussées. Nous avons élaboré des protocoles de travail rigoureux avec, avant chaque séance de travail, la vérification systématique des conditions et des paramètres d'acquisition des images. Nous avons aussi calibré nos appareils en vérifiant le degré d'homogénéité des mesures ainsi que leur validité : reproductibilité des mesures dans le temps, analyse d'échantillons identiques ou d'un lot dont les numéros d'identification ont été préalablement dissimulés…

Calibrage de l'éclairage :

L'élimination des fluctuations de la source lumineuse est plus simple en microscopie optique que pour les prises d'images en extérieur : affleurements ou paysages. Pourtant, l'intensité lumineuse enregistrée peut être soumise à deux types de fluctuations : des variations au cours du temps et des variations spatiales.

- Variation de l'intensité lumineuse au cours du temps :

Deux phénomènes peuvent modifier l'intensité lumineuse dans le temps et cela pour un même objet : soit ① des variations dans la lumière émise par la source lumineuse, soit ② des variations de sensibilité optique de l'appareil enregistrant les données.

① : La variation de l'intensité de la source lumineuse au cours du temps est significative dans deux cas : les acquisitions d'images par transmission de lumière polarisée (ou polarisée-analysée) et celles sous luminescence . Dans le premier cas, la source lumineuse est stable et les réglages de luminosité du micros-

cope permettent d'obtenir une intensité sans variations significatives au cours du temps. Un problème beaucoup plus important apparaît pour les observations sous luminescence (fluorescence ou cathodoluminescence). En effet, l'intensité de la lumière reçue varie très fortement au cours du temps. Pour la fluorescence, l'intensité a tendance à décroître au cours du temps, dans certains cas, cette diminution peut être suffisamment importante pour être significative : plus de 5% de différence. Pour la cathodoluminescence, les variations d'intensités sont encore plus importantes et ceci indépendamment de l'appareillage utilisé. L'analyse « quantitative » d'images de cathodoluminescence dans un but de comparaison entre échantillons devra donc être réalisée avec prudence !

Ainsi, dans cette étude, nous considérerons que :

- Les acquisitions sous lumière transmise seront significativement comparables entre elles (si les modes d'acquisitions sont identiques).

- Les analyses d'images sous épifluorescence pourront être comparées si des précautions supplémentaires sont prises : comme par exemple, l'utilisation d'un échantillon de référence (intensité de fluorescence connue), afin de détecter si les conditions d'acquisitions sont toujours homogènes.

- La « quantification » d'images de cathodoluminescence (dans le but de comparer les intensités lumineuses), ne devra être réaliser que dans des cas ponctuels : pour un même échantillon au même moment. En effet, les conditions de travail dans ce mode d'expérimentation rendent difficiles l'utilisation d'un échantillon témoin de référence. Le mode opératoire ne permet donc pas de comparer quantitativement les luminescences et rend de telles mesures non significatives.

② Le problème de la qualité des senseurs de la caméra Tri CCD au cours du temps est connu et mesuré (Holst, 1998 ; Lebrun et al. 1999). Il apparaît en effet que la sensibilité optique de ces caméra varie dans le temps selon une courbe globalement asymptotique. Pour obtenir des mesures réellement homogènes, il faut donc procéder en tenant compte d'un temps de « stabilisation » de la caméra. Pour certains modèles, le laps de temps pour obtenir une réelle stabilité est d'environ 2 heures ; dans notre cas, les fluctuations sont rapidement non significatives et on peut considérer qu'un temps de stabilisation de 10 minutes garantit l'homogénéité de la saisie optique.

- Variation de l'intensité lumineuse dans le champ mesuré :

Ici encore deux phénomènes principaux peuvent modifier l'intensité d'un champ lumineux. Il peut en effet s'agir, soit ① d'hétérogénéités dans le fond lumineux et dans la lumière émise, soit ② de variations dans la transmission de la lumière durant son trajet, et en particulier en fonction de l'épaisseur de la lame mince.

① : nous avons testé la qualité de l'image de fond dont l'intensité lumineuse doit être relativement homogène. Dans certains cas d'étude macroscopique, une lumière apparemment homogène peut présenter

des variations de fond de l'ordre de 15 niveaux de gris et fausser totalement la mesure (Holst, 1998). Dans le cas d'une étude microscopique, l'utilisation d'une lentille correctrice et de plan de polarisation permet de réduire la diffusion lumineuse. De plus, l'étude préalable de l'homogénéité du champ lumineux permet de sélectionner les réglages appropriés (condensateur de lumière) et les objectifs optiques adéquats. Cette procédure de calibration de l'image souligne l'importance de la lentille condensatrice et conduit à déconseiller l'utilisation des objectifs de faible grossissement 12.5, 20 dont les bordures de champs présentent une diminution significative de la luminosité (Fig A1).

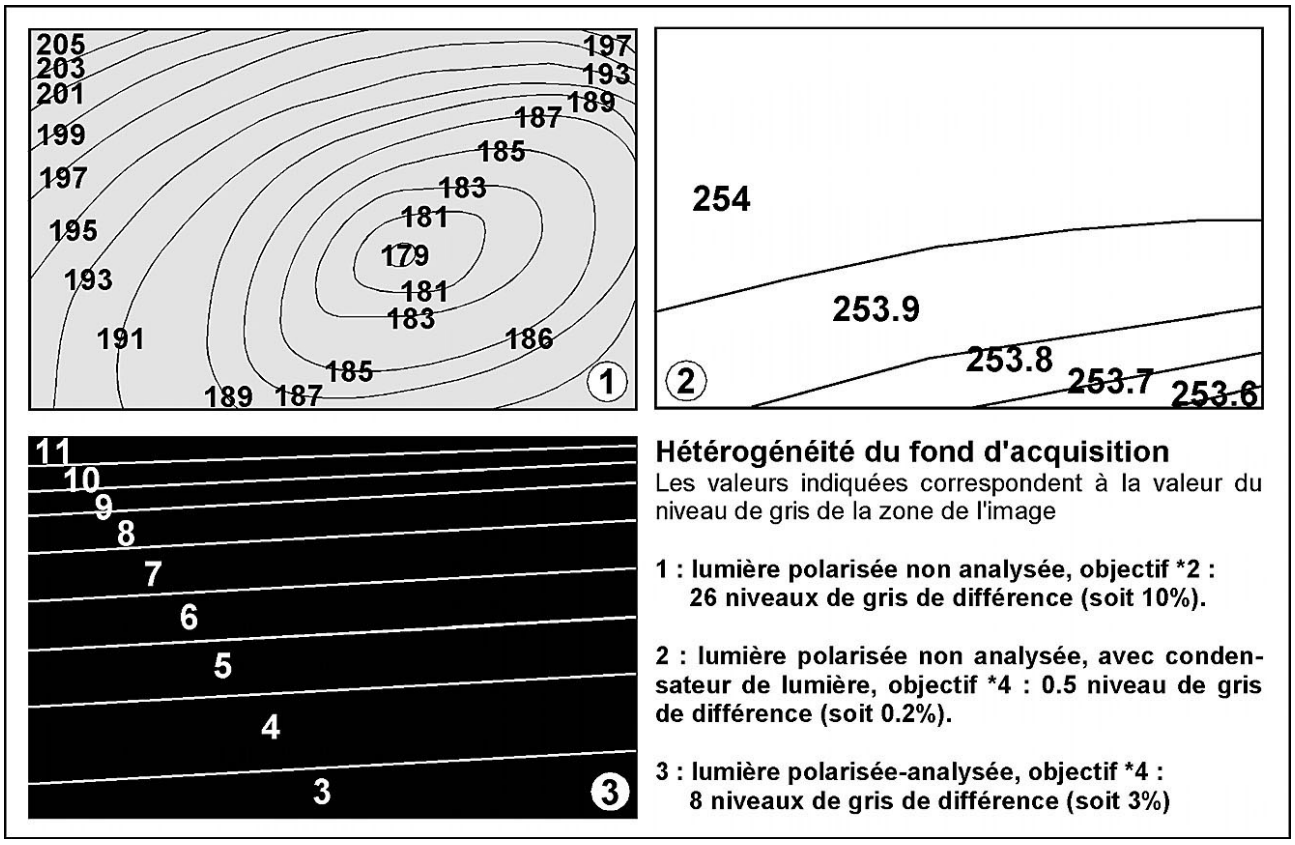


Figure n°A1 : hétérogénéité du fond d'acquisition en microscopie optique

De la même façon, les saisies en luminescence ou en lumière polarisée analysée ont été calibrées afin d'obtenir un fond d'image homogène. Le problème peut se poser principalement en cathodoluminescence car le canon à électrons induisant la luminescence est oblique par rapport à la lame mince : dans les champs d'observation des petits grossissements du microscope, la luminescence peut donc être hétérogène.

Ainsi, durant cette étude, nous avons préféré tester nos appareils et sélectionner les options qui ne paraissent pas induire d'erreurs significatives, plutôt que d'appliquer des corrections des valeurs de références (background correction : calculée ou intégrée au logiciel).

② : l'état de surface et l'épaisseur de confection des lames minces peuvent aussi induire une modification significative du signal. D'après nos observations, les hétérogénéités de polissage pourront être détectée à l'œil nu et un nouveau polissage pourra y remédier. Par contre, la variation de l'épaisseur de la lame peut induire d'importantes variations de luminosité et donc de niveaux de gris (Fig A2). Ainsi, pour les observations en lumière transmise, les mesures réalisées dans le but de discriminer des échantillons doivent être effectuées sur des sections d'épaisseur comparables. Quand la lame a une épaisseur visiblement hétérogène, il vaut mieux limiter le champ mesuré à la partie centrale de la lame, en évitant de réaliser des mesures sur les zones trop peu épaisses comme en bordure de la lame mince.

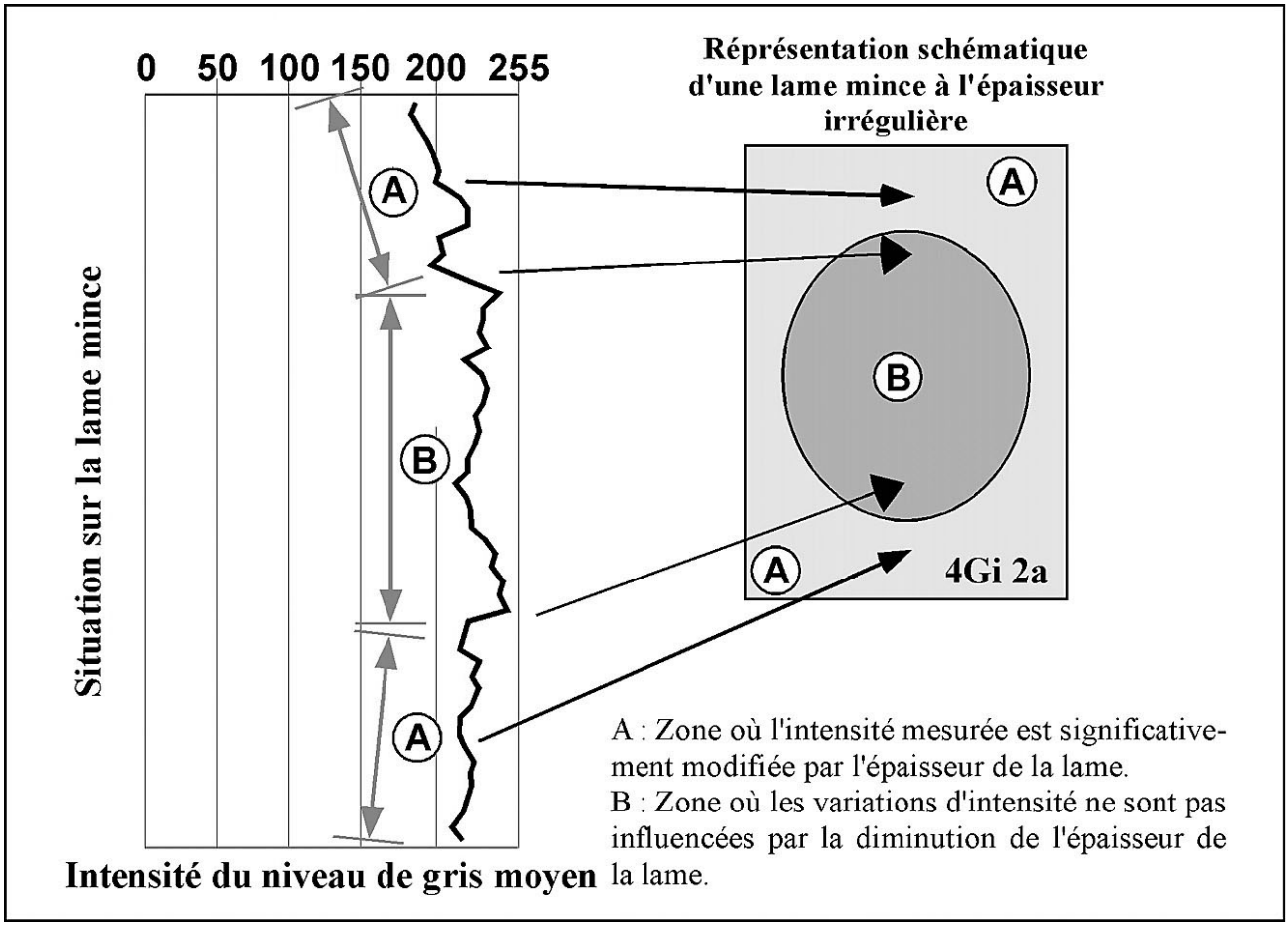


Figure n°A2 : variations de l'épaisseur d'une lame mince (apparement homogène) et influence significative sur l'intensité de niveau de gris.

Lors de cette étude, nous avons remarqué que les variations d'épaisseur qui n'ont pas été détectées, seules les plus grossières sont facilement perceptibles, induisent pourtant une augmentation progressive de la luminosité. Elles affectent les mesures en routine en décalant progressivement la signature ternaire de l'échantillon vers le pôle Phase claire, voir « 2/ Multiseuillage et signature ternaire ». Pourtant, il apparaît

que dans la plupart des cas, 75 à 90% de la surface de l'échantillon à une épaisseur constante, ce qui est largement suffisant pour effectuer 40 ou 50 mesures.

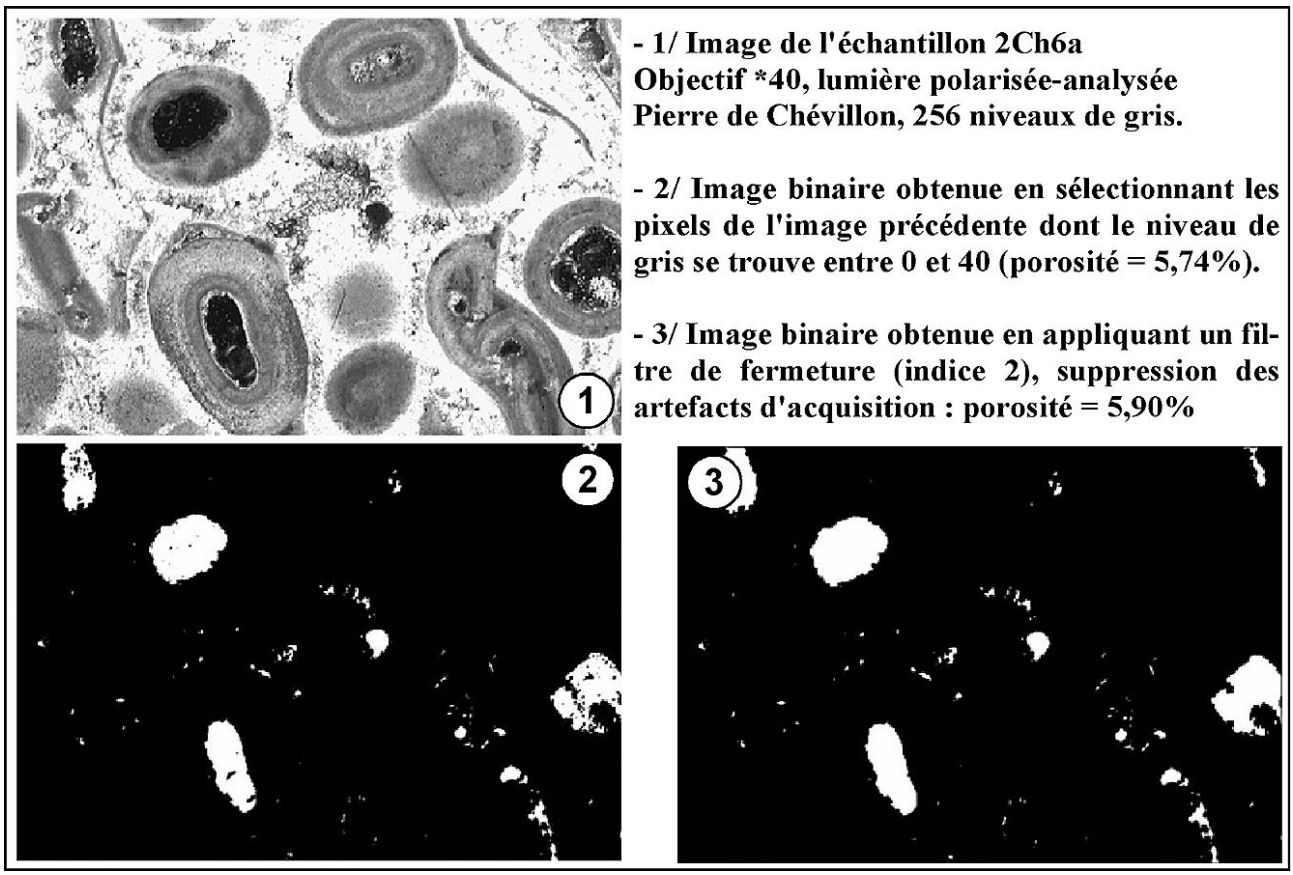


Figure n°A3 : Image binaire modifiée par une opération de fermeture.

1/ Seuillage simple et mesure d'une phase :

Seuillage d'un histogramme de niveaux de gris :

Dans un premier temps, les images acquises par les caméras seront traduites en niveaux de gris (de 0 : noir à 255 : blanc). Généralement il s'agit d'une image RVB (rouge, vert, bleu) dont les informations couleur sont supprimées, mais parfois il peut être intéressant de travailler sur une seule couleur : par exemple l'étude de la porosité d'une lame mince réalisée avec une résine bleue donnera de meilleurs résultats si cette couleur est individualisée. L'image en noir et blanc est en fait composée de 256 niveaux de gris ; elle peut alors être traduite en un histogramme de ces niveaux (cf. Fig A4). La partie intéressant l'opérateur sera alors sélectionnée par un seuillage de cet histogramme : la porosité d'une image acquise sous lumière polarisée-analysée sera comprise entre les niveaux de gris 0 à 60. Quand l'opérateur a un doute sur les seuils qu'il doit placer, il peut afin de rester objectif, sélectionner manuellement des zones qui l'intéressent et faire calculer par l'ordinateur les niveaux de gris contenus dans ces objets.

Quantification d'une phase et transformations de l'image :

Les seuils fixés, le logiciel calcule la fraction de l'image se situant dans la plage sélectionnée et exprime le résultat en pourcentage de pixels (et donc de surface). L'opérateur peut aussi observer ce seuillage sous la forme d'une image binaire qu'il peut retravailler en lui appliquant de transformations mathématiques : fermeture par exemple (Fig A3). Cette méthode d'analyse est très utilisée pour mesurer et caractériser la porosité des roches réservoirs (Erlich *et al.*, 1984 ; Ferm *et al.*, 1993, Anselmetti *et al.*, 1998 ; Belin *et al.*, 1999).

2 / Multi-seuillage et signature ternaire :

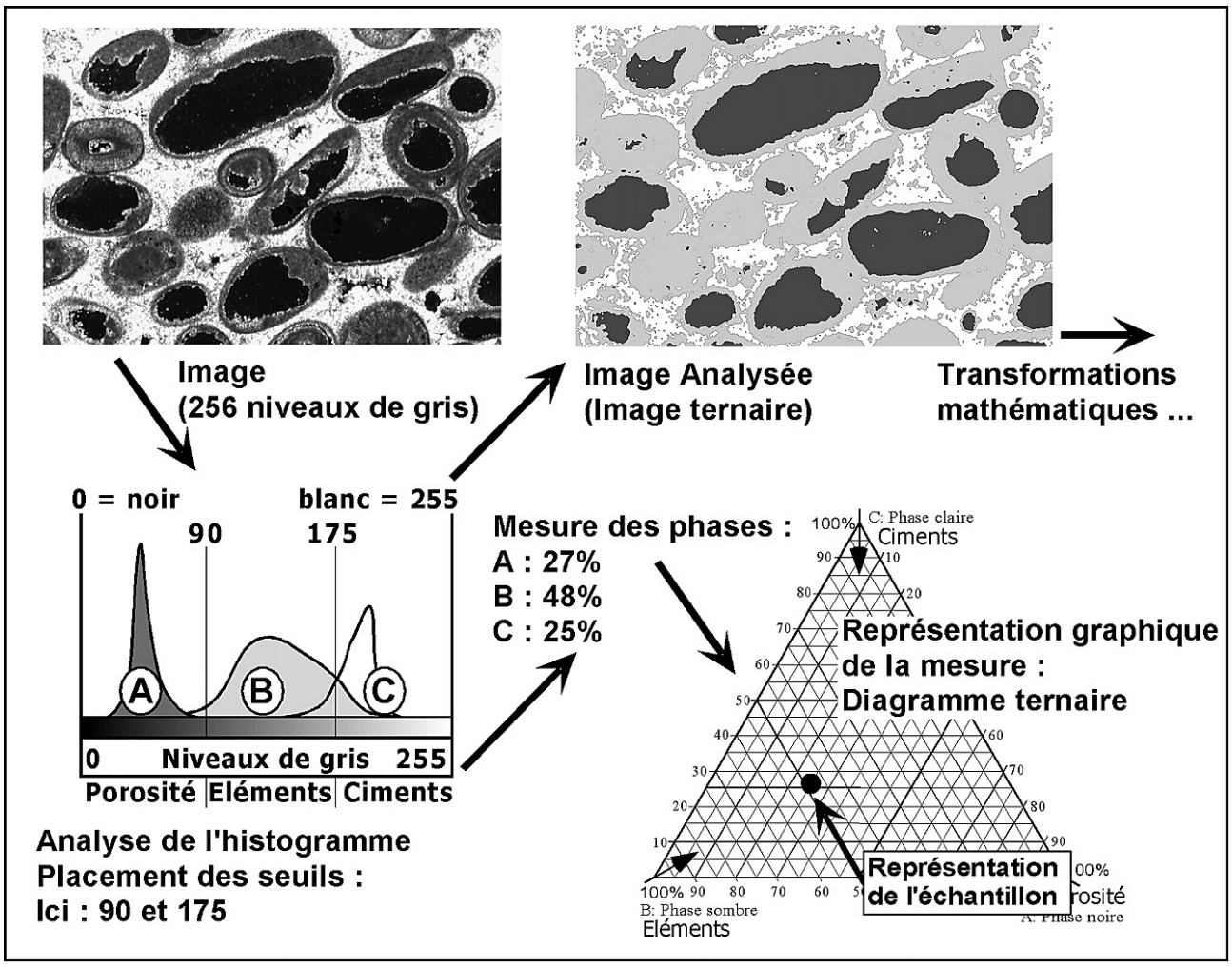


Figure n°A4 : Seuillage, mesure et représentation graphique sur diagramme ternaire

Le principe de base du multi-seuillage est le même que celui expliqué précédemment, la seule différence est que le nombre de phases mesurées est supérieur à deux. Dans la pratique, il est généralement suffisant de discriminer 3 ou 4 phases… En plaçant deux seuils sur l'histogramme des niveaux de gris, nous séparons l'image en trois phases : la première globalement noire, la seconde dans les tons sombres et

la dernière regroupant les pixels clairs. Cette discrimination permet d'obtenir 3 valeurs (exprimée en pourcentage) dont la somme est égale à 100 et elle autorise donc une représentation graphique sous la forme de diagramme ternaire (Fig A4). Ce type de représentation est rarement utilisé en analyse d'images, mais il semble particulièrement précis pour caractériser et discriminer des échantillons (Bruno *et al.*, 1999 ; Fronteau *et al.*, 1999).

De plus, l'utilisation de cette technique doit se faire en limitant l'étude à une famille de microfaciès ou à un groupe d'échantillon que l'on veut discriminer. En effet, pour affiner les résultats, les paramètres d'acquisition des images et la méthodologie de travail doivent être adaptés pour chaque grand type de microfaciès. Par exemple :

- les calcaires grenus à ciment sparitique et à forte macroporosité (type Savonnières ou Euville) se prêtent bien à une analyse en lumière polarisée-analysée avec lentille de condensation de la lumière ;

- les microfaciès contenant beaucoup de grains de quartz et dont la proportion de ces grains est utilisée dans le but de discriminer les échantillons doivent être étudiés sous lumière « naturelle » (afin d'éviter l'extinction d'une partie des grains de quartz).

- l'utilisation de résines colorées (bleues) améliore la discrimination des microfaciès à forte macroporosité. Mais, sans protocole d'induration sous vide, ces résines pénètrent mal dans les infra ou les micropores, ce qui fausse les analyses des microfaciès à forte microporosité (à matrice micritique).

- la présence d'oxydes et d'hydroxydes de fer complique fortement les analyses car ils obscurcissent la phase qui les contient et décalent son niveau de gris vers le noir. Ainsi pour la Pierre de Dom, les oxydes de fer tapissent une partie des pores et imprègnent certains éléments. En lumière polarisée-analysée, ils seront donc confondus avec la phase noire typique de la porosité ; alors qu'en lumière naturelle, ils obscurciront les éléments déplaçant « artificiellement » le niveau de gris de ces particules vers les tons sombres.

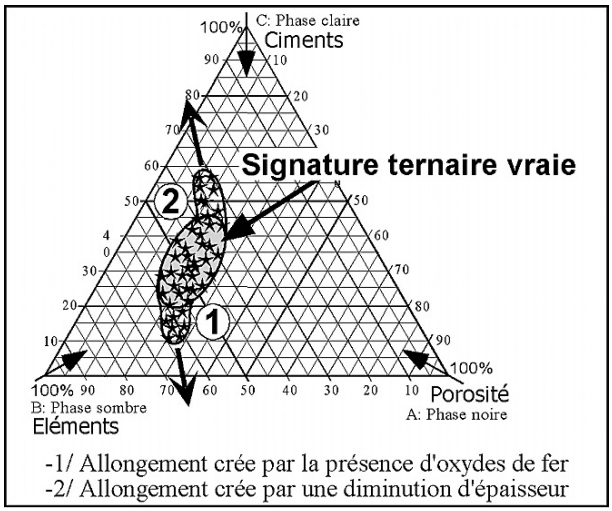


Figure n°A5 : Signature ternaire d'un échantillon

La caractérisation d'un échantillon par multi-seuillage se fait donc en plusieurs étapes :

- **Analyse préliminaire** du microfaciès afin de déterminer le plus approprié : type de lumière (naturelle ou polarisée – analysée), sélection du meilleur objectif (20, 40, 100), utilisation de résine colorée… Cette étude doit avoir pour but de comprendre la morphologie de l'histogramme de niveaux de gris (nature

des seuils les plus apparents) et de déterminer les éléments ou les phases diagénétiques qui ont une réelle importance pour discriminer les microfaciès d'un même type.

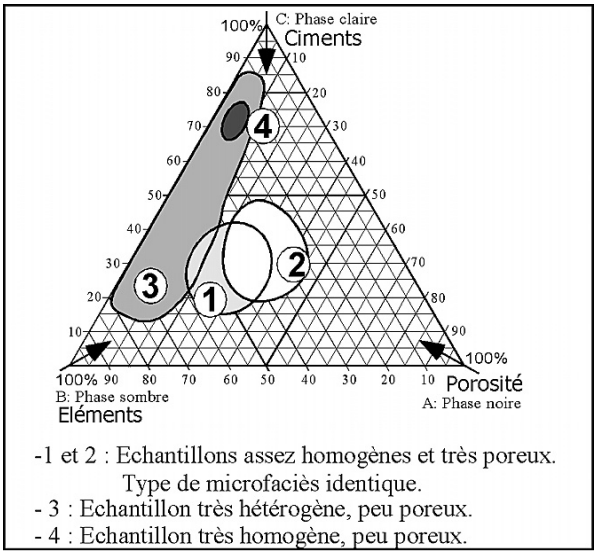
- **Détermination des seuils** utilisés pour analyser les images de ce type de microfaciès.

- Seuillage de quelques images tests. **Validation des seuils** ou modifications de ceux-ci.

- Détermination de la signature ternaire de quelques échantillons (en effectuant entre 25 et 50 mesures par lame selon la surface de la zone à épaisseur constante, Fig. A5). Vérification de la justesse de la mesure : les échantillons du même type doivent avoir une signature ternaire comparable, des échantillons très différents doivent répondre différemment. **Validation du mode opératoire**.

- Début des **mesures en routine** sans changer les paramètres d'acquisition ou les seuils d'analyse. Enregistrement des données pour chaque échantillon. Utilisation ponctuelle d'un échantillon témoin : au microfaciès très homogène, pour vérifier l'homogénéité de la prise de mesure.

- **Traitement graphique ou statistique** des données en utilisant soit la signature ternaire moyenne, soit la totalité des données ou encore la morphologie du nuage de points dans un diagramme ternaire (Fig. A6).



-1 et 2 : Echantillons assez homogènes et très poreux. Type de microfaciès identique.
- 3 : Echantillon très hétérogène, peu poreux.
- 4 : Echantillon très homogène, peu poreux.

Figure n°A6 : Comparaison de signatures ternaires

Les **Signatures ternaires** déterminées par cette méthode seront utilisées pour :

- La **Caractérisation** d'un microfaciès « simple », les valeurs mesurées auront une valeur semi-quantitative à quantitative selon la roche étudiée. Par exemple pour la Pierre de Savonnières, la porosité mesurée en routine est significativement comparable à la macroporosité mesurée par porosimétrie mercure.

- La **Discrimination** objective des microfaciès d'une même formation. Suivant les microfaciès cette utilisation aura une valeur semi-quantitative à indicative.

- La **Matérialisation** graphique des variations pétrographiques d'origine soit sédimentologique, soit diagénétique : colmatage de la porosité par un sédiment interne ou par une phase de cimentation (Oolithe vacuolaire), augmentation du taux de quartz (Calcaire grossier), enrichissement en oxydes de fer (Calcaire à débris)…

3 / Profils de niveaux de gris

Le but de cette méthode d'analyse d'images est d'estimer la variation spatiale d'un paramètre constitutif du calcaire :

- changement de couleur : décoloration, enrichissement en oxydes de fer, encroûtement…

- variation sédimento-diagénétique : augmentation du taux de grains de quartz, évolution de la nature de la phase de liaison (passage progressif d'une micrite matricielle à un ciment sparitique).

La matérialisation de cette variation spatiale peut s'effectuer selon deux méthodes :

- ①/ En mesurant le niveau de gris moyen d'une suite de points placés le long d'une ligne orientée dans la direction de la variation de couleur ou de luminosité.

- ②/ En procédant dans un premier temps au calcul par analyse d'image de la phase dont on veut estimer la variation (voir la description de la première méthode d'analyse : seuillage simple et mesure d'une phase). Puis en appliquant cette analyse au reste de l'échantillon, on obtient alors une courbe de la variation du pourcentage mesuré qui matérialise l'évolution observée.

Dans ce genre d'étude, la calibration de l'appareillage et la vérification de l'homogénéité du fond d'acquisition sont de première importance et doivent être rigoureusement effectuées.

① La mesure du niveau de gris selon une direction se pratique couramment dans les études de géomatériaux laminaires (comme les sédiments lacustres : Weber *et al.*, 1997 ; Francus, 1998 ; Francus *et al.*, 1999 ; les concrétions karstiques : Baker *et al.*, 1993 ; Genty *et al.* 1997) ou les organismes zonés (zones de croissance dans les coraux, les coquilles de lamellibranches…). La méthode de travail est généralement simple et est prise en charge par le logiciel : Fig. A7 ; l'utilisateur devant seulement vérifier que les variations de l'épaisseur de la lame mince ou que les paramètres d'acquisition n'influencent pas l'intensité du niveau de gris mesuré.

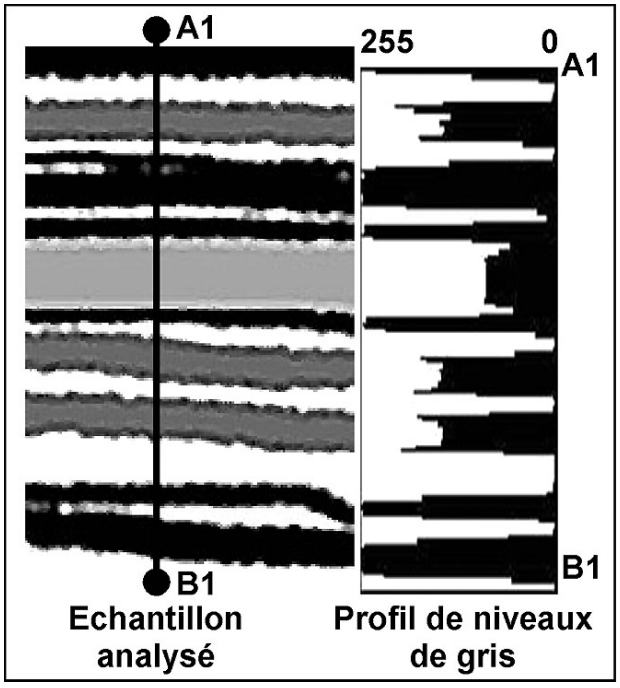


Figure n°A7 : variations dans une image laminaire homogène

Ce type de mesure est particulièrement adapté aux sédiments laminaires homogènes, mais il est fortement perturbé lors d'analyse de sédiments hétérogènes : présence de grains de quartz, différence entre éléments et ciments sparitiques….

En effet, le tracé d'un profil de niveaux de gris se fait généralement selon une ligne droite et celle-ci peut traverser des particules (Fig. A8), ce qui fausse la mesure. La construction d'un profil selon une courbe contournant les éléments posera un autre problème : celui de la correspondance entre l'échelle du profil et la longueur réellement mesurée.

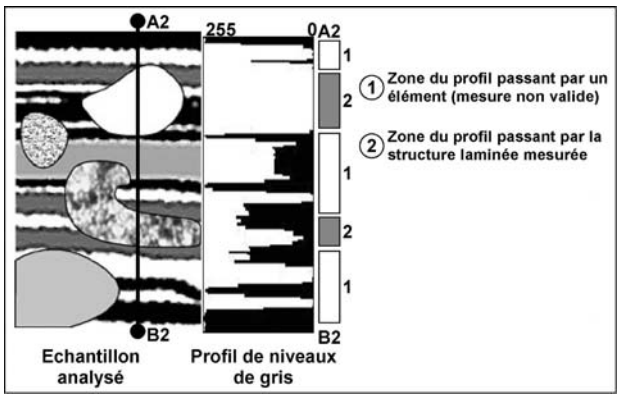


Figure n°A8 : variations dans un « sédiment » laminaire hétérogène

② Pour étudier les variations de couleur dans un sédiment hétérogène, ce qui correspond à la plupart des calcaires étudiés ici, nous avons établi une seconde méthode : la construction de profil de niveaux par quantification d'images seuillées. Cette méthode, spécialement adaptée pour les analyses de lames minces, pallie le problème évoqué Fig. A8, au prix d'une légère diminution de résolution.

Premièrement, il faut définir le seuil utilisé pour analyser les images, pour cela, il faut définir la nature de la phase qui présente des variations de couleur, ainsi que la plage de niveaux de gris occupée par cette phase. Ensuite, en utilisant les même réglages d'acquisition et le même seuillage d'analyse, la lame est parcourue le long d'une ligne droite en déplaçant à chaque fois la lame-mince d'un pas régulier. Le résultat de cette seconde étape est le calcul par le logiciel du pourcentage représenté par la phase seuillée pour chaque image analysée.

La troisième étape correspond à la mise en forme des données enregistrées (sous la forme d'un fichier texte format .txt) et la représentation de la variation du niveau de gris sous la forme d'une courbe présentant sur l'axe X : la série de données (directement transformable en distance) et sur Y : la valeur du pourcentage mesuré.

Les résultats obtenus avec cette méthode ont été comparés avec ceux obtenus par mesure directe du niveau de gris (voir Fig. A9, échantillon de Gaize d'Argonne) et ceux obtenus en prenant ponctuellement des points de référence dans la phase mesurée. Ces test montrent que les résultats obtenus sont comparables. De plus, cette méthode présente l'avantage d'obtenir des résultats chiffrés, pouvant être traités de façon statistique ou représentés graphiquement.

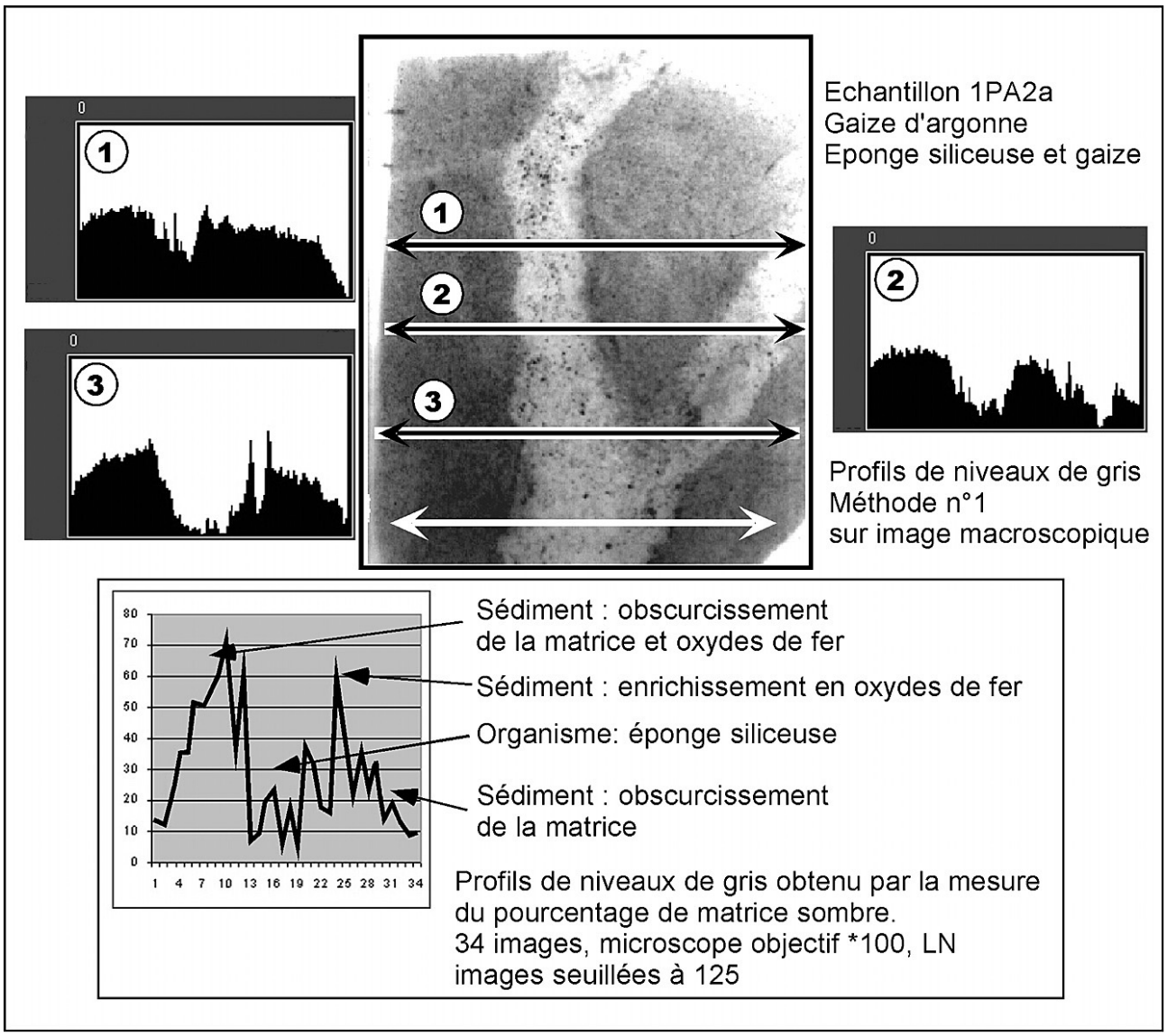


Figure n°A9 : Comparaison de profils de niveaux de gris obtenus par mesure directe et par analyse d'images seuillées.

Conclusions :

Les méthodes de travail présentées ici correspondent à une utilisation très simple des techniques d'analyse d'images, il s'agit en effet plus d'une semi-quantification que d'un véritable travail de morphométrie par transformation mathématique. En effet, notre but n'est pas d'utiliser l'analyse morphométrique pour comprendre les images, car pour cela nous avons auparavant procédé à une analyse sédimento-diagénétique fine et précise. L'analyse d'images n'est donc pour nous que le moyen le plus simple pour quantifier, estimer ou tout simplement matérialiser des variations de couleur, des phénomènes ou des caractéristiques déjà perçues par l'analyse visuelle des microfaciès.

Nous avons donc développé des **protocoles spécifiques**, particulièrement adaptés à nos échantillons et à nos objectifs, donnant des résultats directement utilisables soit graphiquement soit statistiquement.

ANNEXE 2 : Les altérations des calcaires en œuvre :

Les différentes dégradations qui affectent les calcaires en œuvre sont décrites dans de très nombreux articles ou ouvrages, les principaux travaux utilisés ici sont : Winkler, 1973 ; Lazzarini et Tabasso 1986 (trad. Philippon, 1987) ; Samsom-Gombert, 1991 ; Jeannette, 1992a (in Philippon *et al*., 1992) ; Jeannette, 1992b (in Pomerol, 1992) et Jaton 1997.

L'individualisation des différents processus d'altération au sein des dégradations des pierres en œuvre est complexe, en effet, les altérations observées sont généralement le résultat du cumul de différents processus. Des processus différents peuvent aussi provoquer le développement d'altérations identiques. Par exemple : les desquamations peuvent soit être liées au gel, à la cristallisation de certains sels (dont le principal est le gypse) à la variation du volume de certains minéraux (par hydratation ou suivant les fluctuations de température). C'est pourquoi, nous classons les altérations en œuvre selon leur morphologie macroscopique. Les dégradations observées ne seront donc rattachées à des processus d'altération que lorsque ceux-ci pourront être précisément déterminés. Cette annexe présente la classification généralement utilisée (Jeannette, 1992a) pour caractériser les altérations en œuvre ainsi que les processus et les causes entraînant ces dégradations. Dans la mesure du possible, les termes correspondant aux processus et aux causes des dégradations seront mis en *italique* alors que les types d'altérations considérés comme caractéristiques seront <u>soulignés</u>.

1 / Les processus physiques :

Les processus qui provoquent la dissociation partielle des roches, ou une simple détérioration, mais sans en modifier la composition chimique.

- Dilatations thermiques ou hydriques des minéraux :

Les *variations de volume des minéraux* dépendent de leur nature minéralogique et de leurs propriétés physiques ou chimiques : dilatation selon les variations de température ou pour certains minéraux (dits hygroscopiques) selon leur degré d'hydratation. L'ampleur de ces dilatations est fonction de la composition minéralogique des roches et de la morphologie de leur réseau poreux. Dans les roches à forte hétérogénéité minéralogique, comme les roches éruptives, la répétition des cycles d'hydratation / déshydratation ou des dilatations thermiques aboutit à la formation de plaques entraînant une <u>desquamation</u>. Celles-ci ont une surface et une épaisseur qui dépend de la partie de la roche imbibée lors des pluies; ces plaques situées dans les zone mouillées se distinguent des éclatements dus au gel car elle suivent la forme externe des pierres. De plus, la base des décollements ne présente pas d'augmentation de la teneur en sels. Dans les

roches étudiées, ce type d'altérations semble mineur, de plus sa présence est masquée par les desquamations liées à des processus chimiques : cristallisations de gypse ou d'oxalates de calcium.

La dilatation des minéraux peut parfois entraîner des dégradations plus importantes : une *fissuration* à grande échelle provoquant l'éclatement et la dislocation du bloc. En effet, par exemple, une température variant de 0 à 60°C provoque une dilatation d'un marbre de 0.001 à 0.0025% (Winkler, 1973). Pourtant ces cas extrêmes d'altération sont rares et ne se produisent que dans des conditions architecturales précises : colonnes de marbre à but architectonique, plaques et pavés juxtaposés sans joints de dilatations… Pour les roches que nous avons analysées, ces cas n'ont pas été mis en évidence (ou alors il s'agissait d'erreur de conception flagrante, comme les dalles de revêtement de la Place d'Erlon à Reims).

Dans cette étude, les *dilatations hydriques* n'ont été réellement détectées que dans de très rares cas, généralement en relation avec des niveaux riches en argiles et/ou contenant des argiles gonflantes :

- dans certains liserés d'argiles du Calcaire à débris : Pierre de Dom ;
- au niveau de quelques bioturbations dans le « Calcaire grossier » : Pierre de Courville ;
- des rares stylolithes ou des joints argileux dans l'Oolithe de bourgogne : Pierre de Dijon.

Mais il est très difficile de comprendre les véritables mécanismes mis en jeu divers processus interfèrent. De plus, l'argile des joints, des niveaux marneux ou des stylolithes est souvent lessivée ou difficile à observer (Rautureau *et al.*, 1994).

La dilatation des minéraux hygroscopiques n'a pas été mise en évidence, car il faudrait analyser très finement les échantillons uniquement dans cet objectif. Il faudrait aussi établir la part de cette dilatation dans les dégradations en œuvre, notamment pour la différencier de l'impact de la cristallisation proprement dite des sels (comme le gypse), ce qui est encore l'objet de discussion (Pauly, 1996, Camuffo 1995).

- Actions du gel :

La *gélifraction* provoque des éclatements qui divisent les pierres en éclats de plusieurs centimètres (écaillage). En œuvre, ces dégradations affectent préférentiellement les blocs placés en délits ou ceux dont la porosité sera saturée en eau (d'où l'importance de la porosité piégée et du coefficient de saturation en eau). L'action du gel est liée au nombre de cycles gel/dégel auxquels est soumis le bloc en œuvre et varie donc selon les conditions climatiques, mais aussi selon la situation de la pierre sur le bâtiment.

Elle affecte surtout les roches à fort réseau microporeux, mais sera aussi dépendante du pourcentage de porosité piégée et du taux de saturation en eau des micropores. De plus, certaines zones, fortement hétérogènes peuvent être très sensibles à l'action du gel :

- zones d'hétérogénéités minéralogiques ou texturales : niveaux argileux, bioturbations ou perforations marquées à remplissage argileux ;

- zones d'hétérogénéités structurales : limite entre litages obliques de textures différentes, diaclases, plans de faille, veines de calcite, stylolithes d'origine sédimentaire ou tectonique (en particulier si le stylolithe contient de l'argile).

Pour ces niveaux, l'effet du gel sera amplifié et provoquera la fragmentation du bloc en fonction de ces hétérogénéités.

Les dégradations en œuvre directement liées au *gel* sont très rares car les roches sélectionnées sont toutes des calcaires à la durabilité éprouvée et peu gélifs : même le banc de « Liais » de la Pierre de Courville réputé gélif s'avère relativement résistant. Cette remarque peut être généralisée à la plupart des Pierre à bâtir, car les matériaux utilisés pour la construction doivent répondre à des normes standards de non gélivité (Bousquié, 1979 ; Gauri et Adinarayana., 1989 ; Auger, 1996). Notons que les diverses appellations de la formation de l'Oolithe vacuolaire sont très résistantes au gel car elles contiennent de nombreux macropores de plusieurs millimètres de diamètre jouant le rôle de bulle d'air : ils permettent la régulation des baisses de température et atténuent les éventuelles dilatations liée à la formation de glace.

Les seuls exemples nets d'altérations liées au gel sont :

- certains niveaux de Calcaire grossier dont les bioturbations finement microporeuses sont gélives (indice de saturation en eau élevé) ;

- quelques bancs de l'Oolithe vacuolaire ou du Calcaire à débris dont la porosité à été modifiée par une phase de compaction sédimentaire ou par une cimentation. Mais, ces bancs ne sont pas commercialisés et on ne les retrouvent donc pas en œuvre sauf à proximité immédiate des lieux d'extractions ;

- quelques bancs à débits en plaquettes dans les formations du « Calcaire grossier « Cliquart » et dans « l'Oolithe de bourgogne ». Là encore, ces bancs gélifs ne doivent pas être utilisée en construction et leur observation en œuvre ne se fera donc que ponctuellement et de façon très locale (Tourtebatte, 1995) ;

- des blocs de Craie de Champagne et de Calcaire Grossier qui n'ont pas réssuyé et qui ne sont pas protégé du gel par une couche de calcin.

Les calcaires sensibles à la fragmentation sont :

- la « Pierre noire » de Givet car elle contient de nombreuses veines de calcite ;

- la Pierre de Dijon aux litages très marqués.

2 / Les processus physico-chimiques :

- Dissolutions :

Les calcaires sont principalement composés de calcite facilement dissoute par l'eau acide circulant en surface ou dans les pores. Une *dissolution* intense peut provoquer des ravinements : ce processus n'est pas

seulement une érosion physique par circulation d'eau , mais aussi une dissolution chimique du carbonate de calcium dans une eau acide. Ces ravinements se produisent généralement sur des surfaces et des éléments très exposés (Jeannette 1992a). Sur des roches hétérogènes, la dissolution met en relief les éléments résistants et érode la matrice plus tendre : ces dissolutions de surface sont aussi nommées lessivages ou érosions superficielles.

Les ravinements affecteront particulièrement les calcaires fins, très tendres comme certains types de tuffeaux de Touraine placés en pinacles (alors que d'autres variétés de tuffeaux résisteront mieux à ces conditions exposées : Martinet et Macaire, 1990). Les dissolutions de surface seront relativement fréquentes sur les calcaires micritiques riches en bioclastes : biomicrite fossilifère selon Folk (1962), calcaire bioclastique de type packstone selon Dunham (1962).

Dans notre étude, les dissolutions de surface sont très souvent mises en évidence, les bioclastes, les grains de quartz et les éléments résistants se retrouvant en relief. Mais l'impact sur le bloc et sur sa durabilité est faible (l'impact de la dissolution du calcin protecteur serait pourtant un champ d'étude à développer, par exemple pour la Craie de Champagne). Signalons quelques exemples :

- dans « l'Oolithe vacuolaire », les dissolutions de surface accentuent l'aspect vacuolaire et mettent en évidence les oolithes à nucléus dissouts, les litages ou niveaux lenticulaires micritiques. Dans ce dernier cas, l'hétérogénéité des blocs est accentuée, ce qui les rend inesthétiques, particulièrement quand la micrite présente une couleur beige (Rue Libergier, Reims).

- les *dissolutions de surface* provoquent la mise en relief des bioclastes, citons (pour le côté anecdotique) les abondantes plaques polygonales d'étoiles de mer (astéries) des bancs du « Calcaire à Ditrupa » de la cathédrale de Noyon (variété locale du « Calcaire grossier »).

Au contraire, les ravinements nuisent à la construction en canalisant les écoulements de fluides ou en érodant nettement les blocs. Mais les ravinements ne seront qu'exceptionnels : quelques cas d'éléments « d'Oolithe vacuolaire » ou de « Calcaire à débris », mis en délits à proximité de gouttières défectueuses et dont le *surcreusement des litages* est attribuable à un ravinement (Rue de Cernay, Reims).

- Désagrégations alvéolaires :

La désagrégation alvéolaire, parfois nommée alvéolisation, pulvérulence voire désagrégation sableuse ou granulaire. Il s'agit d'une *décohésion progressive* de la roche avec perte d'éléments. Macroscopiquement, quand la roche est affectée sur toute sa surface de façon plus ou moins homogène, il convient de parler de désagrégation granulaire ou de pulvérulence (exemple de la Pierre de Caen : Samsom-Gombert, 1993 ou de marbres blancs : Bouineau et Perrier, 1995). Par contre le terme d'alvéolisation est plutôt réservé aux roches présentant une *décohésion différentielle* avec différenciation entre des alvéoles surcreusées et des bords préservés qui se retrouvent en relief, avec parfois plus de 10 centimètres de différence

(cas des grès : Jeannette, 1992 ou des tuffeaux : Dessandier 1995). Les roches homogènes ont donc plutôt tendance à présenter une désagrégation de toute la surface du bloc alors que les roches et les niveaux hétérogènes seront soulignées par l'alvéolisation. Par exemple, pour le tuffeau de Touraine, les niveaux mis en relief seront les bords des blocs (avec un calcin protecteur plus développé) et les bioturbations (plus silicifiées que le reste de la roche).

La désagrégation alvéolaire se développe principalement sur des pierres souvent humides, mais non lessivées, c'est à dire sur des blocs abrités des pluies battantes et en retrait des ruissellements. Les alvéoles progressent à partir d'irrégularités comme les traces d'outils, les hétérogénéités dans les litages (de porosité ou de taux de cohésion) et les points de fixation d'organismes (particulièrement les lichens). Il se produit un *dessertissage progressif* des grains conduisant à la désagrégation de la roche et à son érosion par la *perte progressive de ses éléments*. Le résultat étant un surcreusement en alvéoles reparties soit selon la morphologie du bloc mais aussi de façon aléatoire à la surface du bloc, alors qu'une fine poudre composée d'éléments fracturés et riche en sels se dépose sur le sol.

L'action abrasive du vent dans la formation des alvéoles est généralement écarté (Cailleux, 1953, Camuffo, 1995), mais de récentes simulations en soufflerie montrent l'importance des turbulences éoliennes dans le développement de l'alvéolisation (Rodriguez-Navarro *et al.*, 1999). De nombreux auteurs (Auger 1989 ; Jeannette, 1992a ; Pauly, 1985 ; Paradise 1998) considèrent que la cause de la désagrégation granulaire est la succession des cycles thermiques ou d'imbibition / dessiccation, car ils provoquent des *dilatations / rétractions* de certains minéraux (cf. dilatations thermiques ou hydriques). De plus, l'importance de la *cristallisation de sels* sous la surface n'est pas négligeable car elle provoque une *micro-fissuration* et une *diminution du taux de cohésion* entre les éléments (cf. desquamations), ce qui facilite la désagrégation (pourtant, si cette altération est liée à la l'action des sels, elle est en général indépendante de la présence d'encroûtements chimiques).

J.-P. Pauly a particulièrement étudié la cinétique de développement de cette altération sous nos climats (Pauly, 1976, 1989 et 1996). Les sels se forment sur les zones en saillies puis migrent vers le fond des alvéoles par lessivage et circulation des remontées capillaires. La *formation de ces efflorescences* est quasiment nulle en hiver, moyenne en été et forte aux deux mi-saisons. Pauly corrèle donc le développement de la désagrégation granulaire avec la variation de l'humidité de l'air. Ses conclusions montrent que l'alvéolisation se développe préférentiellement sur des supports secs, à la limite des zones de ruissellement (juste au-dessus des zones de remontées capillaires). Le mécanisme est donc relativement différent d'une simple cristallisation saline et l'importance du vent et des turbulences à la surface de la roche pourrait expliquer la répartition aléatoire des alvéoles (Rodriguez-Navarro *et al.*, 1999). Mais le problème pour généraliser ces résultats reste la mise en relation des observations effectuées en laboratoire et le réel développement en œuvre des altérations de type désagrégation alvéolaire.

Le terme de désagrégation granulaire indique que le développement de cette altération est plus ou moins lié à la proportion de grains dans la roche. Si celle-ci contient beaucoup d'éléments et qu'elle est faiblement cimentée (grainstone macroporeux ou grès), la désagrégation sableuse est généralisée et rapide. A l'inverse, elle ne se produira pratiquement pas dans les calcaires microporeux sans éléments (simple pulvérulence de surface) : ce type d'altération est donc lié à la nature de la roche. Dans le cas des calcaires, son développement sera variable selon les faciès ; alors que pour les grès, il s'agit de l'altération la plus naturelle et de la plus courante. L'importance de la désagrégation alvéolaire pour les faciès à forte proportion de macroporosité, laisse supposer un autre mécanisme d'altération : la perte de cohésion entre les éléments par *dissolution de la phase de liaison*. Or, lors des études de l'alvéolisation, ce mécanisme n'est quasiment jamais mentionné (sauf dans Camuffo, 1995) ; l'analyse d'une corrélation entre la *disparition de la phase de liaison* des roches granulaires (par dissolution ou fissuration) et le développement de la désagrégation alvéolaire doit donc être envisagé.

Dans notre étude, nous mettons en évidence cette importance du taux de cohésion (corrélé au taux de cimentation et à la macroporosité), particulièrement à travers deux calcaires qui présentent une désagrégation alvéolaire nette : « l'Oolithe vacuolaire » et le « Calcaire à débris ». Des descriptions plus précises de ces altérations sont données dans le corps du mémoire, en particulier pour l'Oolithe vacuolaire, où les alvéolisations ne s'observent que sur des blocs en élévation, très exposés au vent et à la pluie.

Signalons aussi l'altération alvéolaire des faciès très granulaires du « Calcaire grossier » comme le faciès à Ditrupa ou les Pierres de St-Leu et de St-Maximin.

- Desquamations et exfoliations :

La desquamation correspond à la formation de feuillets (épaisseur inférieure à 2mm) ou de plaques : exfoliations d'une épaisseur supérieure à 2mm (atteignant parfois plus d'un centimètre). Cette desquamation est indépendante du type et de l'âge des calcaires car elle peut affecter toutes les roches de même exposition, même si elles sont de natures différentes. Une autre morphologie, souvent constatée, est l'apparition d'un débit en mille-feuille, conditionné par une *fissuration* intense. Ce débit peut se développer sur une grande profondeur : Samsom-Gobert, 1993 mentionne une desquamation jusqu'à plus de 10 centimètres de profondeur.

Les *fissures* prennent naissance en bordure des joints, elles individualisent un mince feuillet ou une plaque ; parfois les fissures sont multiples et provoquent un débit en mille-feuille. La *fissuration* progresse ensuite vers la partie centrale du bloc, parallèlement à sa surface, jusqu'à la chute de la plaque. La nouvelle surface (qui se situe en retrait) est en théorie à l'abri de la desquamation, mais c'est un lieu privilégié pour le développement d'encroûtements ou de désagrégations.

L'aspect des feuillets ou des plaques est généralement le suivant :

- sur la plaque proprement dite, on peut nettement différencier la surface extérieure dure, parfois recouverte par un encroûtement et la surface interne presque pulvérulente, enrichie en sels ;

- sous la plaque ou le feuillet, la pierre est pulvérulente, finement *fracturée* et sur plusieurs centimètres de profondeur, la roche présente une forte *concentration de sels* (gypse par exemple).

Les desquamations se développent principalement sur les murs exposés aux pluies battantes, en milieux urbains propices aux cristallisations de sels (Felix, 1985, Samsom-Gombert, 1993). Elles seront particulièrement présentes aux angles de blocs, aux saillies des sculptures et dans les rebords de balcons ou de fenêtre, c'est à dire aux endroits soumis à des cycles d'imbibition et de séchage répétés. La desquamation est donc une altération liée à la position de mise en œuvre du bloc (pierre de soubassement par exemple) et à son nanoclimat d'exposition : *action du gel, de la dilatation des minéraux…* Mais elle peut-être aggravée par la présence de sels (particulièrement du soufre) qui amplifient la *fissuration* par *croissance cristalline*.

Ainsi, l'altération desquamante est provoquée par la *fissuration* des zones superficielles des blocs. Les causes de cette fracturation peuvent être multiples, mais seront généralement amplifiées par la *cristallisation de sels* (ces cristallisations à l'intérieur de la roche étant parfois nommées « sub-florescences » : Lazzarini et Tabasso, 1986). En effet, la *croissance des cristaux* exerce une forte *pression* au sein du calcaire et provoque sa *fissuration* avec formation de nombreuses microfractures orientées parallèlement à la surface et laminage de la zone superficielle du calcaire. Selon le taux de cristallisation, le gypse peut obturer partiellement ou totalement la porosité et même épigéniser le calcaire périphérique. La micro - fissuration conduisant au décollement de la plaque externe ou (des encroûtements) peut être expliqué principalement par la cristallisation du gypse dans les pores de la roche (puis dans les fissures déjà créées).

Notre étude montre que la formation de la desquamation est effectivement liée aux conditions d'exposition (cycles gels - dégels) et à la teneur en sels des eaux circulant dans les pores de la roche. En revanche, la morphologie adoptée par les desquamations, leur taux de développement et leur impact sur la durabilité du bloc sont liés **au microfaciès du calcaire**. Ainsi, les calcaires à gros éléments comme les calcaires à entroques du Bajocien (« Pierre de Langres ») ou de l'Oxfordien (« Pierre d'Euville ») ont tendance à former des plaques épaisses se fragmentant rapidement. Alors que les calcaires micritiques fins forment de minces feuillets sur de grandes surfaces (« Pierre de Courville » ou des mille-feuilles nets (Pierre de Bar-sur-Aube).

3 / Les altérations chimiques :

Les actions biochimiques provoquées par les organismes (bactéries, mousses, algues…) sont développées au paragraphe 4/ de cette annexe.

- Dissolutions :

Il est difficile de différencier ces dissolutions des précédentes, théoriquement les dissolutions uniquement chimiques sont liées à des eaux très acides, elles se développent sur les matériaux carbonatés soumis à des lessivages intenses. Ces *dissolutions* peuvent simplement provoquer la mise en relief des éléments, mais peuvent éroder toute une partie d'un bloc si le calcaire est très sensible à la dissolution ou très exposées : sculpture ou pinacles par exemples. Les dissolutions sont d'autant plus intenses et plus rapides que les eaux sont acides (Bell, 1993) ; c'est pourquoi cette altération est amplifiée par la pollution atmosphérique. Le taux de dissolution varie en fonction de la situation dans un bâtiment : les zones soumises aux dépôts acides, les sculptures, les rebords et corniches sont plus affectés que les parties basse (où les eaux de pluie déjà rechargées en carbonate de calcium ne provoquent donc que des dissolutions plus faibles.

Nous avons rarement eu l'occasion de mettre en évidence des dissolutions uniquement chimiques, c'est pourquoi nous considérons que ce processus est surtout physico-chimique : lié à la fois aux circulations d'eaux acides et à la grande solubilité des carbonates. Notons à titre d'illustrations :

- les figures de dissolution à la surface des blocs de Craie de champagne qui apparaissent parfois comme piquetés ;

- les traces de *dissolutions* sur les calcaires micritiques sans éléments : dismicrite selon Folk (1962) ou calcaire Mudstone selon Dunham (1962), comme les blocs de Pierre de Bar-sur-Aube quand ils sont exposés aux pluies acides en milieu urbain : à Troyes par exemple.

- Cristallisations et recristallisations :

Les circulations de fluides dans le réseau poreux de la roche peuvent si le fluide est chargé de particules chimiques, provoquer des *cristallisations* (carbonates et oxalates de calcium, sulfates et nitrates de potassium : cf. salpêtre, oxydes de fer) ou des *recristallisations* : (calcite en gypse, pyrite en goethite ou sulfates de fer ferreux, Quénée, 1990). Ces cristallisations peuvent se produire au sein de la roche et sont liées à la porosité du calcaire. Mais elles pourront être amplifiées par la présence d'un mortier fortement réactif sur le plan chimique (incompatibilité chimique) ou par un enrichissement en composés chimiques (pollution atmosphérique par exemple). Les altérations consécutives de cristallisations ou de transformations minéralogiques à l'intérieur de la roche peuvent provoquer la fissuration du bloc en fonction des pressions exercées par les croissances cristallines. En effet, non seulement les minéraux issus des recristallisations ont souvent un volume supérieur aux minéraux initiaux : intégration de molécules d'eau, oxyda-

tion…, mais ces évolutions minéralogiques produisent généralement des acides. Par exemple : le cas de la pyrite (Quénée , 1990), avec sa dégradation en sulfate ferreux :

$$2FeS_2 + 7O_2 + 2H_2O \leftrightarrow 2FeSO_4 + 2\,H_2SO_4$$

La transformation du sulfure de fer forme ici de l'acide sulfurique pouvant provoquer d'importantes *attaques acides*, c'est à dire des dissolutions. De plus cette équation n'est qu'une première étape avant la formation de sulfates ferriques, d'hydroxydes de fer de type goethite : FeO,OH. Les réactions chimiques continuant encore, la production d'acide sulfurique et d'eau provoquent la recristallisation de la calcite en gypse (voir équation ci-dessous) et entraîne la *fissuration* de la roche (et donc des desquamations, des fragmentations…) par *augmentation du volume.*

Dans cette étude, les cas de cristallisations ou recristallisations entraînant des dégradations notables, ne sont pas très nombreux (hormis les cristallisations de sels comme le gypse). Il s'agit le plus souvent d'encroûtements en liaison avec la surface des blocs. En effet, les calcaires étudiés ont une grande homogénéité chimique : par exemple « l'Oolithe vacuolaire » est composée de 98 à 99 % de $CaCO_3$, sa minéralogie n'a donc pas d'influence sur sa durabilité en œuvre (même si nous reviendrons sur la présence de dolomite). Seules la pyrite présente dans la « Pierre de Givet » ou la glauconie du « Calcaire grossier » ont un potentiel d'altérabilité plus important, mais aucune altération en œuvre n'a put être directement reliée à une recristallisation de ces minéraux. Enfin, des dégradations dans les blocs ont pu être mis en relation avec des cristallisations ; mais ces altérations sont ponctuelles et liées soit à la présence d'un mortier mal choisi soit à une méthode de mise en œuvre ou de restauration contestable (cathédrale de Reims : utilisation de la potasse et d'un ragréage par tiges d'acier à l'origine d'oxydations).

En revanche, les *cristallisations de gypse* ou la *transformation de la calcite en gypse* représentent une des principales causes d'altérations en œuvre, selon la réaction suivante :

$$CaCO_3 + H_2SO_4 + H_2O \leftrightarrow CaSO_4 \,.\, 2H_2O + CO_2.$$

Les *cristallisations* de sels dans les pores exercent *des pressions* sur les parois (on trouvera quelques valeurs de pressions de cristallisation dans les ouvrages de Winkler, 1973 et Bell, 1993) et entraînent la *fissuration* de la roche (Prick, 1995). Selon les conditions externes ou les caractéristiques du microfaciès, ces cristallisations provoqueront le développement de types d'altérations différents : desquamations, désagrégations alvéolaires, encroûtements…

La *recristallisation de la calcite* en sulfates de calcium, provoque elle aussi des dégradations car le volume molaire de calcite est de 36.76 cm^3 alors que celui du gypse est de 73.82 cm^3, soit le double (d'après Deer et al. 1962, *in* Quénée, 1990). Cette *augmentation théorique du volume* de 95% provoque dans le calcaire une déformation de la masse de la roche, entrainant à terme sa fissuration et son éclatement (desquamations ou fragmentations).

Les modes de cristallisations et la nature des sels sont détaillés dans de nombreux articles (Camuffo *et al.*, 1983 ; Arnold et Zehnder ; 1985a et 1985b ; Arnold et Zehnder, 1990 ; Auger, 1990 ; Del Monte 1997 ; Sabbioni *et al.,* 1998 ; etc…). Les différents composés salins cristallisent en formant des séquences d'efflorescences aussi bien en hauteur que vers l'intérieur du mur, par exemple : les sulfates et les nitrates cristallisent en surface alors que les chlorures se forment plus en profondeur (Arnold et Zehnder, 1990 ; Pauly, 1996). Ces zonations de cristallisations s'organisent en fonction des équilibres entre les apports en éléments chimiques (Mg, Na, K, Ca, S, Cl…) et les surfaces de cristallisation, d'évaporation ou de migration des sels. Les principaux paramètres qui vont modifier ces équilibres sont soit internes à la roche : porosité, perméabilité, capillarité…, soit externes : éléments chimiques reçus, nature des cendres volantes contenues (Ausset *et al.,* 1996 et 1999), nanoclimat d'exposition…

Le processus de cristallisation des sels peuvent se résumer en 4 phases (Arnold et Zehnder, 1990) :

-1/ : Les cristaux cristallisent dans les plus grands pores et non dans les plus petits : inférieurs à 1µm. En effet, l'eau s'évapore en premier dans les grands pores et se retire progressivement dans les plus petits. La solution saline encore contenue dans les infrapores de la roche alimente les zones de cristallisation, permettant aux cristaux de sels de remplir tout l'espace disponible. Ces cristaux ayant un espace limité pour leur croissance auront donc une forme massive, xénomorphe, formant des volumes compacts.

-2/ : Les cristaux remplissent entièrement les pores et leur croissance continue exerce alors des pressions sur les parois porales. Des fissures apparaissent dans les zones de faiblesse de la roche et relient les zones de cristallisations.

-3/ : De véritables fissures s'ouvrent, permettant aux cristaux de sels de se développer, ce qui entraîne dans le même temps l'augmentation de la fissuration qui favorisent l'évaporation et elles fournissent deux surfaces de cristallisation. A ce stade les cristaux de sels prennent une morphologie aciculaire (voir columnaire) car ils ont de l'espace pour s'exprimer.

-4/ : Les fissures largement ouvertes ne sont plus alimentées en solutions salines, la cristallisation des sels est donc réduite, ils ne remplissent plus tout l'espace disponible. Pourtant, la cristallisation continuant , les fissurent s'agrandissent toujours.

Plus récemment, Schiavon (1992), a montré que le microfaciès de la roche : selon les phases de liaison et de porosité), influence la morphologie et le développement des recristallisations et donc de l'altération. Ainsi, dans les faciès oosparitique étudiés, l'altération parait principalement causée par les pressions de *cristallisation des sels* entre les cristaux de calcite. Ce qui provoque la *fissuration* du calcaire et la *dissociation de fragments* de roche (désagrégation granulaire par perte de gros fragments). Alors que pour les faciès micritiques, la phase de liaison est progressivement épigénisée en gypse. Puis la *dissolution du gypse* conduit à l'altération de la roche sous la forme d'une fine désagrégation granulaire car les éléments sont progressivement *désolidarisé* de l'ensemble du calcaire.

Dans notre étude, la plupart des échantillons de roches altérées présentent des cristallisations salines, celles-ci sont observables dans les pores et les fissures et sont mises en relation avec les dégradations (voir desquamations, désagrégations). Leur importance, globalement proportionnelle à l'urbanisation du milieu, permet de les corréler à la pollution chimique et donc aux milieux et aux conditions de mise en œuvre. Mais nous montreront, en suivant Schiavon, que les altérations se développeront différemment selon le type de roche et suivant son microfaciès.

- Encroûtements :

Le véritable calcin correspond à un *fin dépôt de calcite* microcristalline à la surface de la roche, ressuyage de l'eau interstitielle. Dans ce travail, les patines qui apparaissent ultérieurement seront considérées comme des étant encroûtements soit du type croûte blanche : calcite prépondérante avec peu de gypse, soit du type croûte noire (taux de sulfates très importants avec particules atmosphériques noires).

Dans cette annexe, nous ne parlerons pas du calcin et des patines « naturelles » pour cela, se reporter par exemple aux patines ferrugineuses décrites sur du calcaire à débris (page 147 ou page 155) ou sur du calcaire grossier (pages 184-186) ou à la description des patines *in* Jeannette, 1981 et Jeannette 1992b.

Les encroûtements se développent quand des cristallisations et des recristallisations s'accumulent à la surface des blocs, parfois très rapidement (Viles, 1990). Ils se forment à l'abri des pluies battantes, dans des sites où l'érosion est très faible et où les solutions riches en sels peuvent s'évaporer. En bordure des endroits lessivés par les pluies, les croûtes peuvent dépasser 1 centimètre d'épaisseur. Les encroûtements peuvent se classer en deux types : selon leur composition et leur nature. Les croûtes blanches principalement composées de calcite qui a recristallisé à la surface du bloc et les croûtes noires qui contiennent en plus des cristaux de sels (sels de calcium, oxalates et sulfates) et incluent des particules transportées par voie atmosphérique (cendres volantes, quartz éoliens…).

Les croûtes blanches ont plus un impact esthétique que véritablement destructeur, elles sont issu de la recristallisation de calcite préalablement dissoute dans l'eau ruisselante (voir dissolutions). Ces croûtes peuvent cependant obturer la porosité superficielle des blocs et empêcher l'évaporation ou la circulation de l'eau en profondeur (ce qui peut entraîner d'autres altérations : comme la desquamation (Rautureau *et al.*, 1991 – 1999).

Les croûtes noires se développent sur toutes les catégories de pierres. Il s'agit de la forme d'altération la plus caractéristique des roches en œuvre en milieu urbain et donc du phénomène le plus étudié (Jeannette, 1981 ; Camuffo *et al.* 1983 ; Biscontin *et al.*, 1991 ; Vergès-Belmin *et al.*, 1992 ; Ausset *et al.*, 1994, Sabbioni, 1985, Sabbioni *et al.* 1998…). Cette forme d'altération est principalement conditionnée par le nanoclimat de mise en œuvre (à l'abri des ruissellements intenses) et par les apports atmosphériques

(principalement les cendres volantes, Ausset *et al.,* 1992). Ces encroûtements sont fortement liés à la pollution urbaine : combustion du charbon, du fioul, gaz d'échappement des moteurs…). Ils sont caractérisés par une très forte concentration de gypse (pouvant aller jusqu'à 40% : Sansom-Gombert, 1993) et par la présence d'organismes encroûtants (microstromatolithes, algues, lichens…).

L'accumulation des particules résulte surtout d'un dépôt atmosphérique direct qui ne peut se faire qu'à l'abri des lessivages ; par contre les cristallisations de gypse se produisent lors de l'évaporation des solutions qui ont transité à travers la pierre sous-jacente (efflorescence)s. La part des différents facteurs causant l'apparition du gypse (apports atmosphériques, remontées capillaires, organismes biologiques…) fait encore l'objet de nombreuses discussions. L'hypothèse la plus couramment acceptée est que le soufre provient des particules noires (résidus de combustion) ou du SO_2 atmosphérique, et qu'il réagit avec la calcite de la roche pour former du gypse (Camuffo *et al*., 1983). Il est de plus admis que l'eau de pluie à elle seule peut entraîner la formation de gypse, par exemple sur des monuments en roche non carbonatée comme les grès à ciment siliceux (Jeannette, 1981).

En général, les « croûtes noires » sont composées de deux couches :

- une couche externe sombre, peu cohérente et d'aspect spongieux. Elle est riche en suies, poussières et grains de quartz, et est cimentée par un feutrage lâche de cristaux de gypse. Des cristaux de calcite ou de la roche encroûtée peuvent parfois y être retrouvés. Cette couche superficielle peut contenir des nombreuses cendres volantes dont la quantification et la caractérisation sont bien définies (Ausset *et al.,* 1989, 1992 et 1994 ; Sabbioni, 1995), leur provenance peut ainsi être déterminée : combustion du fioul, du charbon, de carburant automobile… Elles donnent leur couleur noire aux croûtes et peuvent agir comme catalyseur de réactions chimiques : présence de vanadium par exemple ;
- une couche interne plus claire car moins riche en suies, et plus cohérente car le gypse y est plus développé que dans la couche superficielle.

Le passage entre l'encroûtement et la roche est souvent progressif, dans ce cas, le calcaire sous-jacent est finement fracturé, friable et enrichi en sels. Mais le contact peut être net : croûte plaquée contre la roche, et dans ce cas le décollement de l'encroûtement laisse la pierre presque intacte. A la limite entre la croûte noire et la roche, certains auteurs (Del Monte, 1992) signalent la présence d'un niveau riche en oxalates, qui témoignerait de *l'activité d'organismes* pionniers et donc d'un ancien encroûtement biologique. Sous la croûte noire et sur une profondeur de 1 à 2 mm, la roche est microfissurée selon une orientation parallèle à la surface du bloc et la morphologie de l'altération correspond donc à une desquamation.

Certaines études ont reconstitué l'historique et la cinématique du développement des croûtes noires (Camuffo *et al.,* 1983 ; Vergès-Belmin *et al.,* 1992 ; Sabbioni *et al.,* 1998) afin de mettre en évidence les

différents processus en action. Il apparaît ainsi (Vergès-Belim *et al.,* 1992) que ces encroûtements se développent non seulement par *accumulation de particules atmosphériques* (avec participation ou non d'organismes encroûtants), mais aussi par la *transformation progressive* de la calcite en gypse : *pseudomorphose* (recristallisation progressive de la calcite en gypse avec conservation de la morphologie cristalline initiale : limite entre les cristaux, clivages). Alors que les auteurs ont mis en évidence cette évolution dans des marbres blancs de Carrare, nous l'avons retrouvée dans des échantillons encroûtés de Pierre d'Euville (calcaire à entroques).

Suivant leur morphologie et leur degré d'évolution, les croûtes peuvent se détacher de la pierre ou adhérer à une roche pulvérulente et friable. Mais les encroûtements auront toujours tendance à se détacher de la surface du bloc, entraînant un peu de roche avec eux. Sur cette nouvelle surface, généralement en creux, une nouvelle croûte peut alors se développer, d'autant plus que le matériel est désormais abrité, friable et enrichi en sels.

La morphologie des cristaux de gypse (ou des autres sels) a elle aussi été largement étudiée (voir cristallisations et recristallisations). Les cristaux se formant dans les pores et les fissures ont généralement une forme aciculaire avec parfois une disposition type rose des sables (Samsom-Gombert, 1993), leur morphologie bien exprimée (cristaux automorphes) montre bien qu'ils ont cristallisé dans un espace poreux déjà existant.

Le contenu chimique, les modalités de développement des encroûtements sulfatés, leur impact sur la roche sous-jacente, le rôle de la pollution atmosphérique et de la pluie dans leur développement sont analysés et discutés dans de très nombreux articles auxquels nous ferons référence. Dans ce travail, nous avons volontairement limité les descriptions à quelques encroûtements caractéristiques car il s'agit sans doute de la forme d'altération qui a fait l'objet du plus grand nombre de travaux. Nous n'avons donc décris que certains encroûtements dont les relations avec le calcaire sous-jacent sont importantes à détailler car ils présentent des particularités notables ou un intérêt pour notre démonstration.

4/ Les altérations biologiques :

Les altérations en œuvre sont pour la plupart provoquées par les phénomènes physico-chimiques liés à la mise en œuvre ou à la pollution. Pourtant d'importantes interactions avec l'activité biologique (microbes, lichens ou plantes supérieures) ont été souvent constatées ; ces organismes sont souvent à l'origine directe de certaines dégradations.

Encroûtements biologiques :

Parfois, des encroûtements principalement biologiques : appelés croûtes vertes et croûtes grises sont mis en parallèle des croûtes blanches et des croûtes noires. Mais les plus souvent, les organismes sont inclus dans les encroûtements chimiques. Ainsi, selon Del Monte (1992), 75% des encroûtements contiennent un niveau riche en oxalates de calcium, qui témoigne de l'activité passée d'organismes. Ceux-ci sont mis en relation avec les *cristallisations de sels* et la *rétention de l'humidité de surface*. Mais si leur présence est démontrée (généralement entre l'encroûtement gypseux et la roche), leur intervention dans le développement de la croûte n'est pas prouvée. Car même si cette prolifération biologique est clairement observable : organismes pionniers disparaissant lors de la mise en place de la croûte noire ou organismes se développant en même temps que la croûte (par exemple des microstromatolithes : Blasquez et al, 1997), il n'est pas encore démontré que ces organismes ont un véritable rôle dans le développement des croûtes noires (sauf sur certaines roches granitiques (Jaton *et al*., 1985 ; Blazquez *et al.,* 1997). Dans cette étude, nous considérerons simplement que le développement des encroûtements inclut une part biologique, sans déterminer dans le détail la nature des organismes présents ni leur part sans doute polyphasée au sein de ces encroûtements.

Perforations :

Les lichens colonisent très fréquemment la surface des bâtiment qu'ils soient en pierre naturelle ou en matériaux artificiels (comme le béton). L'impact de ces organismes sur la roche est beaucoup plus difficile à démontrer. Cependant, des filaments mycéliens pénètrent le substrat permettant au lichen de se fixer et causent une désagrégation mécanique par *perforation*. Mais les lichens ne possèdent pas tous des hyphes pénétrants et les dégradations qu'ils entraînent sont alors liées à leur nature (différence entre les espèces foliacées et les espèces crustacées, Laurain, 1996).

Notons aussi que ce type d'altération est fortement lié au climat et au taux de pollution car ces paramètres conditionnent le développement des différentes espèces de lichens.

Dans cette étude aucune altération importante n'a été mise en relation avec la présence de lichens ou d'algues encroûtantes. Nous considérerons donc que ce type d'altération est très particulier et qu'il doit être étudié au cas par cas par des spécialistes.

Production d'acides organiques :

La microflore hétérotrophe qui se développe dans les encroûtements sécrète des acides organiques qui peuvent attaquer les roches carbonatées mais aussi les minéraux siliceux. Toutefois, la production de ces acides ne devient réellement préoccupante que pour la préservation de fines sculptures ou de fresques. L'impact de ces composés organiques sur la roche elle-même n'est pas encore bien défini par la commu-

nauté scientifique (par exemple, son rôle dans la production des oxalates de calcium) et nos moyens d'analyses ne nous ont pas permis d'approfondir cette question.

Recristallisations :

Le rôle des bactéries dans la *transformation* des composés soufrés (par des Thiobacilles), nitreux (par Nitrosomonas) ou nitriques (par Nitrobacter) est souvent évoqué lors de l'analyse des dégradations en œuvre (Livingstone, 1985). Mais le principal problème est de démontrer que ces organismes sont à l'origine de l'altération par la production de sulfates et de nitrates car que leur présence peut être passive ou postérieure à l'altération : altération provoquant un enrichissement du milieu en soufre ou en azote. Ainsi, les bactéries de type Thiobacille sont généralement mises en évidence dans les niveaux à fort taux de desquamation, et ce type de dégradation est effectivement conditionné par une très forte *cristallisation de sels* dans les pores de la roche. A l'opposé, dans les altérations de type désagrégation et alvéolisation, les taux de sels contenus et de Thiobacilles sont beaucoup plus faible. La relation entre la proportion de sels et les bactéries du cycle du soufre est démontrée, mais il faudrait établir l'antécédence de ces bactéries par rapport à l'enrichissement en sels.

Dans cette étude, l'utilisation de la microscopie en épifluorescence qui révèle la présence ou l'absence de matière organique soulignera l'importance des procédés bactériens dans les recristallisations et les cristallisations de sels. Nous montrerons ainsi l'étroite relation entre la *recristallisation de la calcite* et les zones de luminescence (et donc d'activité organique). Par exemple : à la périphérie des pores et des fissures de la Pierre d'Euville. Le rôle probable des micro-organismes dans les *transformations minéralogiques* qui conduisent à la fissuration et à la desquamation de la roche sera alors évoqué.

5/ Mauvaises utilisations provoquant l'amplification d'altérations :

Nous ne citerons ici que quelques exemples assimilables à d'erreurs de conceptions ou de mise en œuvre qui provoquent l'amplification des altérations. D'autres exemples peuvent être cités (Winkler, 1973 ; Joway, 1985 ; Rautureau et Pierre, 1996), mais il s'agira d'observations locales (sollicitations architecturales spéciales, association de matériaux incompatibles…) que l'on ne peut généraliser.

Utilisation par erreur d'un roche présentant des défauts :

Les géomatériaux utilisés pour la construction sont des matériaux d'origine naturelle, ils ne sont donc pas parfaits ni totalement homogènes et présentent parfois des défauts. En effet, les roches ont subi depuis leur formation sédimentaire une longue histoire diagénétique et tectonique. Cette caractéristique est leur principal atout esthétique mais elle nuit à leur commercialisation, même si des normes de qualité et de mise en œuvre très strictes sont définies depuis de nombreuses années. Ainsi, à l'échelle d'une carrière ou

d'un banc, la roche n'est pas homogène et elle est susceptible de renfermer des défauts invisibles à l'œil nu (Joway, 1985), même à celui des artisans carriers et des tailleurs de pierre qui possèdent souvent une sensibilité aux défauts supérieure aux appareils et à l'analyse courante des géologues. Ainsi, dans une construction, il y a pratiquement toujours un ou plusieurs blocs qui présenteront une durabilité plus faible que les autres car ils contiendront des défauts : fils, fêlures, fines diaclases…

Normes d'utilisation des pierres de taille :

Les normes d'utilisation des pierre de taille sont désormais définies en fonction de la sensibilité de la roche aux cycles gel-dégel (Pellerin, 1978 ; Mamillan, 1985) et les caractéristiques des roches sont régulièrement vérifiées (en France, par le Centre d'Etudes des Bâtiments et des Travaux Publics). Les chartes d'utilisation pour la construction des roches calcaires tiennent principalement compte de la porosité totale de la roche et de son coefficient d'absorption, c'est à dire le volume des vides saturé en eau divisé par le volume total des vides (Mamillan, 1985, Auger, 1996). Ces caractères sont ensuite modulées selon les climats (en fonction du nombre de gels sévères qu'ils comportent) et les chartes d'utilisation aboutissent à des limitations des positions architecturales de mise en œuvre : élévation seule, pavage, corniche, balcon… Les limitations d'emploi des différentes pierres de taille sont généralement respectées (voir apr exemple à Reims, les principales positions d'emploi observées Fig. A10), mais elles sont parfois ignorées, ce qui provoque parfois d'importantes dégradations.

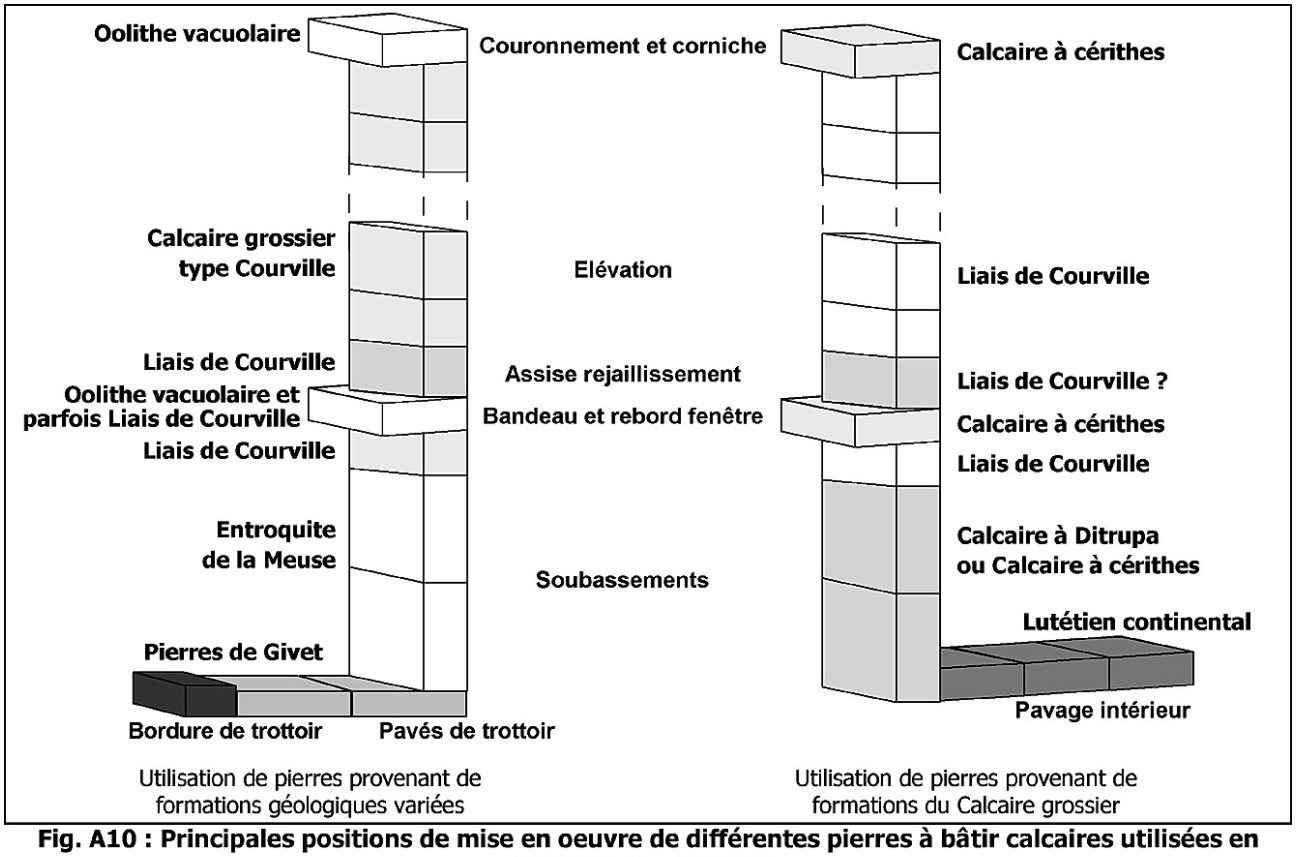


Fig. A10 : Principales positions de mise en oeuvre de différentes pierres à bâtir calcaires utilisées en Champagne-Ardenne

Les roches étudiées ici sont toutes considérées comme de bonnes pierres de taille dont la durabilité en œuvre est théoriquement élevée. Les détails des recommandations d'emploi et certains tests réalisés par le CEBTP sont mentionnés dans le chapitre 1 où nous caractérisons les pierre à bâtir étudiées. Seul le Liais de Courville fait l'objet d'une réelle limitation de ses aptitudes d'emploi : en climat Séquanien (avec quelques périodes de gel entre –2°C et –8°C), il ne doit pas être utilisé pour les bandeaux, balcons, corniches et rejaillissement (d'après CEBTP, 1964 ; in Noël, 1970). Nous verrons d'ailleurs que le non respect de ces conseils (notamment à Reims), entraîne une détérioration rapide du calcaire : par exemple avec la fréquente utilisation de ce faciès pour les rebords de fenêtre (reconstruction de la ville après la Première guerre mondiale).

Joints et mortiers :

Conçus dans le but de lier les éléments de constructions, les mortiers et les liants de maçonnerie peuvent amplifier les altérations en œuvre ou même être à l'origine de ces dégradations. En effet, d'une part ils sont généralement plus imperméables que la roche environnante et jouent le rôle de barrière de porosité, d'autre part, certains mortiers ont une composition chimique instable et peuvent recristalliser, provoquer des recristallisations ou des dissolutions (Furlan, 1990). Les barrières de porosité ont un impact néfaste sur une construction car elles bloquent les solutions salines et provoquent leur concentration et donc la cristallisation de sels (cf. cristallisations et recristallisations). La minéralogie du liant de maçonnerie peut influencer le comportement en œuvre d'une roche quand il contient un élément instable : sel, pyrite ou un élément intervenant dans les mécanismes d'altération, par exemple de la calcite si la roche liée est siliceuse.

Ainsi, pour limiter ces dégradations, les restaurateurs de monuments historiques utilisent des mortiers à minéralogie connue et stable : sans pyrite ni sels, dont la porosité globale est proche de la roche qu'ils appareillent (Jeannette, 1992b) et de composition chimique proche de la roche elle-même (Rautureau et al., 1996 ; 1999).

Impératifs modernes de construction et perte de savoir-faire :

La principale différence entre la mise en œuvre à l'ancienne et celle que l'on pratique actuellement se rapporte au temps de repos de la roche entre son extraction et sa mise en œuvre. En effet, par le passé, les blocs étaient souvent entreposés de longues années (voire plus de 10 ans) afin que la pierre ressuie et que le calcin protecteur se forme. De nos jours, la pierre ne sèche que quelques mois ou quelques années, et souvent, sa mise en œuvre peut suivre immédiatement son extraction. Le calcin jouant un rôle primordial dans le comportement en œuvre d'une roche calcaire, son plus faible développement peut nuire gravement à la durabilité de certains calcaires : Pierre de Courville ou Craie de Champagne en particulier.

Les artisans maçons ont depuis l'antiquité développé un savoir faire et des connaissance qui leur permettent (ou permettaient) d'améliorer la durabilité des matériaux. L'exemple le plus connu est celui des bains de chaux vive ou de lait de chaux (Gerdeaux, 1981 ; Jacquemin, 1981), qui amènent une remobilisation de la calcite et augmentent l'épaisseur du calcin protecteur. Ainsi, des blocs de craie traités aux bains de chaux ont une durabilité très importante : dans certains églises de Champagne, les murs d'exposition Nord, construits en craie traitée sont intacts après 3 siècles ; alors que les murs construits en craie non traitée se sont dégradés quelques années après la restauration.