

# Caractérisation de la Pierre de Courville (Lutétien, Marne, France). \*

## Relations entre diagenèse et propriétés pétrophysiques

Gilles FRONTEAU <sup>(1)</sup>

André PASCAL <sup>(1)</sup>

Vincent BARBIN <sup>(1)</sup>

*Characterization of Courville Stone (Lutetian, Marne, France). Relations between diagenesis and petrophysical properties*

Géologie de la France, 2002, n° 4, 51-59, 7 fig., 1 tabl.

Mots clés : Calcaire, Lutétien, Pierre taille, Microfaciès, Porosité, Diagenèse, Marne Département.

Key words: Limestone, Lutetian, Dimension stone, Microfacies, Porosity, Diagenesis, Marne France.

### Résumé

Le calcaire extrait de la carrière de Courville, dernière exploitation de pierre de taille du département de la Marne (51), appartient exclusivement aux Calcaires à miliolites et Orbitolites de la formation du Calcaire grossier (Lutétien moyen). Sur un front de taille d'environ 3 m d'épaisseur, seuls deux bancs sont actuellement commercialisés pour la mise en œuvre, les autres niveaux étant considérés comme gélifs.

L'étude sédimentologique montre que la succession des différents bancs est progressive et qu'il n'existe pas de discontinuité sédimentaire nette, à part une légère surface silicifiée au sommet de la carrière. Les différents bancs ont une nature globalement similaire (biomicrite ou biomicrosparite, wackestone à packstone), seule la variation de la taille des cristaux de la phase matricielle peut expliquer l'importante variabilité de la porosité allant de 13 % pour le banc de « Roche » à plus de 50 % pour le banc de « Four » (Fronteau, 2000).

L'utilisation conjointe du microscope optique (analyse sédimento-diagénétique et analyse d'images) et de mesures de porosité totale montre que tous les bancs

aptes à une mise en œuvre possèdent une micrite matricielle nettement recristallisée en microsparite (voire ponctuellement en sparite pour les bancs les plus durs), tandis que les bancs gélifs ont une matrice composée de micrite fine peu à pas recristallisée en microsparite.

Dans le cas de la pierre de Courville, la proportion de matrice micritique non recristallisée peut donc être mise en corrélation avec la microporosité du matériau (voire à la porosité totale du calcaire car la macroporosité y est faible à nulle). L'état diagénétique de la matrice micritique contrôle les propriétés pétrophysiques de ce géomatériau et son analyse sédimento-diagénétique permet donc de mieux comprendre le comportement en œuvre de ce type de calcaire.

### English abridged version

#### Introduction

The Courville limestone, from the vicinity of Reims (Fig. 1), forms part of a famous dimension stone formation, the "Calcaire Grossier", widely used in prestigious gothic monuments (such as the cathedrals of Paris, Laon, and Soissons - Blanc, 1998; Blanc and Gely, 1997). In the Champagne-Ardenne region, this

formation was intensively quarried from antiquity until the First World War; but now only the St. Julien quarry at Courville remains (Tourtebatte, 1995).

The "Calcaire Grossier" shows a large vertical and horizontal facies variability throughout the Paris basin (Gély, 1996). Near Reims, it is reduced to a thin sequence with two bioclastic limestone units: a lower unit containing quartz, *Ditrupa strangulata* and *Echinolampas calvimontanus* (the A6 sequence in Gely, 1996), and an upper unit containing *Orbitolites complanatus*, *Alveolinidae* and *Miliolidae* (Fig. 2).

#### Description of the Courville stratigraphic succession

Two cream-coloured beds are currently used in monuments: the "Liais", also called the "1/2 roche", at the base, and the "Roche" in the upper part of the quarry (Fig. 3). These two limestones are essentially bioclastic with a micritic matrix support; numerous foraminifera (*Orbitolites complanatus*, *Miliolidae*, *Alveolinidae*, *Rotalidae*) and calcareous algae (*Dasycladacea*) are observed, and it would appear that the Courville "Liais" is not very different from its Parisian

\* Manuscrit déposé le 12 septembre 2001, accepté le 6 février 2002.

(1) Laboratoire des Sciences de la Terre, Université de Reims Champagne-Ardenne, Centre de Recherches Agronomiques, 2 esplanade R. Garros, 51100 Reims. gilles.fronteau@univ-reims.fr

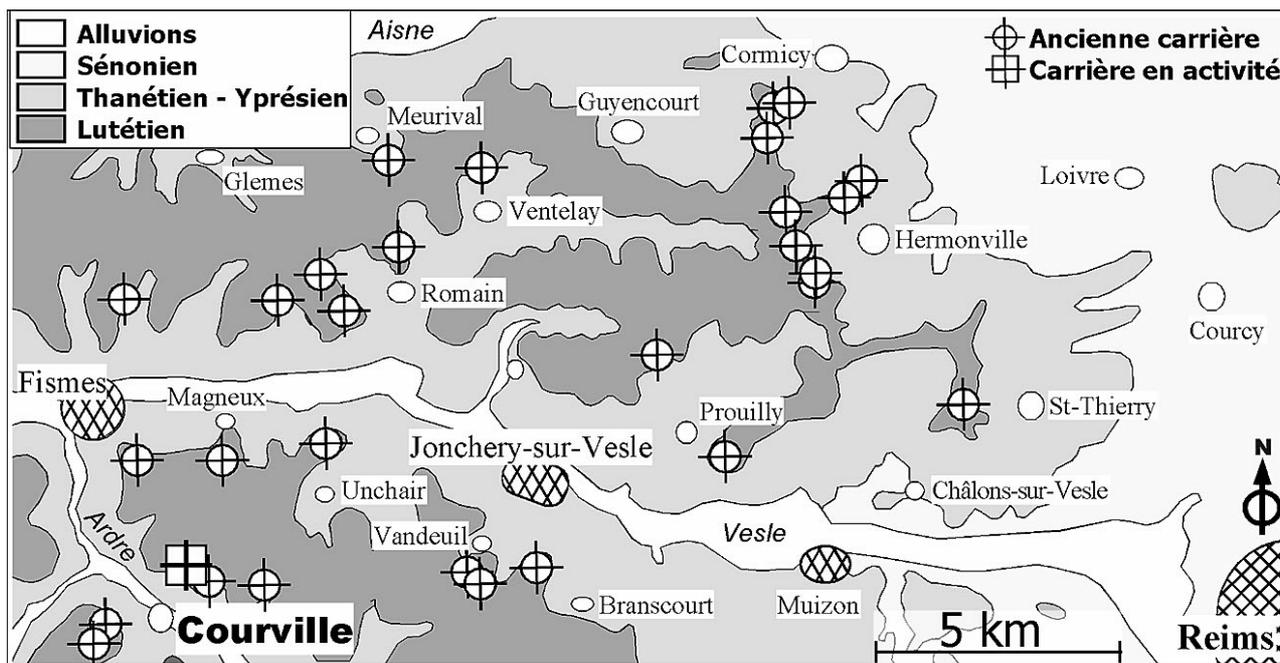


Fig. 1.- Les anciens sites d'exploitation de Calcaire grossier (Lutétien moyen) dans les environs de Reims (fond cartographique d'après Laurain et Barta, 1976).

Fig. 1.- Former "Calcaire grossier" (Middle Lutetian) quarries in the vicinity of Rheims (base map from Laurain and Barta, 1976).

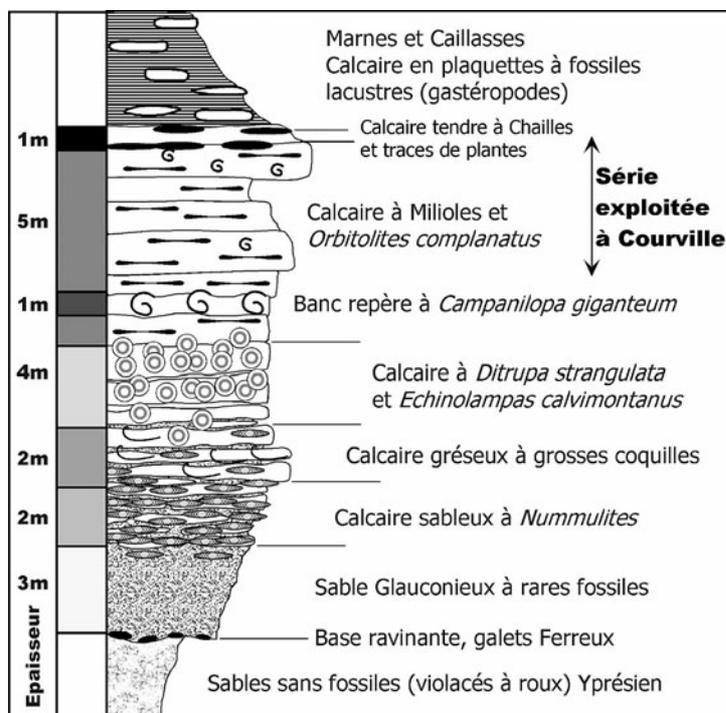


Fig. 2.- Série lithologique simplifiée des formations lutétiennes des environs de Reims.

Fig. 2.- Simplified lithological succession of the Lutetian formations in the vicinity of Rheims.

equivalent (Blanc et al., 1990). In the middle of the "Liais", a thin, blue layer (due to differential oxidation-reduction of iron oxides) can be seen; quarrymen and stonecutters claim that this specific blue layer, which in places is more than 10 cm thick, is harder than is typical for the "Liais", but we have found no normalized measurements to quantify this observation.

The micritic matrix within the two hard beds has been partly or totally recrystallized into microspar or sparite crystals, and some intragranular pores are filled with large moldic spar cements. Some soft interbeds exist between the two hard beds, but as they are easily cracked by frost, they are no longer used as building stone. The boundaries between the "Liais" and the overlying bed (called "Bousin") and between the interbeds are graded, in places over as much as 10 cm of sediment. The soft beds contain squashed and less diversified bioclasts (essentially Orbitolites complanatus and Miliolidae), and a greater quantity of small detrital quartz grains (about 10% of total volume). The matrix is clearly micritic with very little recrystallization (into microspar). The "Bousin" bed is overlain by two other soft beds known as the "Moellons" and

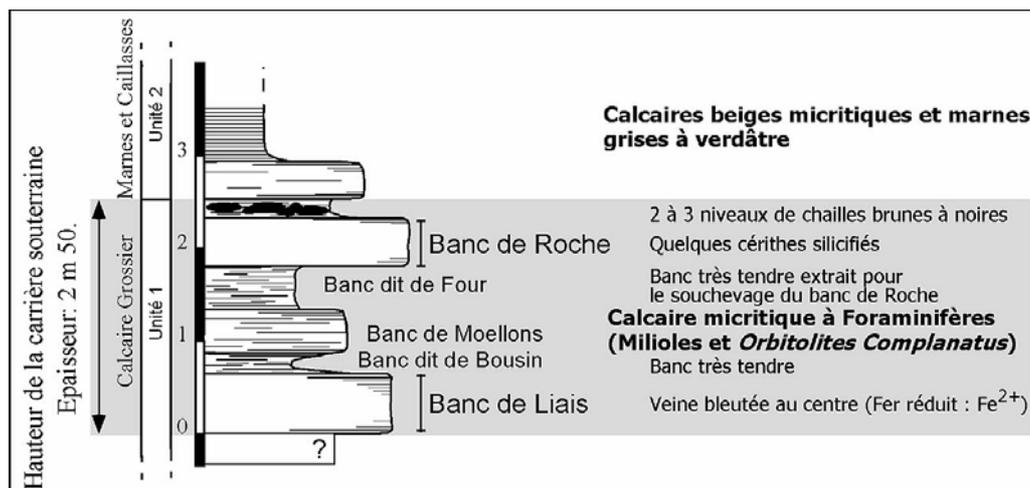


Fig. 3.- Log de la carrière Saint-Julien à Courville (51) avec dénomination des différents bancs. Calcaire grossier. Lutétien Moyen.

Fig. 3.- Log of the Saint-Julien quarry at Courville (Marne) indicating the different beds. "Calcaire grossier", Middle Lutebian.

"Oven" beds, the name of the latter deriving from its use during mining techniques (spear quarrying of the "Oven" bed leads to collapse of the overlying "Roche" bed).

As for the "Roche" bed at the top of the quarry, its microfacies (biomicrosparite with various foraminifera) is similar to that of the "Liais", with some silicification (related to chert from the upper part of this lithological series). The micritic matrix is largely recrystallized into microspar or spar calcite, and gastropod bioclasts seem to be more common than in the "Liais" bed.

### Petrophysical characterization of Courville Stone

Although only the two hardest limestone beds (the "Liais" and "Roche" beds) are currently used as building stone, others such as the "Moellon" bed were sometimes used in the past in local buildings. The Courville building stone is now used mainly for the restoration of Rheims cathedral and other prestigious monuments, but is also sold to the United States as a renowned and ancient building stone. The hard limestones are very similar from a sedimentological standpoint (biomicrosparite - packstone), but their petrophysical properties are different (Table 1): a porosity range from 13.5% ("Roche" bed) to 21.7% ("Liais" bed) allows us to quantify the classification used by quarrymen for these beds. Similarly, the difference between the hard beds and soft

beds ("Liais" and "Roche") and the soft beds ("Moellon", "Bousin" and "Oven"), is very marked from a petrophysical point of view, but less variable from a sedimentological point of view; for example, the porosity of the "Liais" ( $21.7\% \pm 0.9$ ) changes within 10 cm to 35% (top of bed) and then jumps to  $50.2\% \pm 2.6$  in the overlying "Bousin" bed.

Although the sedimentological microfacies of the various beds in the Courville quarry appear to be generally similar, the matrix shows recrystallization in the harder beds, whereas it is clearly micritic in the poor-quality beds.

### Relation between diagenetic state and porosity

Since comparison of the different matrix recrystallization states using light microscopy is unsatisfactory because of its subjectivity, we also used an image-analysis technique (with Microvision instrument™ image suite) called "ternary signature" (Fronteau et al., 1999b; Fronteau, 2000). The special feature of this technique is the ability to consider and quantify three phases in each image, and since the sum total is equal to 100, it can be represented on a ternary diagram. Sample signatures are obtained by repeated measurements on the same thin-section (about 25 to 40 image analyses for each sample).

Four kinds of sample were considered: "Liais" samples from the cream-coloured

area and from the blue seam, a soft and frost-susceptible "Bousin" sample from the "Bousin" bed, and lastly a sample from the "Roche" bed - the hardest variety quarried in the Courville area. With this image-analysis technique, thresholds are fixed; Phase A (mainly black) matches pixels between 0 and 95 (dark matrix, iron oxides and macroporosity: image capture in polarized light), Phase B matches pixels from 96 to 165 (micritic matrix, some bioclasts or glauconitic elements), and Phase C (mainly light) matches pixels between 166 and 255 (microspar, spar, quartz).

Signatures of all the Courville limestone samples plot close to one edge of the ternary diagram (Fig. 5), which indicates a Phase A close to zero. We found that meso- or macroporosity only represents 0.5 to 2.0% of the total volume (intragranular or moldic porosity, Choquette and Pray, 1970), and that the porosity of Courville building stone is mostly due to infra- or micropores (pore-throat size  $< 5 \mu\text{m}$ ). The main part of the Courville Stone's pore systems is represented by intramatrix pore types that cannot be observed using photonic microscopy. Relations between sedimento-diagenetic states and porosity variations can, however, be established from Hg-injection porosimetry or normalized measurements (hydrostatic weighing, NF B 10.503) and image analysis (quantification of micritic degree, Fig. 7).

The hardest limestones, which provide good building stone, have a significant percentage of Phase C (light-grey values, Figs. 5 and 6), which indicates a significant matrix recrystallization rating (from micrite to microspar or sparite), with a mean value of 35% for the cream-coloured "Liais" and 62% for the "Roche" and the blue-coloured "Liais". In contrast, the soft and porous beds (i.e. the "Bousin") have 77% to 93% Phase B indicating a large proportion of non-recrystallized primary matrix.

The blue-coloured "Liais" seam shows the same Phase B percentage as the "Roche" bed, and image analysis confirms the quarrymen's observations: recrystallization is best developed in the middle of the bed where the stone has the same behaviour as that from the "Roche" bed, the hardest of the Courville sequence.

A direct correlation thus clearly appears to exist between total porosity and the initial state of the matrix (Fig. 7). For the micritic limestones, quantification by image analysis may be directly linked to total porosity (even if, in practice, microporosity cannot be observed using a light microscope). Beds with dominant micritic features (such as the "Bousin" and "Four" beds) are porous and easily cracked by frost, unlike beds with dominant microsparitic features (such as the "Liais" and "Roche" beds), which are more resistant to frost.

Sedimento-diagenetic microfacies characterization allows us to predict the weathering behaviour of these limestones (Fronteau, 2000). Furthermore, diagenetic transformations and micritic matrix features may determine water and air permeability (Cérépi et al., 2000), which either allows or prevents salt penetration (gypsum, thenardite, etc.) and affects limestone resistance to weathering in urban areas (Phillipon et al., 1992).

### Cadre géographique et géologique

Le village de Courville se situe à une vingtaine de kilomètres à l'ouest de Reims, il possède la dernière carrière de pierre de taille du département de la Marne, notamment utilisée pour la restauration de la cathédrale de Reims. Le calcaire exploité appartient à la formation du

Calcaire grossier, datant du Lutétien moyen ; dans le Bassin de Paris, les affleurements et les carrières de cet étage s'observent dans les régions du Tardenois, du Laonnois, du Soissonnais, du Valois, du Parisis et du Vexin français (Blondeau, 1965). Depuis l'antiquité, ces niveaux calcaires du Tertiaire ont fourni les plus prestigieuses des pierres de taille (Blanc et Gély, 1997 ; Blanc, 1998 ; Fronteau, 2000) et ils sont entrés dans le vocabulaire courant : « Pierre à liards », « Caillasses d'Ile de France » et l'imaginaire collectif : carrières souterraines de Paris (Benoit et al., 2000), pierre de taille royale des cathédrales gothiques (Blanc et Lorenz, 1992), abri-refuges et hôpitaux souterrains de la première guerre mondiale...

En Champagne-Ardenne, la formation du Calcaire grossier se rencontre à environ 15 km à l'ouest de Reims, à la limite entre les départements de la Marne et de l'Aisne. L'épaisseur de la série lutétienne augmente rapidement vers l'ouest, la puissance des sédiments marins atteignant environ 40 m dans l'Oise (Blondeau, 1970) alors qu'elle se réduit à 15-20 m à Fismes, localité voisine de Courville (Laurain et Barta, 1973 ; Tourtebatte, 1995). Plus à l'est, à partir de Chamery (quelques kilomètres au sud de Reims) et sur la montagne de Reims, la série marine laisse place à des formations sableuses fluviales ou continentales comme les célèbres sables du « Tuffeau de Damery » (Gély, 1996).

Stratigraphiquement, le Lutétien de la région rémoise se découpe en 3 formations. La « Glauconie grossière » forme le cortège transgressif de base : base érosive, lits de graviers et de débris de fossiles décalcifiés surmontés d'un sable glauconieux à rares nummulites (Daubenfeld, 1967 ; Gély, 1996). Puis le faciès devient carbonaté avec le « Calcaire grossier » avec deux unités principales : les Calcaires à *Ditrupea strangulata* et *Echinolampas calvimontanus* : paraséquence A6 selon Gély (1996), surmontés des Calcaires à miliolites et *Orbitolites complanatus* d'où sont précisément issues les différentes pierres de Courville. Enfin, la formation des « Marnes et caillasses » termine le Lutétien local avec une alternance marno-calcaire, contenant des traces de plantes, des faunes de milieux lacustres et des lentilles de gypse (Laurain et Barta, 1973 ; Blondeau, 1965).

### L'exploitation du Calcaire grossier près de Reims

Les faciès du Calcaire grossier présentent une forte variabilité verticale et latérale, en quelques dizaines de kilomètres, l'épaisseur, la disposition et le nombre de bancs exploitables peuvent évoluer et prendre des noms différents. Cette forte hétérogénéité latérale, est liée à la nature du milieu de dépôt : mer peu profonde et environnements littoraux, présence d'un paléo-relief (Gély, 1996). Or la composition sédimento-diagenétique d'un calcaire conditionne directement ses propriétés pétrographiques (Cérépi et al., 2000). Et on constate que les différents niveaux du Lutétien ont été exploités pour répondre à des objectifs d'emploi variés (Blanc, 1998 ; Fronteau et al., 2001). Une même commune peut compter des carrières de sable glauconieux et de calcaire (Tourtebatte, 1995) ou des exploitations de plusieurs variétés de calcaires, aux couleurs et aux aptitudes d'emploi distinctes : statuaire, soubassement, élévation (Blanc, 1998 ; Fronteau, 2000). Nous pouvons d'ailleurs remarquer que ce très grand nombre d'appellations de pierres de taille se rencontre aussi au niveau des noms de bancs des carrières souterraines, avec une évolution complexe de la terminologie suivant les époques et les localités (Viré, 1997 ; Blanc et Gély, 1997).

Historiquement, le Calcaire grossier est exploité comme pierre de taille depuis l'antiquité. Blondeau (1970) cite le temple gaulois de Thiverny dans l'Oise (du V<sup>e</sup> siècle avant J.-C.) et des textes de Plin-le-Ancien qui indiqueraient l'existence du Liais de Senlis. Saint-Leu d'Esserent, dans l'Oise, fournissait des sarcophages à la Gaule Romaine (Bedon, 1984) et les différents niveaux du Lutétien furent utilisés à Reims pour de nombreux monuments gallo-romains (Porte de Mars), ainsi que pour des dalles funéraires sculptées (Fronteau et al., 2001). Au Moyen-Age, l'exploitation s'intensifiant, l'extraction à flancs de coteaux 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 les environs de Reims et de Courville, de nombreux sites d'extraction furent fermés lors de la Première Guerre

Mondiale (en 1914) et ne rouvrirent plus. Ces fermetures de carrières posèrent des problèmes lors de la reconstruction d'après-guerre, notamment à Reims, ville quasiment rasée, à la cathédrale ravagée (Dolfini, 1920).

À l'heure actuelle, les carrières exploitées sont en nombre de plus en plus limité : Saint-Pierre-l'Aigle (près de Soissons), Saint-Maximin, Saint-Leu et Saint-Vaast-les-Mello..., ce qui pose de réelles difficultés pour la restauration des monuments historiques. D'ailleurs, la carrière exploitée à Courville est la dernière carrière de pierre de taille de la Marne.

### Description de la série

Le banc de Liais (aussi parfois nommé  $\frac{1}{2}$  roche) se trouve à la base de la série exploitée, il présente une puissance apparente de 70-80 cm et un faciès latéralement homogène malgré la présence par endroits d'un niveau de couleur bleutée (trace d'oxydo-réduction différentielle). Le microfaciès est à matrice micritique nette mais celle-ci est généralement recristallisée en microsparite, voire en sparite ; il contient de très nombreux bioclastes (lamellibranches, gastéropodes, algues calcaires) et divers foraminifères : miliolles, *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. Le microfaciès du « Liais de Courville » est donc très proche de celui du Liais des carrières souterraines de Paris (Blanc *et al.*, 1990), mais la pierre elle-même est plus dure que son homologue parisien (Blondeau, 1970). Les fragments de coquilles de gastéropodes ont été dissous, la porosité moldique résultante est totalement obturée par de la sparite, de même de nombreux pores intragranulaires (loges de foraminifères) sont obturés par des cristaux de sparite. Ceci témoigne d'une phase de recristallisation sparitique postérieure à l'induration du sédiment et à la dissolution 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, notons que le Liais et la Roche (l'autre banc exploité pour la pierre de taille) contiennent des petits grains de quartz et de glauconie détritiques d'une taille moyenne de  $100 \mu\text{m} \pm 20$ .

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. La périphérie et les contours des bioturbations sont souvent soulignés par des oxydes de fer.

À 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 cm de moyenne, mais peut être totalement absente ou mesurer plus de 30 cm. Le Liais au niveau de la veine bleutée apparaît plus dur et plus résistant que le reste du banc de Liais (d'après le contremaître de l'exploitation et les tailleurs de pierre). Mais le calcaire ne présente aucune différence sédimentologique franche.

Un niveau beaucoup plus tendre surmonte le banc de Liais, il mesure environ 10-20 cm d'épaisseur, les carriers l'appellent le « Bousin ». L'évolution de la porosité aux limites inférieures et supérieures des bancs est progressive : en quelques centimètres pour la Roche et plus de 10 cm pour le passage du Liais au Bousin. Ce dernier est très gélif et totalement inapte à une mise en œuvre. Après l'extraction du banc de Liais (70 à 80 cm), celui-ci doit être débarrassé des deux niveaux de « Bousin » gélifs qui l'entourent, ce qui réduit le banc utilisable à une épaisseur de 50 à 55 cm. 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 est moins diversifié que celui du banc de Liais : seulement des grains de quartz (plus de 15 % du volume total) et des foraminifères écrasés et entassés dans le sens du litage (miliolles et *Orbitolites complanatus*). La phase de liaison est nettement micritique sans traces de recristallisation en microsparite.

Surmontant le Bousin, le banc dit de « Moellons » mesure une cinquantaine de centimètres d'épaisseur, ce banc biomicritique était débité pour servir de piliers et maintenir le ciel de la carrière en

place (technique d'extraction de hagues et bourrages, Tourtebatte, 1995 ; Benoit *et al.*, 2000). 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'observe pas dans le banc de Bousin). Au-dessus du banc de Moellons, se trouve le banc de Four, relativement tendre, il était extrait en premier (à la lance), puis défourné afin de permettre l'extraction du banc de Roche (qui s'effondrait par gravité : souchevage). Au microscope optique, sa nature se révèle identique à celle du banc de Bousin : biomicrite à petits éléments écrasés et nombreux petits grains de quartz ( $60 \mu\text{m} \pm 20$ ).

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*) qui contient légèrement 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. Par contre, la silicification est plus importante que dans le Liais, certainement en relation avec les chailles du banc terminal.

Le dernier banc visible, d'une vingtaine de centimètres d'épaisseur, est constitué d'un calcaire très tendre à rares miliolles. Il contient 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 précocement. Le toit de ce banc est donc une surface de ralentissement de la sédimentation (et une limite de séquence ?).

### Les pierres de Courville : types et caractéristiques pétrophysiques

Actuellement, seuls le Liais et la Roche sont exploités comme pierre à bâtir, le banc de Moellons, de durabilité moyenne n'est plus commercialisé. L'utilisation du Liais de Courville 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

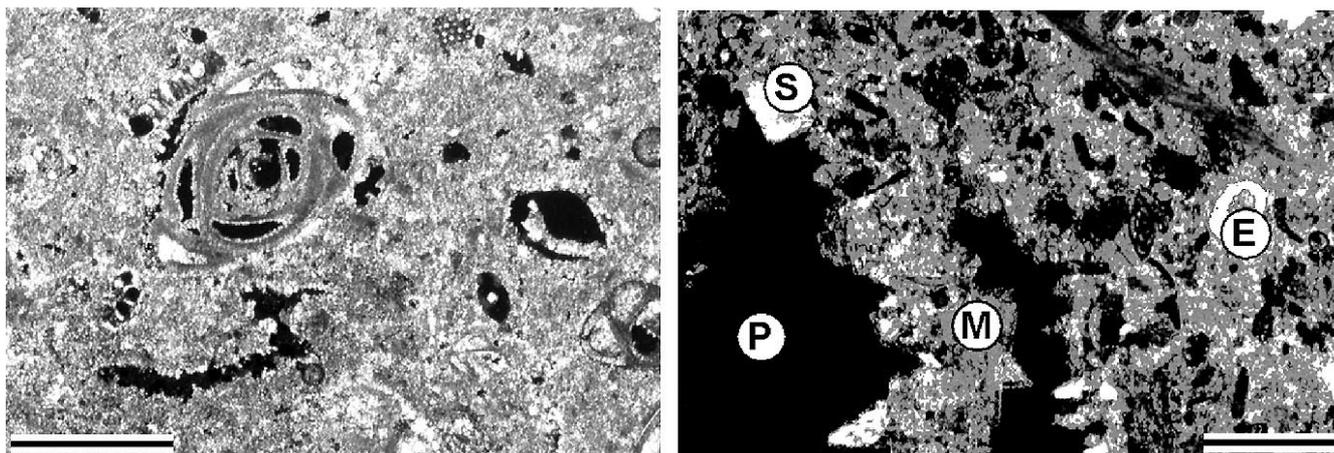


Fig. 4.- Microfaciès typique du banc de Liais (Carrière St-Julien – Courville).

- à gauche : vue en lumière polarisée analysée (barre d'échelle = 500 µm), à droite : image « ternaire » obtenue après seuillage de l'histogramme des niveaux de gris (barre d'échelle = 100 µm, P : macropore, S : sparite, M : micrite, E : élément figuré clair).

Fig. 4.- Typical microfacies of the "Liais" bed (St. Julien quarry, Courville).

Left: view under polarized light (scale bar = 500 µm); right: "ternary" image obtained after thresholding the grey-level histogram (scale bar = 100 µm, P: macropore, S: sparite, M: micrite, E: light-coloured element).

Echantillon	Porosité totale (%)	Vitesse du son (m/s)		Coefficient de saturation	
		Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal
Liais (URCA)	21,7 ± 0,9	/	/	Vertical	85 % ± 9
		/	/	Horizontal	83 % ± 3
Liais (CEBTP)	21,9 ± 0,6	Vertical	3 355	/	/
		Horizontal	3 520	/	/
Bousin (URCA)	50,2 ± 2,6	/	/	92 % ± 8	
Roche (URCA)	13,5 ± 1,4	3 733 à 4 394		Vertical	85 % ± 9

Tabl. 1.- Mesures pétrophysiques effectuées sur les Pierres de Courville. (URCA) : Coulon *et al.* 1998. (CEBTP) : rapport d'essai Nov. 1998

Table 1.- Petrophysical measurements made in the Courville Stone. (URCA): Coulon *et al.*, 1998. (CEBTP): test report, Nov. 1998.

destiné au dallage (pavements et marches d'escalier intérieur). Ces deux pierres ont une distribution internationale et sont toujours commercialisées outre-atlantique ; le volume estimé de calcaire utile extrait est d'environ 500 m<sup>3</sup>/an (Tourtebatte, 1995).

Les deux bancs exploités diffèrent très peu par leur contenu paléontologique et sédimentologique ; par contre, leurs caractéristiques pétrophysiques sont très dissemblables (porosité, vitesse des ondes acoustiques, tabl 1). Celles-ci permettent de comprendre les différenciations opérées par les carrières et notamment entre les bancs aptes à la mise en œuvre (Liais et Roche), les bancs gélifs (Bousin ou Four), ou simplement tendres (comme le banc dit de Moellons). Ainsi, dans une première approche, la caractérisation sédimentologique ne permet pas de comprendre l'im-

portante variabilité des caractéristiques pétrophysiques de ce calcaire (qui reste un calcaire micritique de texture wackestone à packstone, à grain fin, contenant milioles, *Orbitolites complanatus* et rares alvéolines).

Ainsi les différents bancs de la carrière de Courville ont des microfaciès relativement semblables (nature des éléments figurés, du contenu paléontologique, de la texture sédimentaire) et la variabilité microfaciologique paraît trop faible pour expliquer l'importante variabilité de la porosité (de 13,5 % à plus de 50 %). Mais, même si aucun ciment précoce sparitique n'est observé, et que les éléments figurés sont toujours supportés par une matrice micritique, on constate que le type de phase matricielle varie nettement d'un banc à l'autre : la matrice des bancs exploités pour la pierre de taille est nettement recrystal-

lisée en microsparite ou en sparite alors que celle des bancs gélifs est franchement micritique. Il faut donc se demander si la variabilité des propriétés pétrophysiques des calcaires de cette série ne pourrait s'expliquer par la plus ou moins intense recristallisation de la matrice micritique.

### Relation entre l'état de la phase matricielle et les propriétés pétrophysiques

À l'examen direct au microscope optique, la comparaison des différents états de recristallisation de la matrice micritique est relativement difficile à effectuer (car trop subjective et non quantitative). Nous avons donc utilisé en complément un logiciel d'analyse d'images (Aréas, développé par Microvision instruments) et appliqué la méthode des signatures ternaires (Fronteau *et al.*, 1999b ; Fronteau, 2000) (voir fig. 4.) Son originalité réside dans le fait que l'histogramme des niveaux de gris de chaque image analysée est affecté de 2 seuils, ce qui individualise 3 classes de pixels (nommées phases A, B et C). La somme de ces 3 valeurs étant égale à 100, on peut représenter la mesure dans un diagramme ternaire. La signature de l'échantillon, dite signature ternaire, s'obtenant finalement quand cette procédure est répétée un grand nombre de fois (au minimum 25, en moyenne 40 fois pour une même lame mince).

Quatre types d'échantillons ont été mesurés : 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 (banc très dur, 1Co9). Les trois phases mesurées correspondent respectivement à : Phase A (niveaux de gris de 0 à 95 : micrite sombre, oxydes de fer et macroporosité), Phase B (niveaux de gris de 96 à 165 : micrite, bioclastes bruns, quartz éteints, pelletoides et glauconie) et Phase C (niveaux de gris de 166 à 255 : microsparite, sparite et quartz éclairés). L'acquisition des images ayant été faite en lumière polarisée analysée, les macropores sont donc éteints et sur l'image analysée, les pixels correspondant à la macroporosité sont noirs (ici nous considérons que les pixels ayant un niveau de gris inférieur à 95 peuvent être de la macroporosité).

Les signatures ternaires des différents échantillons apparaissent toutes plaquées contre un bord du diagramme triangulaire, les pixels appartenant à la phase C (macroporosité et oxydes de fer) sont très peu nombreux : 2 % en moyenne pour le Liais et le Bousin, 0,2 % pour la Roche. En effet, la porosité de la Pierre de Courville est principalement composée de microporosité, non observable au microscope optique. Il s'agit d'une porosité intercrystalline (Choquette et Pray, 1970) localisée entre les nanograins de micrite ou de microsparite, les relations entre porosité totale et microfaciès ne peuvent donc être directement tirées de l'analyse d'images seule. Nous avons donc comparé les signatures des échantillons avec des mesures normalisées de porosité totale (ici par pesée hydrostatique, norme NF B 10.503, tabl. 1).

En observant les nuages de points par rapport aux deux autres axes du diagramme ternaire, la différenciation des différents échantillons est très nette :

- le banc de calcaire gélif (Bousin, 1Co5), dont la matrice est peu à pas recristallisée apparaît très homogène avec plus de 80 % de phase B (qui mesure principalement la micrite) et moins de 20 % de phase C (qui mesure principalement la quantité de sparite) ;

- les nuages de points des différents échantillons du banc de Liais de couleur crème apparaissent plus hétérogènes mais

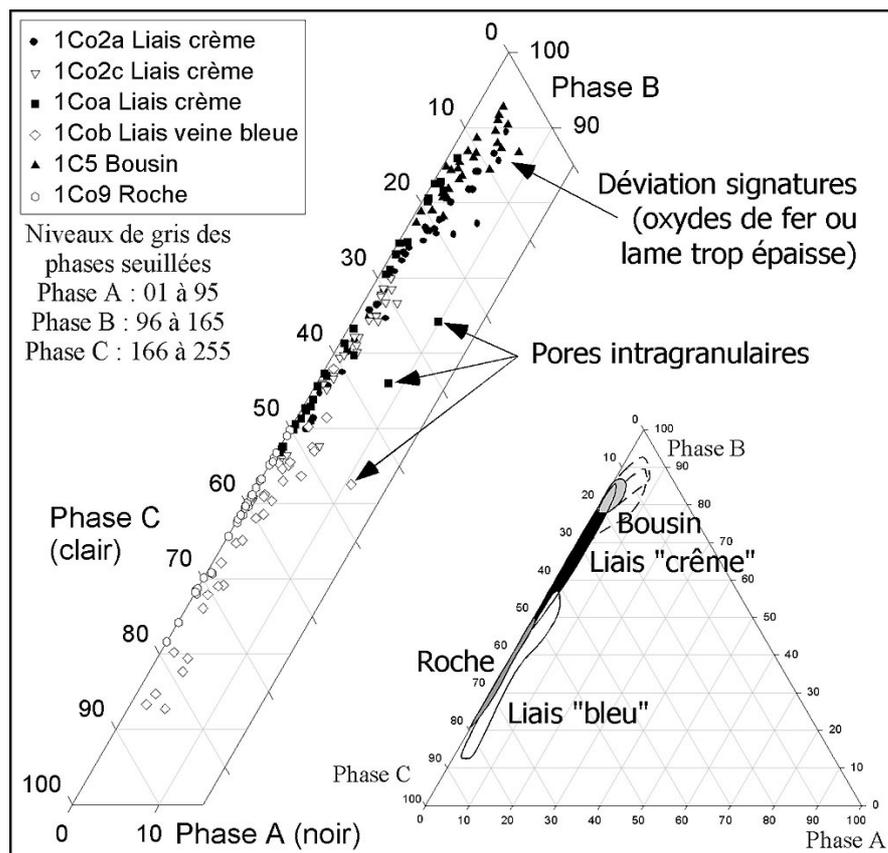


Fig. 5.- Discrimination par analyse d'images des microfaciès des différents bancs de la carrière St-Julien, Courville (51). Signatures ternaires.

- à droite diagramme ternaire complet, à gauche détail selon le côté Phase A – Phase B

Fig. 5.- Image-analysis discrimination of the microfaciès in the different beds of the St. Julien quarry at Courville (Marne). Ternary signatures.

Right: full ternary diagrams; left: detail of the Phase A – Phase B side.

avec des valeurs comprises entre 20 et 50 % de phase C. La moyenne de chaque échantillon étant toujours située entre 25 et 40 % et la moyenne globale des échantillons étant de 35 % ;

- l'échantillon du banc de Roche (le calcaire le plus résistant) contient encore plus de phase C (sparite) et réciproquement moins de phase B (micrite), le nuage de points se situe entre 50 et 80 % de phase C pour une moyenne de 62,5 % ;

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

Ainsi, à partir de la semi-quantification par analyse d'images et de

mesures de porosité totale, une corrélation directe entre l'état de recristallisation de la phase matricielle (fig. 5 et 6) et les caractéristiques pétrophysiques de la roche (tabl. 1) peut être établie (fig. 7).

La porosité totale des différents bancs est directement proportionnelle au pourcentage de phase micritique. Les bancs aptes à une mise en œuvre : le Liais (porosité 21 %) et la Roche (porosité 13 %) se différencient des bancs gélifs, tels le Bousin (porosité 50 %), par une recristallisation importante de la micrite matricielle en microsparite voire en sparite. Les bancs tendres et gélifs ont conservé une importante microporosité primaire (pores d'une taille inférieure à 5 µm), cause de leur faible durabilité. À l'inverse, les bancs les plus recristallisés et les plus résistants possèdent une plus faible proportion de matrice micritique non recristallisée.

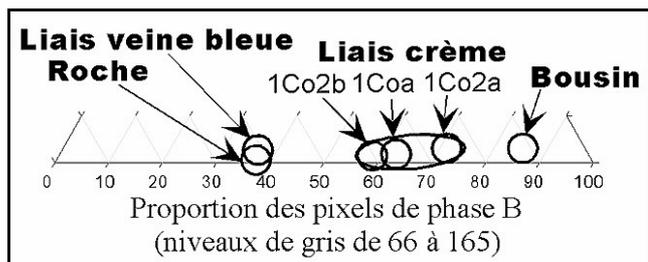


Fig. 6.- Discrimination par analyse d'images des microfaciès des différents bancs de la carrière St-Julien, Courville (51). Signatures ternaires moyennes.

Fig. 6.- Image-analysis discrimination of the microfacies in the different beds of the St. Julien quarry at Courville (Marne). Average ternary signatures.

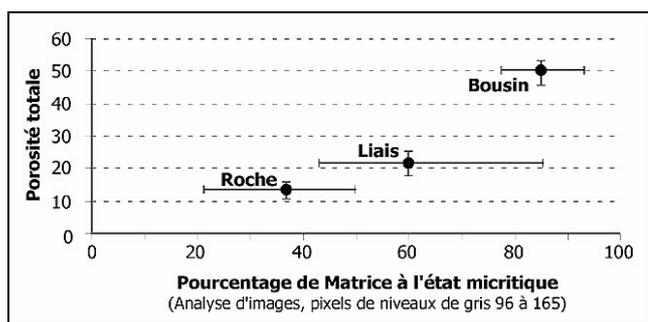


Fig. 7.- Relation entre la porosité totale et l'état micritique de la matrice des différents bancs de la carrière St-Julien. Courville (51).

Fig. 7.- Relation between total porosity and the micritic state of the matrix in the different beds of the St. Julien quarry at Courville (Marne).

D'ailleurs, nous avons mentionné que les carriers et les tailleurs de pierre considèrent que la veine de couleur bleu-gris au centre du banc de Liais est plus résistante que le reste du banc (de couleur crème). Et effectivement, l'analyse d'images montre que celle-ci présente un pourcentage de phase sparitique quasiment similaire à celui du banc de Roche (le plus dur de la série). Cette dureté plus importante est donc liée à une recristallisation croissante de la micrite depuis les limites du banc vers son centre, pour une valeur maximale d'ailleurs équivalente à celle mesurée pour le banc de Roche. Ces recristallisations calcitiques à l'origine des durcissements (ainsi d'ailleurs que les silicifications) sont certainement dues à

des effets de diagenèse différée ou tardive (remobilisation des fluides interstitiels saturés).

## Conclusion

Le Calcaire grossier, formation stratigraphique d'âge Lutétien moyen, a fourni de prestigieuses pierres de taille, aux qualités pétrophysiques variées. Dans la région de Reims, seule la carrière de Courville fournit encore deux types de calcaires, utilisés notamment pour la restauration des différents monuments historiques de la ville de Reims. Et, même, si la série exploitée est relativement faible (environ 3 m d'épaisseur), on constate que les différents bancs possèdent des caractéristiques

pétrophysiques très différentes (porosité de 13 % pour le banc de Roche contre plus de 50 % pour le banc dit de Bousin). Or, tous les bancs exploités appartiennent à la même unité stratigraphique : le calcaire à miliolites et *Orbitolites complanatus*, et l'examen sédimentologique montre que les microfaciès sont semblables : un calcaire fin, à matrice micritique, à foraminifères, dasycladales et rares éléments détritiques (quartz et glauconie) de texture wackestone à packstone.

Les relations entre microfaciès et propriétés pétrophysiques peuvent être mises en évidence par l'utilisation de l'analyse d'images, qui complète et matérialise les observations diagénétiques (méthode des signatures ternaires). La porosité totale de ces calcaires a été directement mise en corrélation aux proportions de micrite non recristallisée, dont la microporosité intercrystalline initiale est préservée.

La gélivité des différents calcaires de la carrière de Courville est donc conditionnée par l'état de la phase matricielle et par la microporosité primaire (Fronteau, 2000) : les micropores piègent l'eau et la formation de glace provoque un écaillage rapide. Le comportement en œuvre de ce calcaire est donc principalement contrôlé par son évolution diagénétique, plus que par sa composition sédimentologique. D'autant plus que le caractère micritique de la matrice augmente la sensibilité du calcaire aux effets néfastes de la pénétration des sels : gypse, thénardite... (Philippon *et al.*, 1992) et favorise le développement des desquamations (Fronteau *et al.*, 1999c).

Cette mise en relation entre l'état diagénétique de la phase de liaison et la quantité de microporosité est donc déterminante dans la compréhension de la variabilité des propriétés pétrophysiques (Cérépi *et al.*, 2000) ou des processus d'altération qui affectent ce type de calcaire (Fronteau, 2000).

## Références bibliographiques

- Bedon R. (1984) - Les carrières et carriers de la Gaule Romaine. Les carrières dans l'histoire. Ed. Picard, 165 p.
- Benoit P., Blanc A., Gély J.-P., Guini-Skliar A., Obert D., Viré M. (2000) - La pierre de Paris. Méthode d'extraction de la pierre à bâtir depuis son extraction jusqu'à sa mise en œuvre. Mém. 3 du musée d'Argentomagus. 18<sup>e</sup> Suppl. Revue archéo. Centre de la France. Actes du Colloque d'Argentomagus : la pierre dans la ville antique et médiévale. 30 et 31 mars 1998. Ed Lorenz J., Tardy D. et Coulon G., 121-158.
- Blanc A. (1998) - La pierre et les carrières à Laon et dans le Laonnois. *Bull. Inf. Bass. Paris*, 35, (3), 9-15.

- Blanc A., Gély J.-P. (1997) - Le Lutétien supérieur des anciennes carrières de Paris et de sa banlieue : essai de corrélation lithostratigraphique et application à l'archéologie. Journées Claude Lorenz, novembre 1995, 175-181.
- Blanc A., Lorenz C., Viré M. (1990) - Le Liais de Paris et son utilisation dans les monuments. 115<sup>e</sup> Congrès national des sociétés historiques et scientifiques, Avignon, 247-259.
- Blanc A., Lorenz C. (1992) - Ile-de-France et Champagne. Terroirs et monuments de France, Ed. C. Pomerol, 1, 111-138.
- Blondeau A. (1965) - Le Lutétien des bassins de Paris, de Belgique et du Hampshire, étude sédimentologique et paléontologique. Thèse, Paris, 465 p.
- Blondeau A. (1970) - Le calcaire grossier du Bassin de Paris. *Bull. BRGM*, II, (4), 7-17.
- CEBTP (1998) – Rapport d'essai, Pierre de Courville Liais. Direction régionale Île de France, Saint-Rémy-les-Chevreuse. Rapports 98/B182-6-399A et B, 7 p.
- Cerpi A., Humbert L., Burlot R. (2000) – Effets de la texture pétrographique sur les propriétés pétrophysiques d'un calcaire en zone de diagenèse météorique (calcaire oligocène d'Aquitaine, France). *Bull. Soc. géol. Fr.*, **171**, (4), 419-430.
- Choquette P.W., Pray L.C. (1970) - Geologic nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates. *Bull. AAPG*, **54**, (2), 207-250.
- Coulon M., Boucheret J., Tetard J., Waechter A., Aupretre J., Detallante D., Menis B. (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. IUT Léonard de Vinci, URCA, 16 p.
- Daubendfeld N. (1967) - Contribution à l'étude du Lutétien de la feuille au 1/50 000 de Craonne. DEA Reims, Faculté des Sciences, 2 vol : Texte puis Atlas, 60 p.
- Dolfini L. (1920) - Recherches de Carrières. Reims, Rapport Ministère de l'Instruction Publique et des Beaux Arts, Architecte en chef. Mr Deneux, 21 p.
- Fronteau G. (2000) - Comportements tégénétiques des principaux calcaires de Champagne-Ardenne en relation avec leur faciès de dépôt et leur séquençage diagénétique. Thèse Doctorat Université Reims, Sciences de la Terre, Reims, 312 p.
- Fronteau G., Barbin V., Pascal A. (1999a) - Analyse d'images et études sédimento-diagénétiques de microfaciès : un véritable outil descriptif. 7<sup>e</sup> Congrès de Sédimentologie, Nancy, ASF, 159-160.
- Fronteau G., Barbin V., Pascal A. (1999b) - Microfaciès characterization of heterogeneous limestones by image analysis, relation with quarry sites: some building stones from the Paris basin. *Geovision 99*, Liège (Belgique), 97-100.
- Fronteau G., Barbin V., Pascal A. (1999c) – Impact du faciès sédimento-diagénétique sur l'altération en oeuvre d'un géomatériau. *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **328**, 671-677.
- Fronteau G., Paicheler J.C., Berthelot F. (2001) - Différenciation pétrographique d'éléments de construction en pierre calcaire : utilisation couplée de l'analyse sédimentologique et de l'analyse d'images (Reims, site gallo-romain). Congrès Archéométrie 2001, La Rochelle.
- Gély 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), 2-37.
- Laurain M., Barta L. (1976) - Fismes 1/50 000. Carte géologique et notice, BRGM, 26 p.
- Laurain M., Barta L. (1973) - Faciès marins et lacustres de l'Eocène Tardénois. *Ann. Sci. Univ. Reims*, 11, (3-4), 69-79.
- Philippon J., Jeannette D., Lefevre R.A. (1992) - La conservation de la pierre monumentale en France. Presses du CNRS, Paris, 267 p.
- Tourtebatte P. (1995) - La pierre de Courville. *Carrière et Scierie de l'Ardre*, 16 p.
- Viré M. (1997) - Le nom des bancs exploités dans le calcaire grossier à Paris : étymologie et géologie. Journées Claude Lorenz, novembre 1995, 183-186.