

LABORATOIRE DE GEOLOGIE DES ENSEMBLES SEDIMENTAIRES
Equipe de géologie appliquée au génie civil
Université de Nancy I



CONSEIL GÉNÉRAL DES VOSGES

LES GÉOMATÉRIAUX UTILISÉS PAR LES ROMAINS POUR L'AMÉNAGEMENT DU SITE DE GRAND

- Localisation des carrières en fonction de la typologie des ouvrages
- Contribution à la connaissance de la vulnérabilité de certains calcaires mis en oeuvre, aux contraintes du climat.

*** DIPLOME DE RECHERCHES DOCTORALES ***

soutenu le 13 octobre 1995

par Jean-Michel MECHLING.

JURY:

HAGUENAUER B., Professeur, Université Henri Poincaré-Nancy I.

CLERMONTÉ J., Professeur, Université Henri Poincaré-Nancy I.

Mme PIERSON-BRAGARD G., Directeur de l'Enseignement, de la Vie associative
et culturelle, Conseil Général des Vosges.

DELETIE P., E.D.F. / Mécénat Technologique et Scientifique, Paris.

GOLVIN J-C., Directeur de Recherche, C.N.R.S., Paris.

LE ROUX J., Maître de Conférence, Université Henri Poincaré-Nancy I.

PREMIÈRE PARTIE

INTRODUCTION, Objectifs du D.R.D.....	4
I) LOCALISATION DES CARRIÈRES EN FONCTION DE LA TYPOLOGIE DES OUVRAGES	5
<u>A) Cadre géologique général</u>	<u>5</u>
1) Aperçu paléogéographique	5
2) Stratigraphie	6
<u>B) La série lithostratigraphique locale (environs de Grand)</u>	<u>7</u>
1) Description des faciès rencontrés.....	7
a) Les faciès de l'Oxfordien des environs de Grand	9
b) Corrélations avec les faciès rencontrés plus au nord (carte géologique de Toul)	11
2) Construction d'une carte de répartition des faciès.....	12
a) Construction de cartes en isohypses.....	12
b) Allure générale des isohypses: commentaires	12
c) Dessin de la carte de répartition des faciès	15
<u>C) Pétrographie des blocs de l'amphithéâtre</u>	<u>15</u>
1) Le prélèvement des échantillons de l'amphithéâtre.....	15
2) Étude macroscopique des blocs de l'amphithéâtre	16
3) Étude microscopique des blocs de l'amphithéâtre	17
a) Le faciès graveleux à oïdes micritiques, et tendance pisolithique (photo fig. 9)	17
b) Le faciès oolithique (photo fig. 10)	17
<u>D) Essai de localisation de la provenance des géomatériaux de l'amphithéâtre</u>	<u>18</u>
<u>E) Conclusion : provenance des géomatériaux de l'amphithéâtre</u>	<u>19</u>

DEUXIÈME PARTIE

II) CONSTAT DE LA VULNÉRABILITÉ DES GÉOMATERIAUX AUX INTEMPÉRIES: Statistiques concernant la répartition de l'altération	24
<u>A) Vulnérabilité des blocs en fonction de leur épaisseur</u>	<u>25</u>
<u>B) Vulnérabilité des blocs et exposition aux intempéries</u>	<u>26</u>
<u>C) Vulnérabilité des blocs et position verticale dans les contreforts et façades</u>	<u>28</u>
<u>D) Observation des différents degrés d'altération des blocs</u>	<u>30</u>
<u>E) Conclusion</u>	<u>30</u>

III) IDENTIFICATION DES FACTEURS RESPONSABLES DE LA VULNÉRABILITÉ DES BLOCS DU GRAND APPAREIL DE L'AMPHITHÉÂTRE	31
<u>A) La dédolomitisation</u>	31
1) Colorations sélectives à l'Alizarine rouge S	31
2) Observation au microscope optique	32
a) Les blocs sains	32
b) Aspect des cristaux de dolomite des blocs altérés	33
3) Observation au Microscope Electronique à Balayage	33
a) Teneur en magnésium de la dolomite	34
b) Répartition du calcium-magnésium dans la dolomite	34
c) Analyse de la phase cimentant les pores losangiques	35
d) Géométrie des pores	36
4) Conditions de stabilité de la dolomite	37
5) Mesures de porosimétrie	38
6) La dédolomitisation et l'altération des blocs	38
<u>B) Le rôle des argiles</u>	38
1) Mesure du pourcentage d'insolubles	38
a) Extraction des insolubles par centrifugation	38
b) Calcimétrie	39
c) Conclusion	39
2) Diffractogramme des argiles	39
a) Méthodologie	39
b) Dépouillement des résultats	39
c) Analyse des résultats	40
d) Conclusion	40
<u>C) Les joints stylolithiques</u>	41
1) L'action des joints stylolithiques dans le délitage	41
2) Différents comportements mécaniques des joints stylolithiques	43
3) Les différents joints stylolithiques observables dans le secteur de Grand	44
4) Conclusion	45
<u>D) La charge mécanique exercée sur les blocs</u>	45
1) Effets apparents de la charge mécanique	45
2) Essais mécaniques	45
a) Résistance à la compression et à la traction	46
b) Voies de recherche	47
3) Conclusion	47
E) Essai de reconstitution de l'histoire de la roche des blocs en grand appareil, et altération	48
1) Les grandes étapes de l'histoire de la roche	48
2) Interprétation : les mécanismes de la détérioration de certains blocs	51
<u>F) Conclusion</u>	51
IV) CONCLUSION GÉNÉRALE	53
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
ANNEXES	18 pages (de I à XVIII)

AVANT-PROPOS

Au terme de cette étude, je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont aidé dans mon travail de recherche.

Consacrée au Site de Grand, cette recherche n'aurait pu voir le jour sans la reconnaissance du Conseil Général des Vosges et j'exprime toute ma gratitude à M. le Président Christian Poncelet pour l'accueil réservé à mon étude.

Je remercie vivement et exprime ma profonde gratitude à M. le Professeur Haguenauer, qui m'a accueilli dans son laboratoire et a encadré ce travail tout au long de l'année. J'ai bénéficié de son expérience professionnelle, en ce qui concerne le contact avec les entreprises.

Je remercie beaucoup M. Pierre Delétie qui, conjointement avec M. Haguenauer, m'a proposé ce sujet de géologie appliquée à des études archéologiques.

Je tiens également à remercier :

- Abdollah Sadeghi, étudiant en thèse au laboratoire, avec lequel j'ai mené une grande partie des travaux de terrain et certaines études présentées dans ce mémoire. Je lui souhaite bonne chance et bonne continuation pour le travail qu'il effectue sur l'étude géomécanique des roches de l'amphithéâtre de Grand.

- Tous les chercheurs , en particulier, MM. Coiffait, Fauvel, Lathuilière, Le Roux, M^{lle} Hanzo, et les collègues étudiants qui m'ont aidé à un moment ou à un autre, pour des problèmes relatifs à la géologie ou à l'informatique.

- Le personnel du GES, pour les relations chaleureuses et amicales qui ont été entretenues durant l'année, et notamment Mmes Retournaud et Marchal pour leur disponibilité permanente.

- Les personnes du "Site de Grand-Conseil Général des Vosges" et de la D.R.A.C. Lorraine, et plus particulièrement M. Jean-Paul Bertaux et son épouse Chantal pour leur aide technique et matérielle.

- Valérie Bertaux et Laurence Maillot, qui avec Jean-Paul et Chantal Bertaux se sont proposés pour relire et vérifier la forme du mémoire.

Je remercie enfin M. le Professeur Clermonté, Mme Pierson-Bragard, M. Golvin et M. Le Roux, d'avoir bien voulu se joindre à MM. Haguenauer et Delétie dans le jury du D.R.D., tout en proposant les corrections de fond, du mémoire.

INTRODUCTION, Objectifs du D.R.D.

Grand est un village de 540 habitants du département des Vosges, distant d'une vingtaine de kilomètres de Neufchâteau. D'un point de vue géologique, Grand est situé à l'est du bassin parisien, sur le plateau calcaire oxfordien de la Côte de Meuse. Ce site archéologique abrite un ancien sanctuaire romain comportant d'importants vestiges tels les 14 kilomètres d'aqueducs souterrains qui convergent vers l'actuelle église, une mosaïque de 224 m², et un amphithéâtre semi-elliptique de 148m de grand axe, d'une capacité originelle de 17000 places (COLLECTIF, 1993).

La présente étude se subdivise en deux parties. Il s'agit d'une part de déterminer la provenance des géomatériaux romains utilisés dans l'amphithéâtre, par le biais d'une étude pétrographique comparative des blocs de l'amphithéâtre et de la série lithologique locale. Cette première partie permet également d'apprécier la distribution des différents matériaux suivant la typologie des ouvrages.

La seconde partie s'intéresse plus particulièrement aux ouvrages de l'amphithéâtre construits en "grand appareil", en raison de leur altération très avancée. L'étude vise à rechercher dans un premier temps les causes probables de cette détérioration. La totalité des blocs n'est pas affectée avec la même intensité. La compréhension de cette particularité permettra donc de mieux comprendre l'interdépendance des différentes causes de l'altération.

Cette étude de l'amphithéâtre de Grand a donc pour double objectif de cerner la provenance des géomatériaux antiques et de comprendre l'altération au cours du temps de certains d'entre eux.

PREMIERE PARTIE

I) LOCALISATION DES CARRIERES EN FONCTION DE LA TYPOLOGIE DES OUVRAGES

Un aperçu rapide de l'amphithéâtre de Grand montre que celui-ci est entièrement construit à partir de matériaux calcaires. La géologie régionale étant elle aussi calcaire, on se propose de partir de l'hypothèse selon laquelle l'amphithéâtre a été édifié avec des matériaux locaux. Cerner leur provenance revient à :

- connaître avec précision les différents faciès calcaires du secteur ainsi que leurs répartitions stratigraphique et géographique.
- caractériser les différents types pétrographiques de roches employés dans l'amphithéâtre.

Il devrait ainsi être possible de localiser d'anciennes carrières, ou à défaut les niveaux géologiques exploités, si ces dernières ont été complètement recombles.

A) Cadre géologique général

1) Aperçu paléogéographique

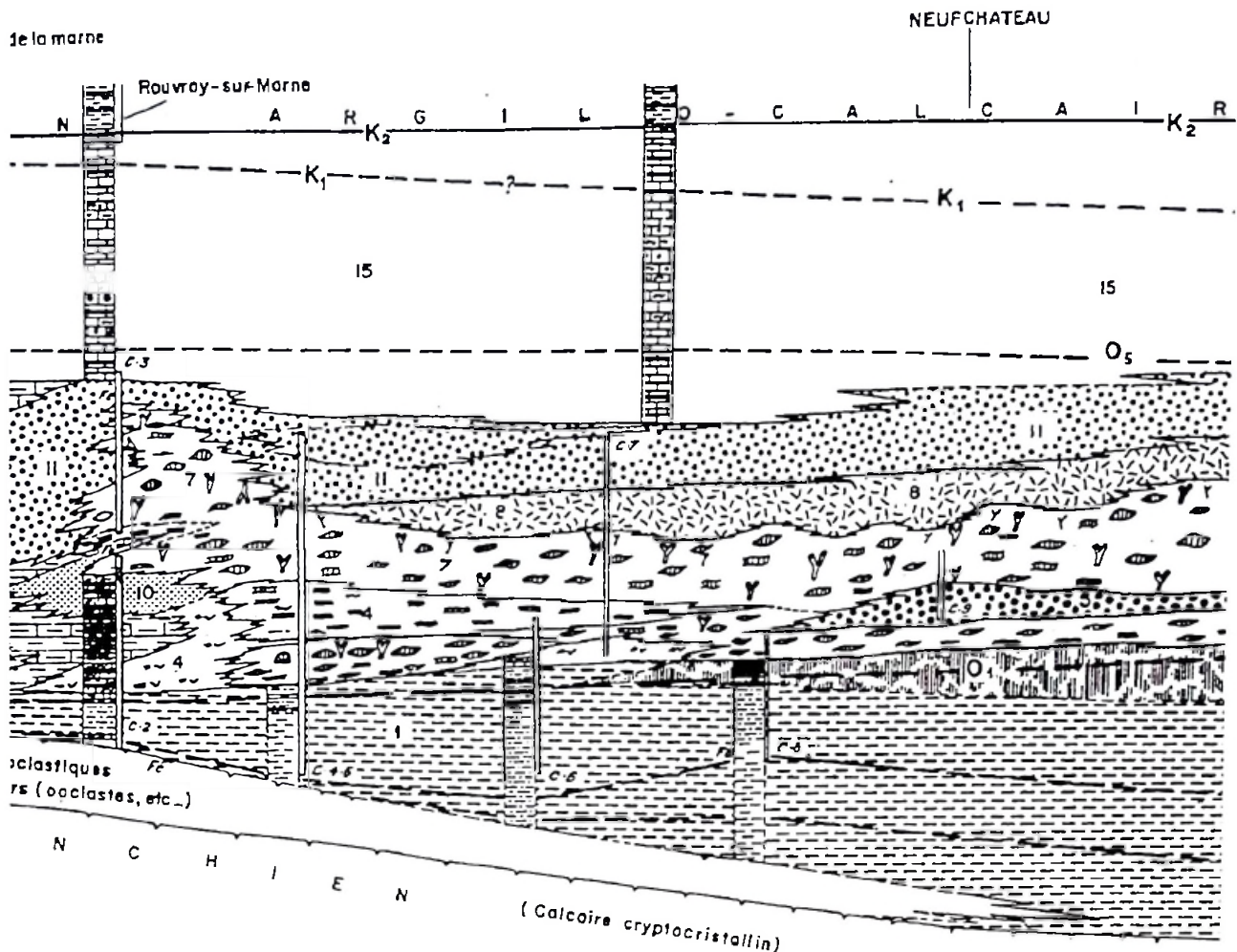
La série carbonatée étudiée dans ce travail appartient à l'Oxfordien de la partie orientale du bassin de Paris, et plus précisément à la partie sud de la plateforme carbonatée lorraine.

L'évolution de la sédimentogénèse de la plateforme lorraine évolue suivant quatre périodes (HUMBERT 1971):

- période 1: prérécifale (du Callovien à la partie moyenne de l'Oxfordien inf.).
- période 2: colonisation récifale (pendant la durée de la partie moyenne de l'Oxfordien inf.).
- période 3: expansion récifale (de l'Oxfordien inf. à la partie moyenne de l'Oxfordien sup.).
- période 4: comblement (pendant la durée de la partie supérieure de l'Oxfordien sup.).

Durant la première période, on passe d'une sédimentation argileuse à une sédimentation mixte argilo-calcaire ayant souvent subi une silicification. Les deux périodes suivantes, la colonisation et l'expansion récifale, donnent des ensembles carbonatés qui sont le siège de la constitution de biostromes à structure confuse et enchevêtrée. Pour terminer, le comblement se caractérise par le recouvrement du récif par des vases calcaires ou des épandages progradants de sables calcaires (HUMBERT 1971).

Ce contexte paléogéographique particulier induit une structure complexe et une grande variété de faciès dans la partie supérieure de la coupe stratigraphique des environs de Grand (cf. § I, B, 1, "Description des faciès"). Il peut également être la cause des allures assez différentes des isohypses qui ont été tracées (cf. fig. 4). On notera que la zone étudiée est proche de l'avant récif de la plateforme carbonatée. Celui-ci se situe au niveau de la vallée de la Marne, une vingtaine de kilomètres à l'ouest (coupe de synthèse ci-après, fig. 1).



- 1 -> Argile gris foncé ou noire plus ou moins carbonatée et sableuse, type "argile de la Woëvre".
- 2 -> Alternance de bancs décimétriques très irréguliers de calcaire gris argilo-sableux, bioclastique et de niveaux centimétriques ou décimétriques argilo-calcaires gris foncé. "Chailles oxfordiennes".
- 4 -> Zone construite à polypiers lamellaires et lenticulaires en position de vie. Liant : calcaire gris bioclastique à ciment cryptocristallin et feuillets argileux gris foncé irrégulièrement enchevêtrés. Il existe deux variantes : -calcaire fin bioclastique à débris de polypiers très abondants -zone construite à polypiers lamellaires et lenticulaires, ciment cryptocristallin à tendance crayeuse.
- 5 -> Calcaire beige-brun à grains ferrugineux (oclastes) bioclastiques et à ciment microcristallin.
- 7 -> Zone construite supérieure à polypiers divers, en position de vie, lenticulaires massifs, en boule, lamellaires et rameux. Liant : calcaire plus ou moins granulaire, bioclastique à ciment crypto-crayeux.
- 8 -> Calcaire blanc cryptocristallin crayeux en bancs centimétriques ou décimétriques réguliers à surface plane, type "calcaire de Sorcy".
- 15 -> Calcaires supérieurs indifférenciés, à grains divers et bioclastiques.

fig. 1: Variations latérales des différents ensembles oxfordiens formant la Côte de Meuse au niveau de Neufchâteau (extrait de la planche n° 90, thèse HUMBERT 1971)

2) Stratigraphie

Les terrains sédimentaires rencontrés sur la Côte de Meuse et son revers sont d'âge Oxfordien à Kimméridgien et on retrouve leur position dans l'échelle de temps géologiques sur la figure suivante (fig. 2).

D'après la carte géologique au 1/50 000 réalisée par P-L. MAUBEUGE (feuille de Neufchâteau, BRGM, 1974), "l'Oxfordien-Kimméridgien" comporte les formations suivantes :

- j 7c : Calcaire à astartes supérieur
- j 7b : Oolithe de la Mothe
- j 7a : Calcaire à astartes inférieur
- j 5-6 : Calcaires coraliens (ex calcaires "Argovo-Rauracien")
- j 4b : Terrain à chailles (Oxfordien)

La répartition des faciès rencontrés au cours du présent travail s'étend essentiellement du j 5-6 au j 7b tels qu'ils sont définis sur la feuille de Neufchâteau.

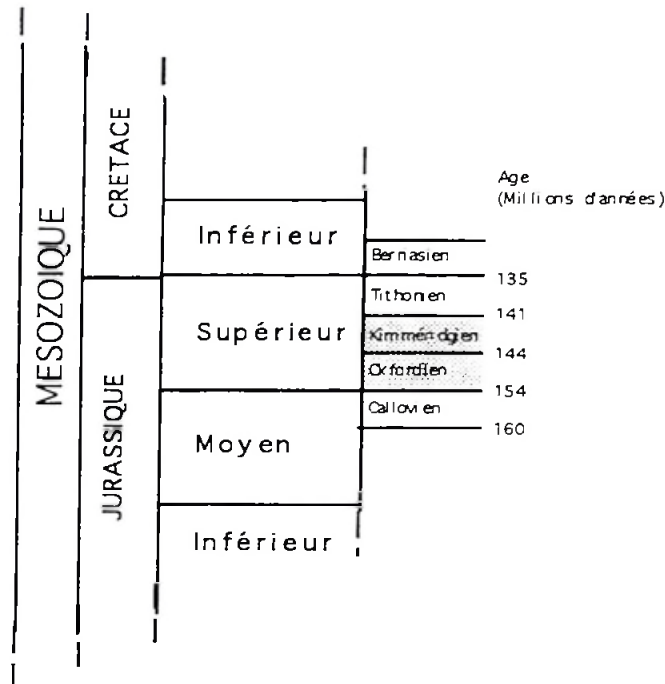


fig 2: Position de l'Oxfordien et du Kimméridgien dans l'échelle des temps géologiques.

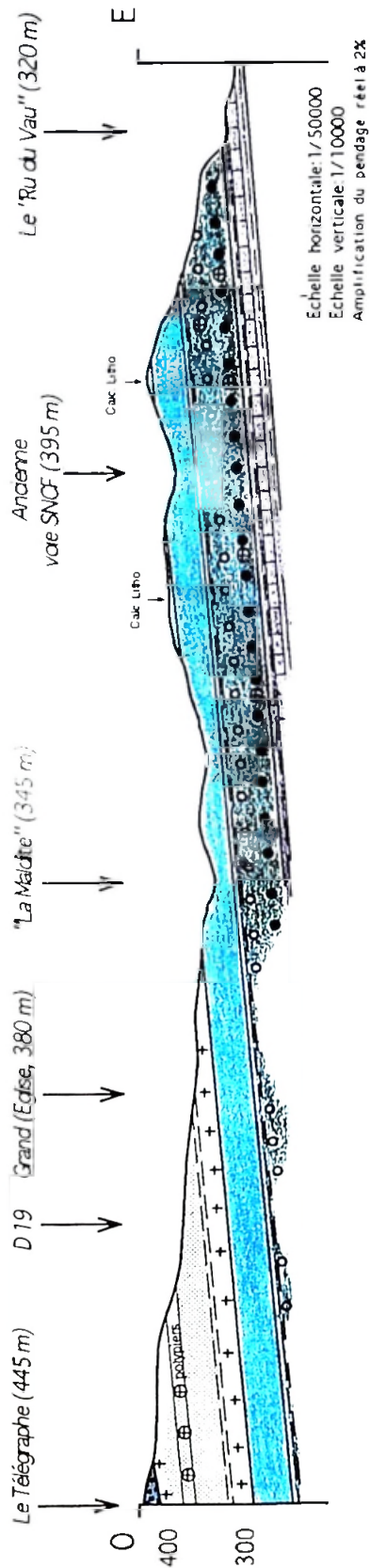
B) La série lithostratigraphique locale (environs de Grand)

La carte géologique à 1/50000 publiée (MAUBEUGE, 1974) n'étant pas suffisamment précise, une carte plus fine de localisation des différents faciès a été entreprise. Dans un premier temps, elle a été basée sur une coupe effectuée entre Midrevaux et le lieu-dit "le Télégraphe" à l'ouest de Grand. Les principales unités lithologiques recouvrant parfois plusieurs faciès, ont ainsi pu être établies (voir coupe, fig. 3).

1) Description des faciès rencontrés

La succession lithologique suivante est en grande partie recouverte par de la forêt et des prairies ce qui ne permet pas de disposer de nombreux affleurements de qualité. Dans la description suivante, il manque donc parfois certains renseignements, comme le type de contact entre les faciès ou le type de stratification, difficiles à observer. Pour la même raison, l'évaluation de l'épaisseur de chaque faciès pris indépendamment ne peut être qu'approximative, surtout si celle-ci est relativement faible.

Pour chaque faciès, un affleurement ou une zone affleurante type est mentionnée, elle est indiquée sur la carte de répartition des faciès (fig. 5).



PRINCIPALES FORMATIONS (Carte des faciès, fig. 5)

	Oolithe de la Mothe : J 7b		Calcaires graveleux gris, puis blancs (60 m) : J 5-6
	Calcaires à Astartes (100 m) : J 7a		Calcaires à chailles : J 4b
	Calcaires fins blancs (40 à 50 m, au niveau de la coupe) : J 5-6		

LITHOLOGIE

	Bancs argilo-marneux		Alternance marne-calcaire		Calcaire fin à tendance crayeuse
	Niveau à polypiers		Calcaire à gros éléments "graveleux"		
	Calcaire lithographique		Calcaire oolithique		

fig. 3: **SUCCESION LITHOLOGIQUE DES ENVIRONS DE GRAND**
- Coupe synthétique -

a) Les faciès de l'Oxfordien des environs de Grand

Calcaires à chailles (j 4b)

Ce sont des calcaires compacts, cryptocristallins à sublithographiques, de couleur gris foncé à rouille. On y trouve parfois de nombreux fossiles, en particulier des brachiopodes (Térébratules). Ce faciès rugueux au toucher, raye légèrement le marteau en raison de la silice qu'il contient. A l'affleurement on note une alternance de bancs calcaires et argilo-marneux à stratification horizontale, bien visible sur le talus de la route menant de Midrevaux à Grand. Cet ensemble calcaire marque la base de la Côte de Meuse.

Affleurement remarquable : Talus de la D71e, environ 1,5 km à l'ouest de Midrevaux.

- Calcaires coralliens (j 5-6) -

Calcaire gris compact

A la base de la série, les calcaires sont cryptocristallins compacts à sublithographiques, de couleur grise avec des cavités remplies d'oxydes de fer de couleur jaune rouille (limonite). Ils comportent quelques oolites et pisolites. L'aspect de ce faciès peut parfois être saccharoïde et comporter de petites cavités de calcite, probablement causées par les nombreux polypiers présents dans la roche. On trouve de nombreux bioclastes, principalement des fragments d'oursins (spicules ou plus rarement des tests) et de grands bivalves. Les gastéropodes sont assez abondants. L'épaisseur de ce premier niveau est d'environ 10 mètres et la stratification est horizontale.

Affleurement remarquable : Formation calcaire située juste sous la base de la carrière de "Balaincreux" (à proximité de la voie SNCF, dans le bois de Midrevaux).

Calcaires graveleux gris

On passe ensuite, sans que le contact n'ait pu être observé, à un faciès gris plus grossier à l'aspect graveleux en patine (la carrière de "Balaincreux", près de Midrevaux se situe à la base de ce niveau). On peut observer des bancs décimétriques à métriques à la stratification non apparente. Les différents grains sont des oolites, des pellets, des intraclastes (oolites composées), et des pisolites de forme plus ou moins allongée enrobant souvent un bioclaste de bivalve ou un foraminifère. La roche parfois mal cimentée, comporte une phase de liaison qui se compose d'une matrice fine ou de spathite (microcristaux de calcite discernables à l'oeil nu). Les squelettes et bioclastes encore nombreux sont principalement des lamellibranches, des gastropodes et radioles d'oursins. Des polypiers massifs sont encore présents, parfois en grande quantité.

Affleurement remarquable : Carrière de "Balaincreux", dans le bois de Midrevaux.

Calcaires graveleux blancs

En montant dans la série, le faciès précédent tend progressivement vers un autre faciès similaire, de plus en plus blanc crème, impur à tendance crayeuse, avec quelques passées argilo-marneuse à son sommet. La nature des grains de la roche semble être sensiblement équivalente à ceux du niveau sous-jacent. Par contre, la granulométrie peut devenir encore plus grossière avec des tailles de grains pouvant alors atteindre 1 cm ou plus (notamment dans les affleurements situés au dessus du village de Villouxel).

Dans le secteur de Villouxel, le faciès est très riche en polypiers. On en rencontre beaucoup sous forme de boules disséminées dans les cultures surplombant le village, en empruntant le chemin partant vers le lieu-dit "Les Essarts".

Il semble enfin qu'il y ait l'apparition d'un faciès supplémentaire au niveau de la région de Liffol-le-Grand - Aillianville. On rencontre des calcaires oolithiques blancs qui s'intercalent dans le faciès graveleux couleur crème.

Affleurement remarquable : Petite carrière surplombant Villouxel.

L'épaisseur totale des Calcaires "gris compacts" puis "graveleux gris et blancs" est d'environ 55 mètres (mesure effectuée à partir du contact inférieur de la formation, et des isohypses de son toit, au niveau du "Ru du Vau").

Calcaires blancs fins

La série se poursuit avec un faciès calcaire très blanc, légèrement oolithique dans un premier temps (quelques mètres). Par la suite il devient franchement micritique, très fin avec quelquefois des taches rose violacé. Au toucher, ce calcaire possède une tendance crayeuse très caractéristique. Sous forme de pierres volantes, il ne comporte presque aucun reste d'organisme. En revanche, au "Cul du Cerf", ce niveau constituant la partie supérieure du site renferme de nombreux fossiles (notamment des polypiers branchus, des radioles de *Cidaris florigemma* et de nombreux bivalves). Le débit de la roche est en plaquettes de deux à quatre centimètres d'épaisseur, surtout au sommet de la série. La limite entre ce faciès et le précédent est très progressive. Cet ensemble marque pratiquement tout le sommet de la Côte de Meuse et en occupe ensuite une grande partie du revers dont il constitue une surface structurale.

La puissance des Calcaires fins blancs est manifestement variable, si on en juge l'allure des isohypses qui ont été tracées au mur et au toit de la formation (cf. § I, B, 2, a). Elle est d'environ 40 à 50 mètres d'épaisseur le long d'un axe Midrevaux-Grand, 40 mètres vers Aillianville-"le Cul du Cerf". Par contre, elle pourrait atteindre 70 à 80 mètres dans la région située entre Villouxel et Brechainville.

Affleurement remarquable : Carrière du bois des "Fontenelles" (forêt de Grand), ou site du "Cul du Cerf" (52-Orquevaux).

- Calcaires à Astartes inférieurs (j 7a) -

Une fois passé le premier niveau de calcaire sublithographique, cette formation peut présenter des variations de faciès très locales.

Niveau à matrice ou calcaire sublithographiques

Le changement de faciès est brutal comparé au reste de la série, mais là aussi le contact n'a pu être observé. On a à la base un calcaire gris plus ou moins foncé, sublithographique comportant parfois des traces rosées de bioturbation. Pur sur les quinze à vingt premiers mètres environ de la base, ce faciès se charge progressivement en pisolithes et oolithes gris. Dans ces premiers niveaux, les grains flottent dans la matrice (ceci se rencontre dans les pierres volantes à proximité du cimetière de Grand).

La partie basale de ce niveau, lithographique pur, recouvre superficiellement certaines hauteurs de la Côte de Meuse dans le bois de Midrevaux.

Ce faciès évolue et on rencontre ensuite, notamment dans les environs de Grand, un calcaire compact composé d'ooïdes millimétriques grises sans structure interne apparente (ooïde micritique, selon PURSER, 1975). La phase de liaison, parfois dominante, est très fine et de couleur grise à beige orangé suivant la proportion d'oxydes de fer qu'elle comporte. Les pores relativement nombreux sont eux aussi souvent comblés par des oxydes de fer. En patine ce faciès particulier a parfois un aspect graveleux.

Affleurements remarquables : -Carrière à l'extrémité de la scierie Lejeune (Grand).
-Pierres volantes aux alentours du lavoir des "Roises" (Grand).

Niveau oolithique

Il semble que l'on ait, en montant un peu plus haut dans la série, un niveau variable comprenant des calcaires oolithiques fins, à très fins macroscopiquement cryptocristallins. Leurs couleurs sont changeantes de beige à gris. Ce faciès rencontré dans certains puits et souterrains de Grand est recoupé par des joints argileux, et au moins un niveau marneux de 80 cm d'épaisseur, visible dans un des souterrains de Grand. Les bancs délimités par des passées argilo-marneuses ont une épaisseur souvent comprise entre quelques décimètres et un mètre. Leur stratification est horizontale.

Dans ce niveau, un faciès calcaire très riche en fossiles et bioclastes, à matrice fine et quelques pisolithes, a été trouvé sous forme de pierres volantes. Ce faciès à tendance lumachellique, comprenant une forte proportion de bivalves, gastéropodes, et brachiopodes, est souvent associé à une surface indurée. Le tout n'a pu être localisé avec précision dans la série locale.

Affleurement remarquable : Pierres volantes dans les cultures longeant la D19 immédiatement à l'ouest de Grand.

Niveau à polypiers

A ces calcaires oolithiques variés succède un niveau épais de quelques mètres avec de nombreux polypiers isolés formant des boules, disséminés dans des calcaires oolithiques.

Affleurement remarquable : Polypiers disséminés dans les cultures entre la D19 et les "Tailles de la Fréveau" (nord de Grand).

Deuxième niveau oolithique

La série lithostratigraphique continue avec des calcaires oolithiques fins sur quelques mètres d'épaisseur (du type de ceux de la carrière de "Fresnoy", entre Trampot et Brechainville) et passe ensuite à un autre type de calcaire oolithique particulier. Il est composé d'ooïdes orangées, cimentées dans une matrice grise très fine. On retrouve parfois des terriers de crustacés sous forme de cavités, ovoïdes ou allongées, remplies d'une matrice grise très fine. L'ancienne carrière de "Parmaison", à l'ouest de Grand, est exploitée dans ce dernier faciès. La stratification semble être horizontale pour ces deux types de calcaires oolithiques.

Affleurement remarquable : Carrière de "Parmaison", 2 km à l'ouest de Grand.

Niveau sublithographique supérieur

La formation des Calcaires à astartes se termine par des calcaires sublithographiques gris avant de passer à la formation de "l'Oolithe de la Mothe".

Vers Grand, la puissance totale des Calcaires à astartes avoisine 100 mètres.

Affleurement remarquable : Lieu-dit "Lincourt", D19 au sud ouest de Grand.

- Oolithe de la Mothe (j 7b) -

Dans la région de Grand, ce faciès se compose de petites oolithes fines bien blanches, parfois mal cimentées. La tendance générale de ce faciès est assez crayeuse. On y trouve des gastéropodes assez nombreux. Elle est difficilement observable au sommet de la butte du lieu-dit "le Télégraphe".

b) Corrélations avec les faciès rencontrés plus au nord **(carte géologique de Toul)**

La base de la série précédemment étudiée correspond relativement bien avec les formations rencontrées quarante kilomètres plus au nord-est, dans la région de Toul (carte géologique de Toul, FLAGEOLLET, LE ROUX, VINCENT et al., 1985). On retrouve en effet les Calcaires à chailles, puis la succession des Calcaires "gris compacts", "graveleux gris puis blancs", et enfin "blancs fins". Dans la région de Toul, ils semblent correspondre aux Zones inférieure et supérieure à Polypiers. La formation de l'Oolithe moyenne aurait alors disparu entre temps.

La suite de la série présente moins de similitudes. On ne retrouve guère de niveaux argilo-marneux présents aux alentours de Grand susceptibles de correspondre aux Argiles à huîtres. Le Calcaire à astartes inférieur est soumis à plus de variété de faciès au niveau de Grand, qu'au niveau de la carte géologique de Commercy (carte géologique de Commercy). Enfin, l'Oolithe de la Mothe a une granulométrie bien plus grossière vers Toul, que dans la région de Grand où elle est très fine.

2) Construction d'une carte de répartition des faciès

En raison de leur caractère progressif, de nombreux changements de faciès sont assez subjectifs. Ils n'ont donc pas facilité le positionnement des limites nécessaires à l'élaboration d'isohypses, d'autant plus qu'une grande partie des relevés a été réalisée en forêt.

a) Construction de cartes en isohypses.

La construction de la carte des faciès a comporté dans un premier temps la réalisation de courbes de niveaux de certaines limites de faciès, que l'on appelle les isohypses. Deux niveaux ont servi à réaliser des isohypses :

- Tracé des isohypses au toit des Calcaires graveleux, ou mur des Calcaires fins blancs-

Les points qui ont permis de tracer ce profil structural sont les limites des formations Calcaires à chailles - Calcaires coraliens, en tenant compte des 55 mètres d'épaisseur qui les séparent du toit des Calcaires graveleux choisis comme niveau repère. Naturellement les points marquant le sommet des Calcaires graveleux ont été utilisés sans correction d'altitude. Ces derniers ont cependant été difficiles à positionner en raison du contact progressif sur lequel ils se trouvent. Ils correspondent à un faciès de transition composé pour moitié de Calcaires fins blancs, et pour l'autre moitié de gros pisolithes blancs (faciès sous-jacent).

Les points basés sur la limite supérieure des Calcaires fins blancs (cf. description des faciès) n'ont pas été retenus en raison des variations locales d'épaisseur qui semblent affecter ce précédent niveau. En effet, leur prise en compte moyennant une correction d'altitude équivalente à l'épaisseur supposée des Calcaires fins blancs risquerait d'introduire des erreurs.

- Tracé des isohypses au toit des Calcaires fins blancs, ou mur des Calcaires lithographiques-

En raison de la variation latérale d'épaisseur précédemment évoquée, cette carte en isohypses a été réalisée en tenant uniquement compte des points situés à la limite des deux faciès : " Calcaire fin blanc - Calcaire lithographique. Ces points sont d'autant plus précis que la limite de faciès est ici très franche, et donc facile à positionner.

b) Allure générale des isohypses: commentaires

Les isohypses réalisées sur deux niveaux repère différents traduisent schématiquement un pendage général des couches vers le nord-ouest. Il est particulièrement bien marqué dans la partie sud de la carte. Mis à part cette ressemblance, on remarque surtout une absence de parallélisme entre ces niveaux, au nord d'un axe Liffol-le-Grand - Trampot.

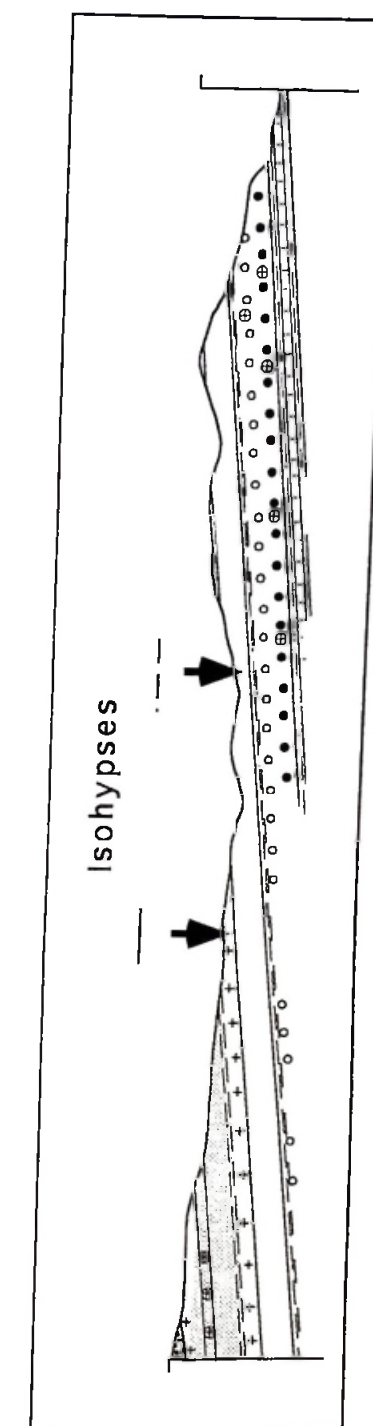
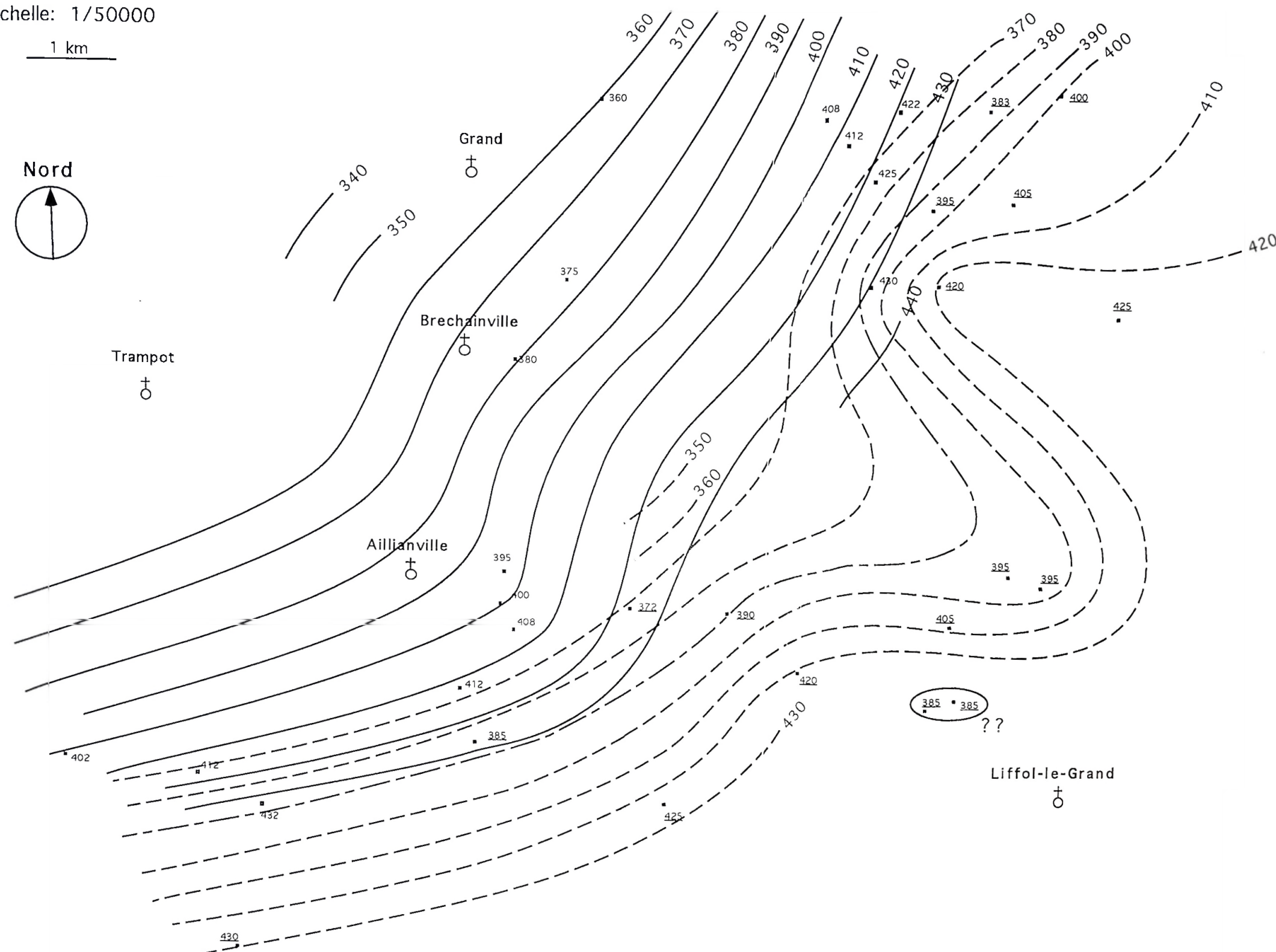
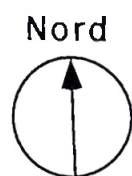
- Les isohypses au toit des Calcaires graveleux forment une dépression le long d'un axe Grand-Villouxel. Elle se traduit sur la carte des faciès (§ suivant et fig. 5) par une avancée du faciès des Calcaires fins blancs au niveau de Villouxel, qui marque d'ailleurs un relief particulier sur le front de côte.

- Les isohypses au toit des Calcaires fins blancs marquent quant à elles une ondulation au niveau de Brechainville-Aillianville avec un changement d'orientation du pendage de part et d'autre. Le pendage franchement au nord-ouest au sud de Trampot s'oriente ouest nord-ouest au nord de Grand.

Ces différences au niveau des isohypses traduisent des variations d'épaisseur du niveau des Calcaires fins blancs. On remarquera surtout un surépaississement au niveau d'un axe Villouxel - Brechainville. Une origine sédimentologique, comme le niveau de polyptères que l'on retrouve à Villouxel, peut éventuellement agir sur les dépôts et être la cause des fluctuations d'épaisseur. Le manque de parallélisme entre les isohypses peut également avoir une origine structurale.

Echelle: 1/50000

1 km



ISOHYPSES, au toit des Calcaires fins blancs
et au toit des Calcaires graveleux.

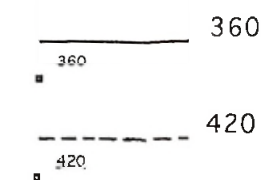
Figure 4:

Isohypes au toit des Calcaires fins blancs, et cotes:

Point coté (limite supérieure), Calcaires fins blancs:

Isohypes au toit des Calcaires graveleux, et cotes:

Point coté (limite supérieure), Calcaires graveleux:



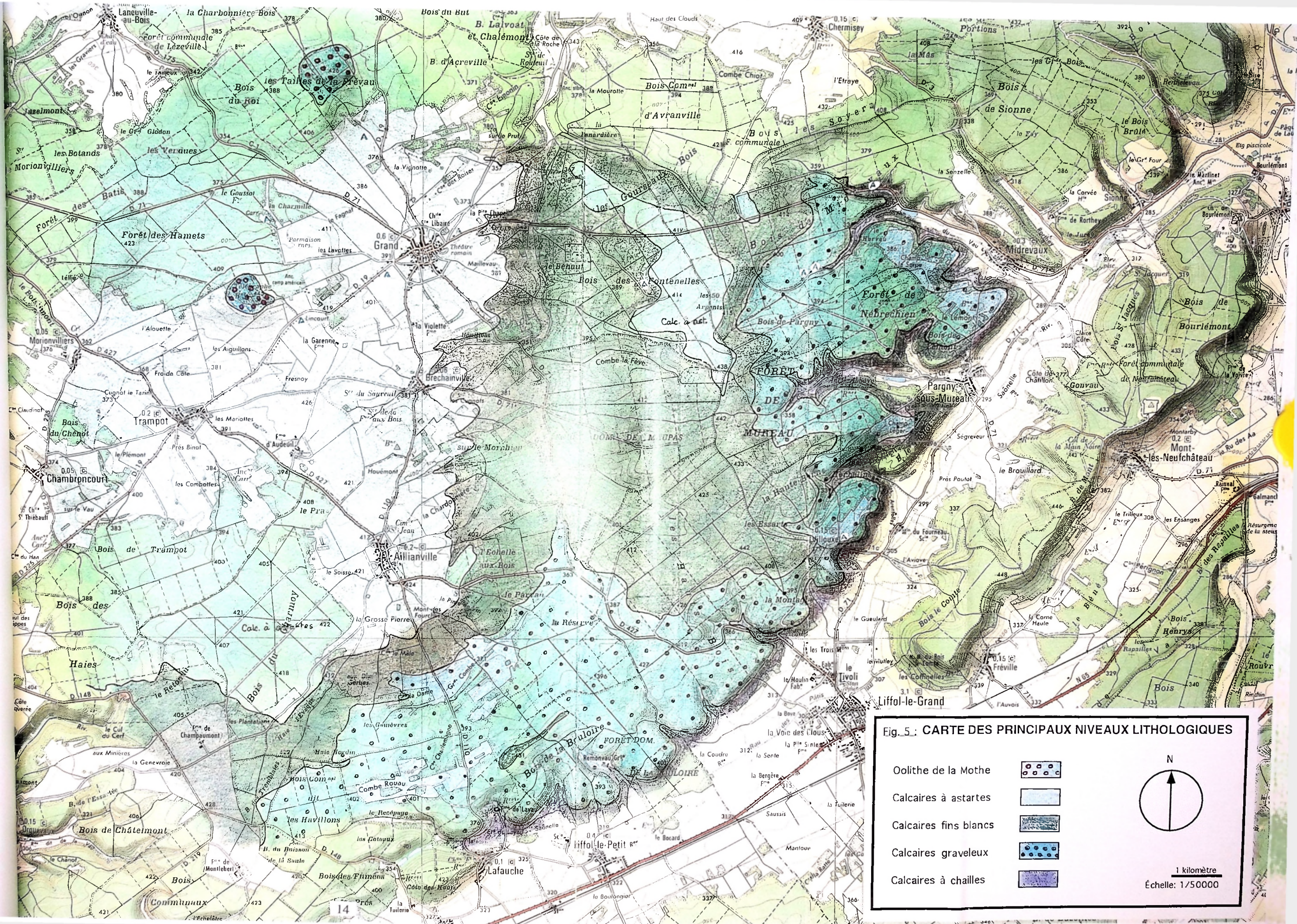


Fig. 5: CARTE DES PRINCIPAUX NIVEAUX LITHOLOGIQUES

c) Dessin de la carte de répartition des faciès

Le dessin final de la carte de contour des faciès (fig. 5) est déduit de l'intersection des isohypses, qui traduisent la géométrie des couches géologiques, et de la surface topographique. Il est ainsi possible de restituer avec une certaine précision les contours des faciès entre les points d'observation. Les contours du mur et du toit des Calcaires graveleux ont ainsi été construits avec les isohypses du toit des Calcaires graveleux. Le contour du mur des calcaires lithographiques a été construit avec ses propres isohypses (isohypses au toit des Calcaires fins blancs). Ceux de l'Oolithe de la Mothe, très limités, ont été construits d'après les observations de terrain.

Remarque : Ces tracés d'isohypses et de contour des faciès peuvent certainement être encore affinés. Ils ont été arrêtés dans cet état de précision, car ne constituant pas l'objectif essentiel de cette recherche, le temps qui leur était imparti était forcément limité. La carte finale (fig. 5) est toutefois suffisamment précise pour localiser l'extension géographique des différents faciès et repérer les types de géomatériaux que contiennent les carrières.

C) Pétrographie des blocs de l'amphithéâtre

1) Le prélèvement des échantillons de l'amphithéâtre

Pour cerner la provenance des roches de l'amphithéâtre, une étude pétrographique des blocs a été réalisée. La confection des lames minces passe par le prélèvement de fragments de blocs destinés à inventorier les différents faciès macroscopiquement discernables (cf. plan de l'amphithéâtre, fig. 6).

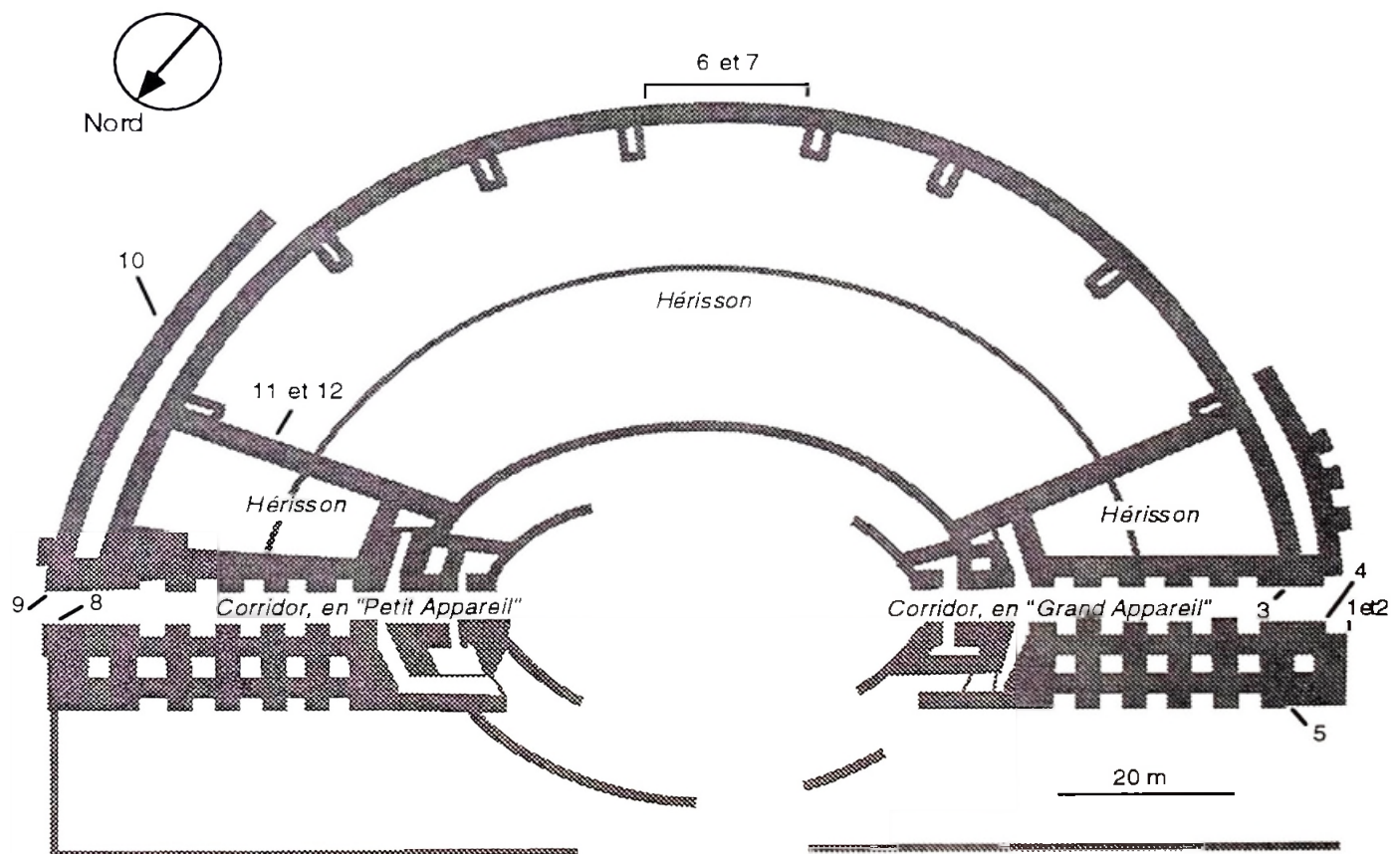


fig 6: Disposition actuelle de l'amphithéâtre de Grand, d'après J-P. BERTAUX.
Emplacement des échantillons prélevés sur le "grand" et le "petit appareil".

Pour déterminer les différentes origines des géomatériaux, douze échantillons recouvrant huit faciès visuellement différents ont été prélevés. La construction en "grand appareil" de l'amphithéâtre (corridor ouest) a fait l'objet d'un échantillonnage plus systématique en raison de l'altération préférentielle de certains blocs, malgré un faciès pétrographique apparemment homogène. Par la suite (2^e partie) d'autres fragments ont donc été prélevés pour l'étude de certaines particularités des blocs en "grand appareil".

Deux faciès n'ont cependant pas donné lieu à la réalisation de lame mince. Il s'agit d'un calcaire gris sublithographique, présent à l'affleurement autour de l'amphithéâtre, et un calcaire impur blanc, très fin. Ce dernier faciès semble avoir été relativement peu utilisé pour la construction de l'amphithéâtre.

Les blocs échantillonnés dans cette première partie figurent sur le plan de l'amphithéâtre (fig. 6). La désignation employée est le numéro de la lame mince correspondante.

2) Etude macroscopique des blocs de l'amphithéâtre

- Calcaire à texture graveleuse

Ce sont des calcaires à gros éléments de couleur beige-blanc (1 à 3 mm en général, voire plus). Leur structure interne est inexistante à peu marquée. Certains grains sont "composés" car ils résultent de la cimentation de plusieurs éléments préexistants. On distingue quelques fragments de bivalves enrobés dans un cortex micritique fin. Sur une section sciée, de grands intraclastes oblongs, de taille centimétrique, sont bien visibles. Ces éléments flottent dans une matrice grise très fine. En patine, l'aspect général de cette roche est graveleux, de couleur gris-cendré. Son altération est plus ou moins prononcée suivant les blocs. Ce faciès se trouve dans les blocs construits en "grand appareil".

- Calcaire orangé à éléments micritiques

Ce faciès est une variante du précédent, dans la mesure où les éléments figurés sont également de couleur gris-beige, de grande taille (1 à 3 mm), et n'ont pas de structure interne. Contrairement au cas précédent les éléments sont toujours jointifs, ce qui donne à la roche une structure de type packstone. La phase de liaison est très fine et contient une forte proportion d'oxydes de fer qui donnent à la roche une couleur orangée particulière. Ce faciès se caractérise aussi par la présence de pores assez nombreux qui peuvent atteindre plusieurs millimètres et être partiellement comblés par des oxydes de fer. Dans le "petit et le grand appareil", cette roche est systématiquement en bon état.

- Calcaire lithographique

Certains calcaires employés dans l'amphithéâtre, et notamment dans les hérissons, sont des calcaires lithographiques à sublithographiques de couleur grise plus ou moins foncée. Une variante de ce faciès est également utilisée, il s'agit d'un calcaire sublithographique comportant de gros oïdes micritiques de couleur rose violacé plurimillimétrique. La structure est alors de type wackstone, avec une proportion d'oïde se situant entre 40 et 50%.

- Calcaire oolithique

Il s'agit d'un calcaire oolithique fin (taille des éléments généralement inférieure à 0,5 mm), de couleur crème. La structure est de type packstone et la phase de liaison est variable, plus ou moins micritique ou sparitique. Les bioclastes sont peu nombreux, et généralement enrobés. On rencontre dans ce faciès quelques éléments ovoïdes (oïdes micritiques) de plus grande taille (1 à 2 mm), sans structure interne nettement apparente.

- Calcaire fin blanc

Ce calcaire apparemment peu utilisé dans l'amphithéâtre est très fin et blanc à tendance crayeuse. Macroscopiquement homogène, on ne distingue ni structure ni texture particulière.

Il s'agit d'un calcaire utilisé pour l'ornementation de l'amphithéâtre en raison de sa propriété, très tendre. La taille en est d'autant facilitée.

3) Etude microscopique des blocs de l'amphithéâtre

Malgré les disparités macroscopiques, au microscope on ne peut mettre en évidence que deux grands types principaux de faciès, à savoir un calcaire graveleux pseudo-oolithique et un calcaire oolithique. On rappelle qu'aucune lame mince n'a été effectuée dans le calcaire lithographique et le calcaire fin blanc.

a) Le faciès graveleux à ooïdes micritiques, et tendance pisolithique (photo fig. 9)

Il regroupe les faciès macroscopiques des "calcaires à texture graveleuse", et le "calcaire orangé à éléments micritiques". Comme mentionné dans la précédente étude macroscopique, la structure est variable. Elle varie entre un type généralement packstone et un autre, wackstone (DUNHAM, 1962) peut-être moins fréquent. Le changement de structure peut s'effectuer à l'échelle d'une lame mince, fréquemment sous la forme d'une passée wackstone.

Les grains constituant ce faciès sont assez diversifiés. Les plus fréquents sont des grains micritiques arrondis, à l'intérieur desquels on distingue parfois un nucléus bioclastique ou un microfossile d'une part (des foraminifères dans la plupart des cas), et des traces plus ou moins nettes de laminations corticales. Même si le test des foraminifères peut être porcelané, et par conséquent être de même aspect que la micrite, on ne distingue parfois plus que les loges. Toute la structure interne du grain paraît être plus ou moins effacée. Ces grains à l'aspect particulier pourraient avoir subi une micritisation. Dans d'autres cas, l'oolithe présente un nucléus non micritique, généralement un bioclaste, et un cortex micritique sans laminations corticales. Ce type de grain, comme le précédent, peuvent être regroupés sous le terme "d'ooïde micritique" (PURSER, 1975). Il n'en demeure pas moins que certains grains entièrement micritiques, sans structure apparente ni nucléus et à l'aspect plus ou moins oblong, doivent être des pelletoides *sensu stricto*. Pour être complet, on peut également noter la présence d'intraclastes.

De petits grains de quartz et plagioclases, angulaires à subangulaires, et des grains d'oxydes de fer sont également disséminés dans la matrice. La forme particulière de certains granules d'oxydes ou groupes de granules est à relier à l'oxydation des cristaux de pyrite dont ils sont issus par pseudomorphose. Ces oxydes se rencontrent aussi sous forme diffuse, à la surface des grains, ou dans des joints stylolithiques.

La phase interstitielle est occupée par une matrice micritique et un ciment sparitique à texture idiotopique. Ces deux phases étant présentes dans des proportions variables d'un échantillon à l'autre, et même à l'intérieur d'une même lame mince.

Les bioclastes rencontrés sont relativement nombreux. Ce sont principalement (à l'exclusion des foraminifères déjà cités) des bivalves et des polypiers, puis dans une moindre mesure des fragments d'oursins (spicules et tests), des brachiopodes et gastéropodes. Les foraminifères sont toujours entiers, tout comme certaines valves de lamellibranches.

Deux types de porosité semblent coexister. Une porosité primaire présentant des pores sans forme particulière, et une porosité secondaire formée de pores losangiques issus d'une dédolomitisation. Certaines lames minces de ce faciès présentent encore des cristaux de dolomite, parfois amassés en poches.

b) Le faciès oolithique (photo fig. 10)

Comme dans le faciès précédent, on rencontre quelques ooïdes micritiques, des pelletoides et des intraclastes, mais les grains très largement prédominants sont des oolithes cristallines (PURSER, 1975). Ces oolithes à nucléus micritique ont une structure radiaire typique qui semble traverser les laminations corticales (ooïdes de type sphérulites). Observées au microscope en lumière polarisée non analysée, les oolithes ont alors une couleur à forte dominante rousse, orangée probablement due à des oxydes de fer.

La phase interstitielle se compose d'une matrice qui semble avoir été remplacée dans des proportions variables par un ciment sparitique. En effet, on retrouve souvent des lambeaux de micrite bloqués entre les grains, et le restant du pore est comblé par de la sparite.

Les bioclastes sont moins nombreux que dans le faciès précédemment décrit, et les foraminifères alors très présents ont quasiment disparu, tout comme les fragments d'oursins et de lamellibranches également plus rares.

De façon quasi similaire au faciès précédent, on retrouve deux types de porosité, dont une, issue d'une dédolomitisation, est secondaire. Certaines lames réalisées dans ce faciès ont même une partie importante de leur phase interstitielle composée par des cristaux de dolomite.

D) Essai de localisation de la provenance des géomatériaux de l'amphithéâtre

Calcaire à texture graveleuse

La série locale de l'Oxfordien comporte deux niveaux à gros éléments ayant des caractéristiques macroscopiques semblables au faciès utilisé dans l'amphithéâtre. Il s'agit des calcaires graveleux visibles à la base de la série dans la carrière de "Balaincreux", et des calcaires présents dans les anciennes carrières situées à l'extrémité nord de Grand : "les Roises" (calcaire à l'aspect parfois graveleux du "Niveau à matrice ou calcaire sublithographiques"). Ces deux niveaux seraient donc susceptibles d'avoir fourni les blocs qui constituent le "grand appareil", au moins d'un point de vue macroscopique.

Malgré de nombreuses similitudes, l'observation au microscope d'une lame effectuée dans un banc de la carrière de "Balaincreux" présente toutefois quelques différences (fig. 12). Les gros éléments figurés sont en effet des oïdes, présentant souvent un nucléus bioclastique autour duquel existent des laminations corticales discontinues, marquées par de petites plages microsparitiques plus ou moins allongées. La nature de ces oïdes serait alors oncolithique.

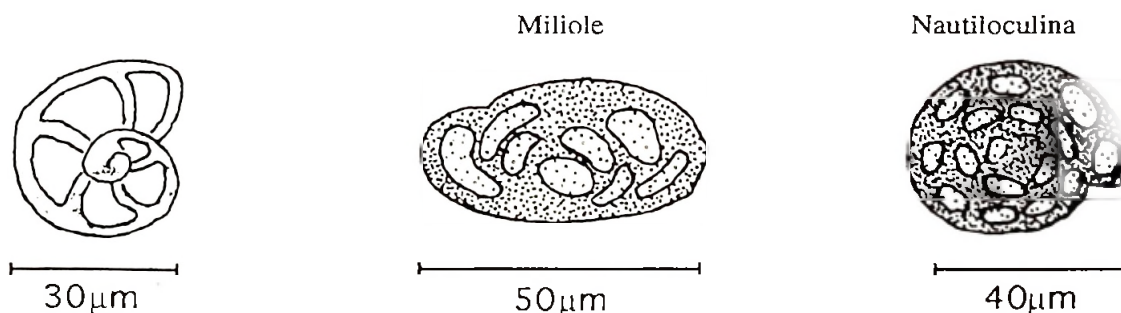
On notera également une assez grande proportion de radioles d'oursins et de gastéropodes formant les nucléi des grains, ce que l'on ne remarque pas dans les blocs du "grand appareil", plutôt riches en foraminifères.

La dernière différence majeure réside au niveau de la porosité. Même si on remarque la présence d'une porosité secondaire consécutive à une dédolomitisation, l'échantillon de la carrière de "Balaincreux" possède parfois une très forte porosité primaire que ne possèdent apparemment pas les blocs de l'amphithéâtre.

En raison de ces différences notables, il est permis d'envisager une provenance des blocs du "grand appareil", autre que la carrière de "Balaincreux" et le niveau géologique auquel elle appartient.

Au microscope, les blocs prélevés à proximité de l'ancienne carrière au nord de Grand (fig. 11), présentent un faciès tout à fait comparable à celui du "grand appareil" de l'amphithéâtre. Outre des pores rhomboédriques et des fantômes de dolomite recristallisés en calcite, on a pu noter la présence de pores rhomboédriques encore tapissés en périphérie par de la dolomite résiduelle.

fig.7: foraminifères du calcaire à texture graveleuse.



Cette dolomite a été mise en évidence en colorant la lame mince dans une solution d'Alizarine (1g de rouge d'alizarine + 1cm³ d'acide chlorhydrique par litre). La dolomite reste incolore (cf. § III, A, 1 : Colorations sélectives à l'Alizarine).

On remarque d'autre part une très grande similitude au niveau de la morphologie des grains, de la faune et de l'abondance des foraminifères (fig. 7 et 11). On note en effet la présence des foraminifères suivants dans les échantillons : *Miliola*, *Nautiloculina*.

Calcaire orangé à éléments micritiques

On retrouve un calcaire strictement identique dans la partie supérieure des calcaires du "Niveau à matrice ou calcaire sublithographiques" (base des Calcaires à astartes inférieur dans la description des faciès précédente). Dans les environs de Grand, on note la présence de ce faciès en pierres volantes à proximité du lavoir des "Roises", à côté des anciennes carrières romaines, d'où proviendraient les matériaux du faciès précédent.

Calcaires lithographiques

Le calcaire lithographique utilisé dans la construction a dû être exploité sur place ou sous forme de petites carrières dans les proches environs, puisque l'amphithéâtre repose sur ce même type de roche. Il existe effectivement d'anciennes carrières romaines, de part et d'autre de l'amphithéâtre, implantées dans ce type de calcaire.

Calcaire oolithique

Des divers types de calcaires oolithiques existant dans la série locale, le niveau de calcaire blanc-crème fin appartenant au "deuxième niveau oolithique", (cf. description lithologique), que l'on trouve notamment à la carrière de "Fresnoy" (entre Trampot et Brechainville), a probablement été celui utilisé dans la construction de l'amphithéâtre.

Il a le même aspect macroscopique que les géomatériaux de l'amphithéâtre. Il est surtout le seul calcaire oolithique de la série à parfaitement correspondre aux différents critères microscopiques (fig. 13). Il est en effet largement constitué d'oolithes cristallines à nucléus souvent micritique dans une phase interstitielle micritique plus ou moins remplacée par de la sparite.

Les autres calcaires oolithiques (fig. 14) situés en particulier à l'ouest du village de Grand ont une large prédominance des ooïdes micritiques parmi leurs éléments. La granulométrie peut également être différente, beaucoup plus fine ou grossière. Il semble enfin que les premiers niveaux de calcaire oolithique de la série soient assez riches en éléments siliceux détritiques (quartz dominant et quelques fragments de feldspath). Les blocs de l'amphithéâtre n'en possèdent pas.

Calcaire fin blanc

Le calcaire fin blanc a quelquefois été utilisé pour les petits blocs de l'amphithéâtre. Ce type de matériau est gélif, et certains blocs taillés dans ce calcaire sont fortement altérés. Il semble que ce calcaire ait été employé dans les récents travaux de réfection, et non pas par les Romains.

E) Conclusion : provenance des géomatériaux de l'amphithéâtre

Dans la série lithostratigraphique des environs de Grand, on retrouve les faciès qui correspondent aux faciès des géomatériaux employés dans l'amphithéâtre. Il est donc possible de suggérer une provenance **locale** des matériaux, comme le confirment certaines anciennes carrières romaines toutes proches.

Il existe cependant un problème au niveau du volume de matériaux utilisés, comparé au volume prélevé dans les carrières proches encore visibles actuellement. Les carrières

visibles ont un volume insuffisant. De nombreuses carrières ont par conséquent été recombées au cours du temps, sinon les Romains se sont approvisionnés bien plus loin en matériaux identiques.

Les matériaux locaux identifiés ont été utilisés par les Romains en fonction de leurs caractéristiques.

-Les calcaires lithographiques, dans lesquels il est impossible de tailler de gros blocs, ont surtout été employés dans le hérisson, alors que le calcaire oolithique a surtout permis de construire les petits moellons. Ces deux matériaux correspondent également à la première phase de construction de l'amphithéâtre.

-La pierre tendre de Savonnières a été utilisée en pierre ornementale et a une origine plus lointaine. Ce type de pierre tendre n'existe pas dans la lithostratigraphie locale.

Le "grand appareil", reconstruit bien après l'édification de l'amphithéâtre, se distingue par son architecture différente et son faciès particulier. Ce dernier offrait la possibilité de débiter de gros blocs, alors que le calcaire oolithique tel qu'il est actuellement visible à la carrière du "Fresnoy" ne le permettrait pas. Le faciès correspondant au "grand appareil" est observable en pierres volantes aux alentours même de Grand. Il appartient au "Niveau à matrice ou calcaire sublithographique" (cf. description lithologique, I, A, 2), qui n'est actuellement accessible que dans les puits. Les carrières correspondantes sont donc probablement aux abords même du chantier et ont été comblées depuis.

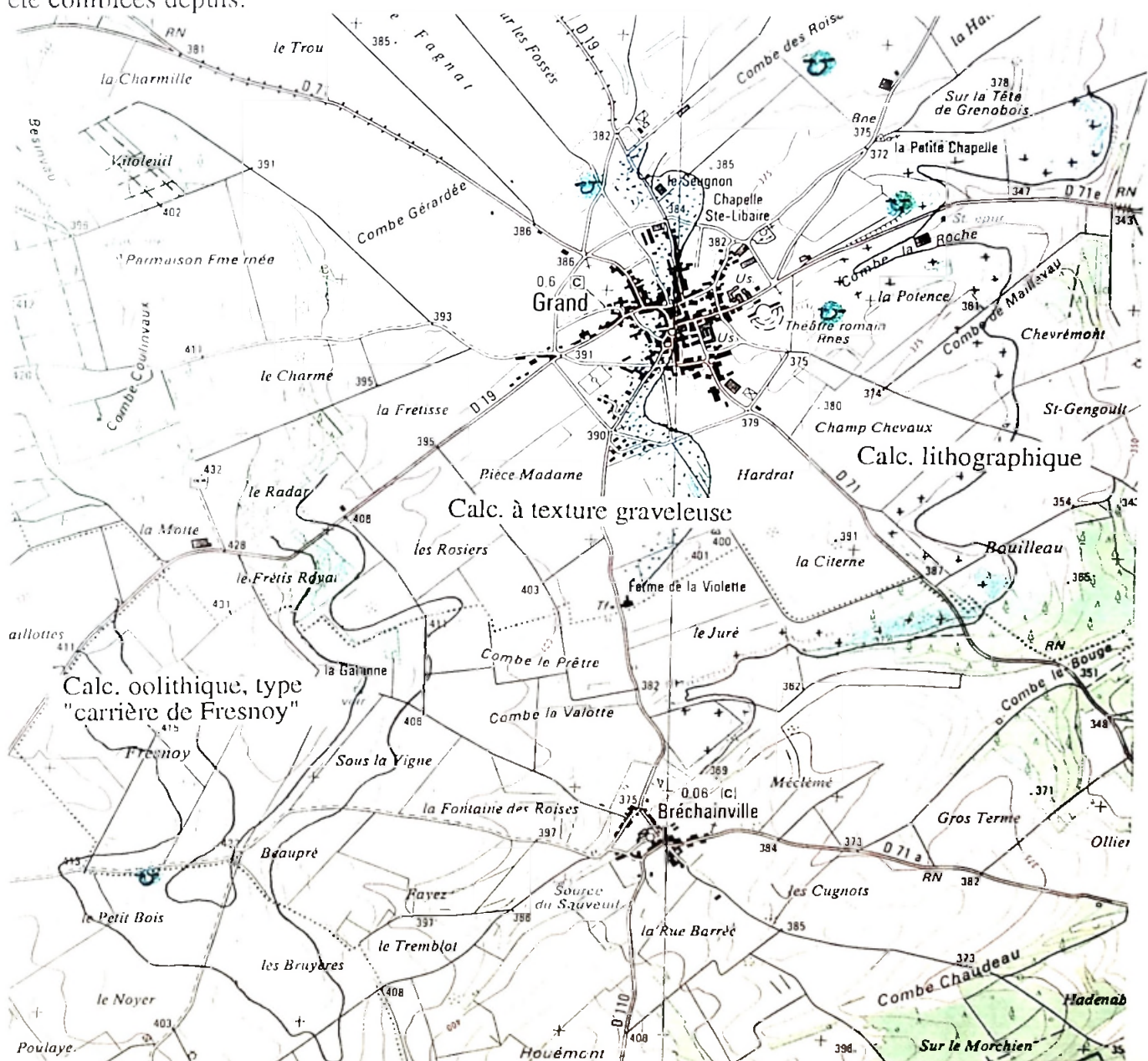


fig. 8: Disposition géographique des zones susceptibles d'avoir alimenté l'amphithéâtre de Grand en géomatériaux. (extrait de la carte I.G.N. au 1/25 000)

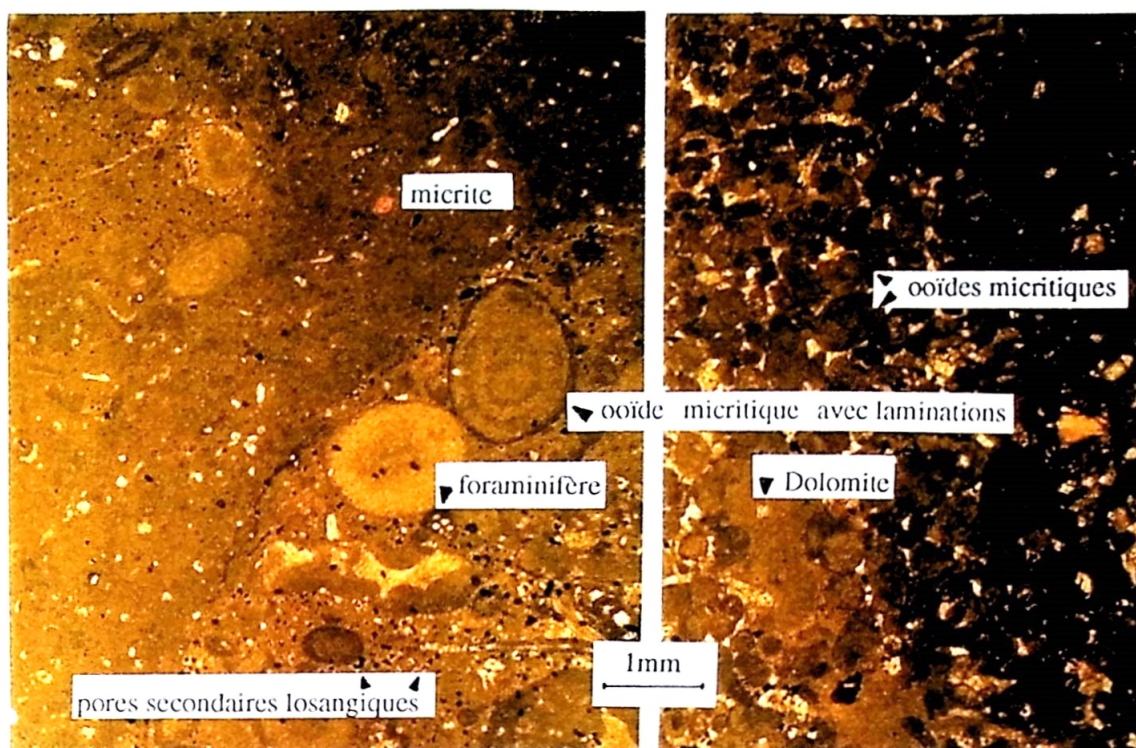
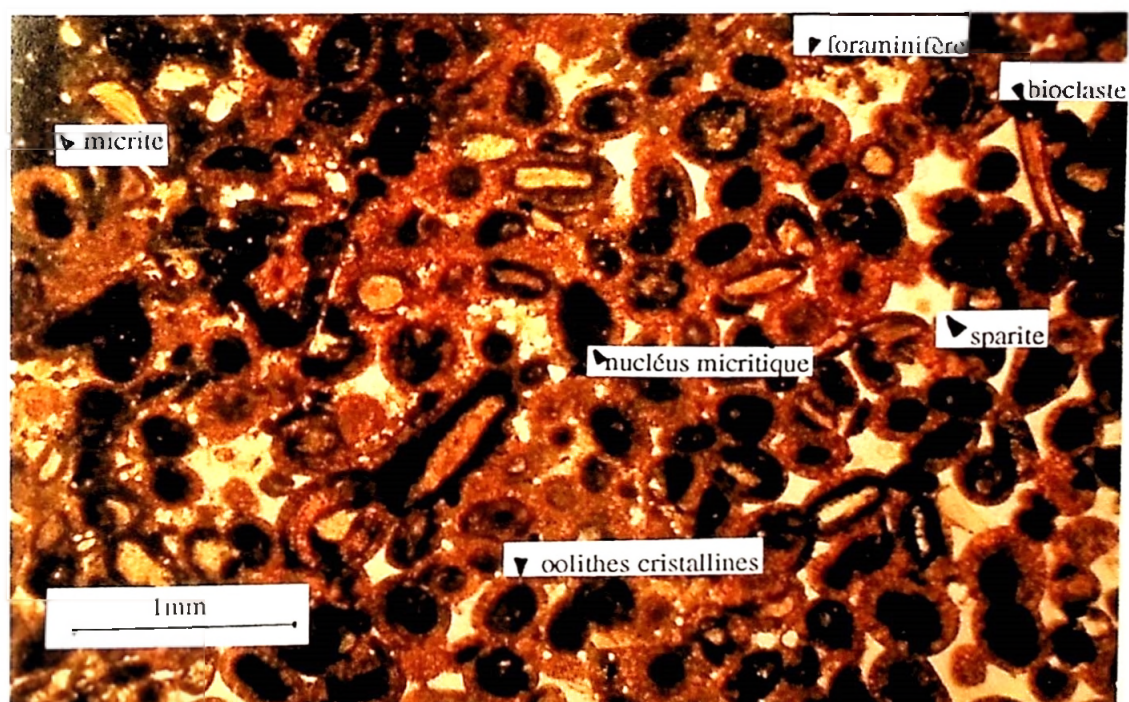


fig. 9: Vue microscopique du "grand appareil" (lames 1 et 5).

fig. 10: Vue microscopique du "petit appareil" (lame 11).



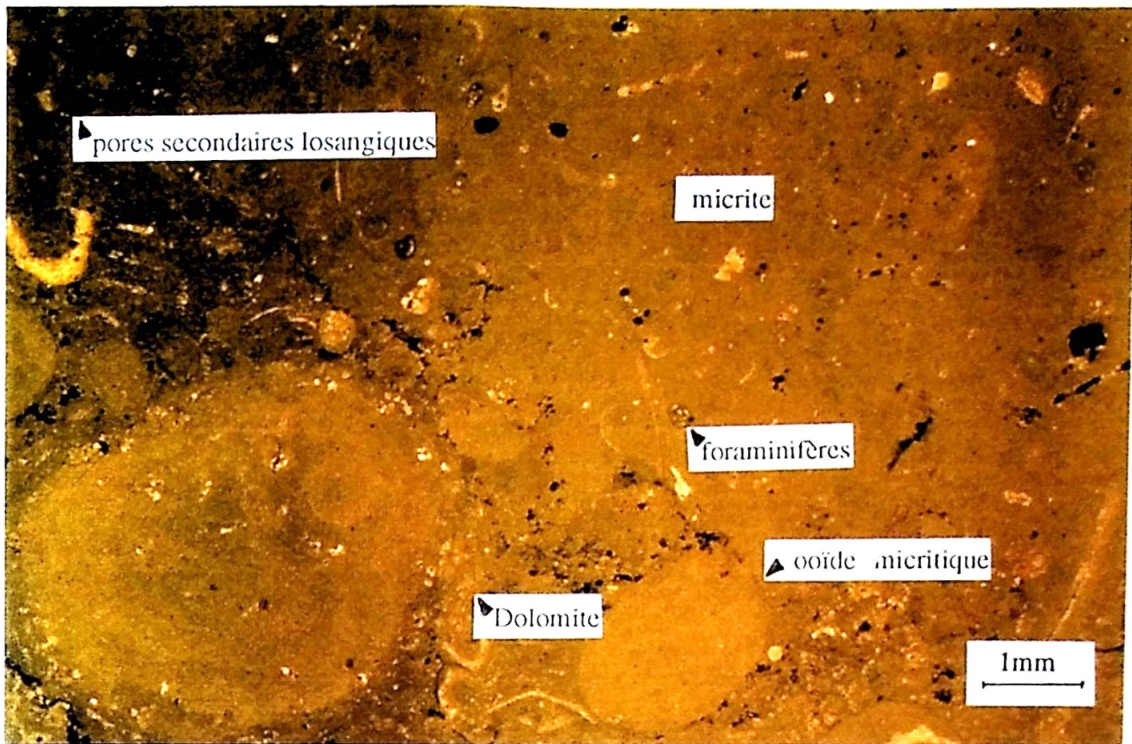
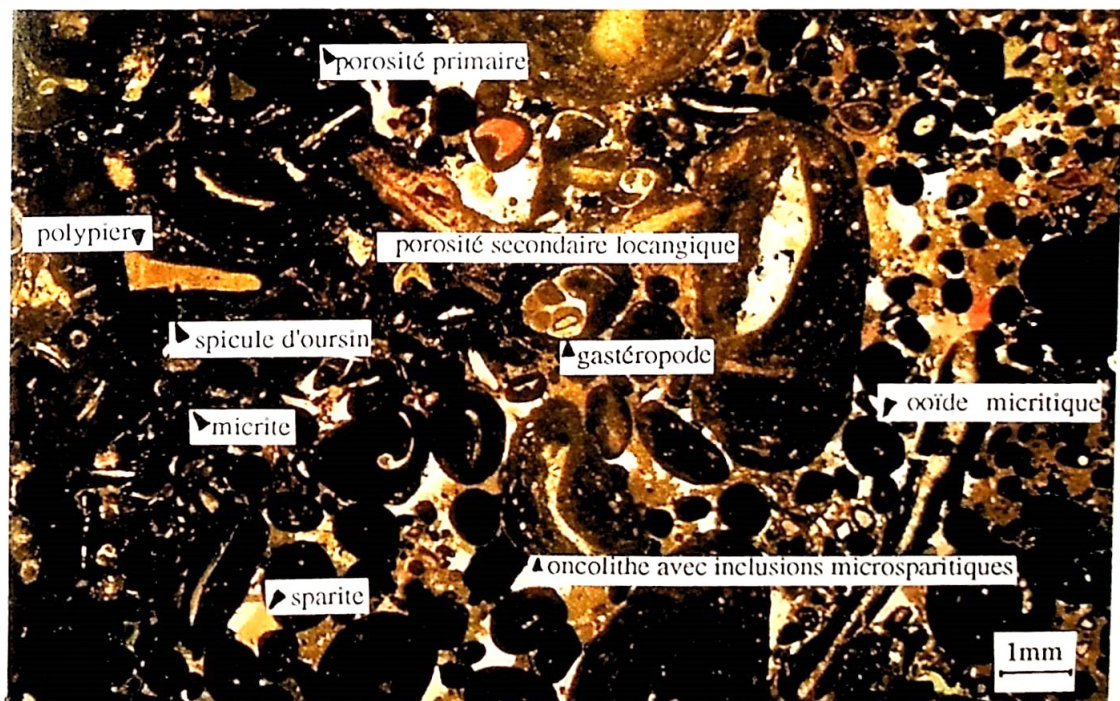


fig. 11: Vue microscopique du calcaire au lieu-dit "les Roises" (lame 37).

fig. 12: Vue microscopique du calcaire de Balaincreux (lame 13).



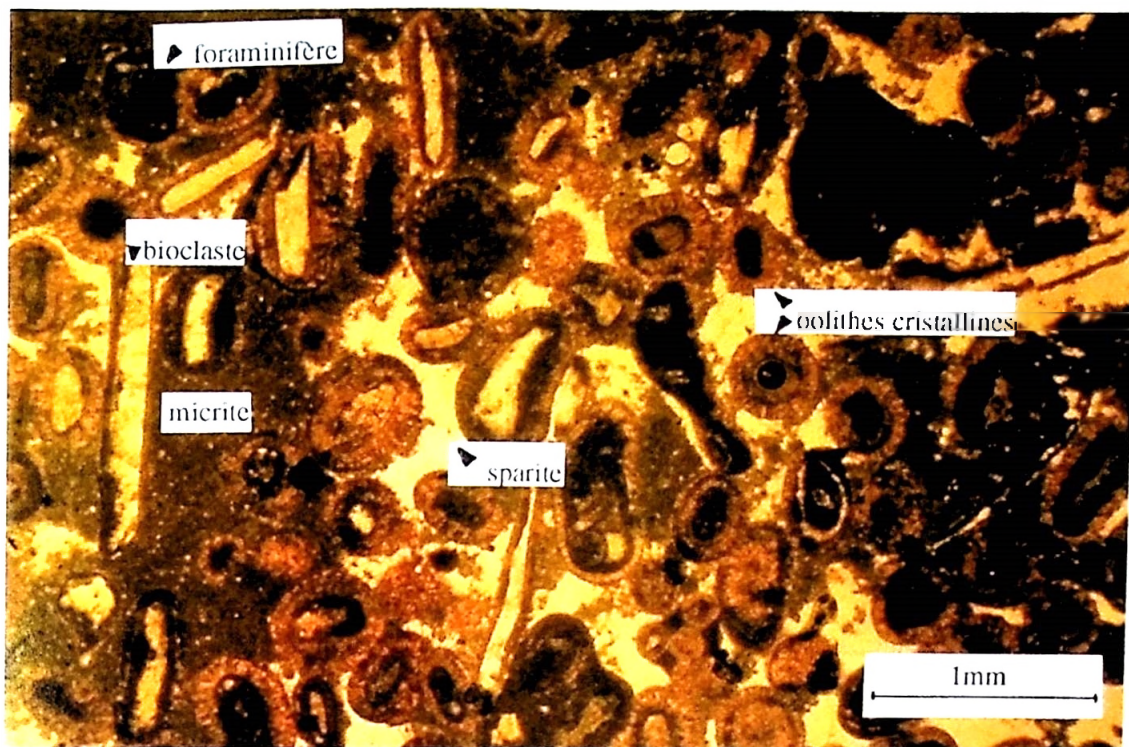
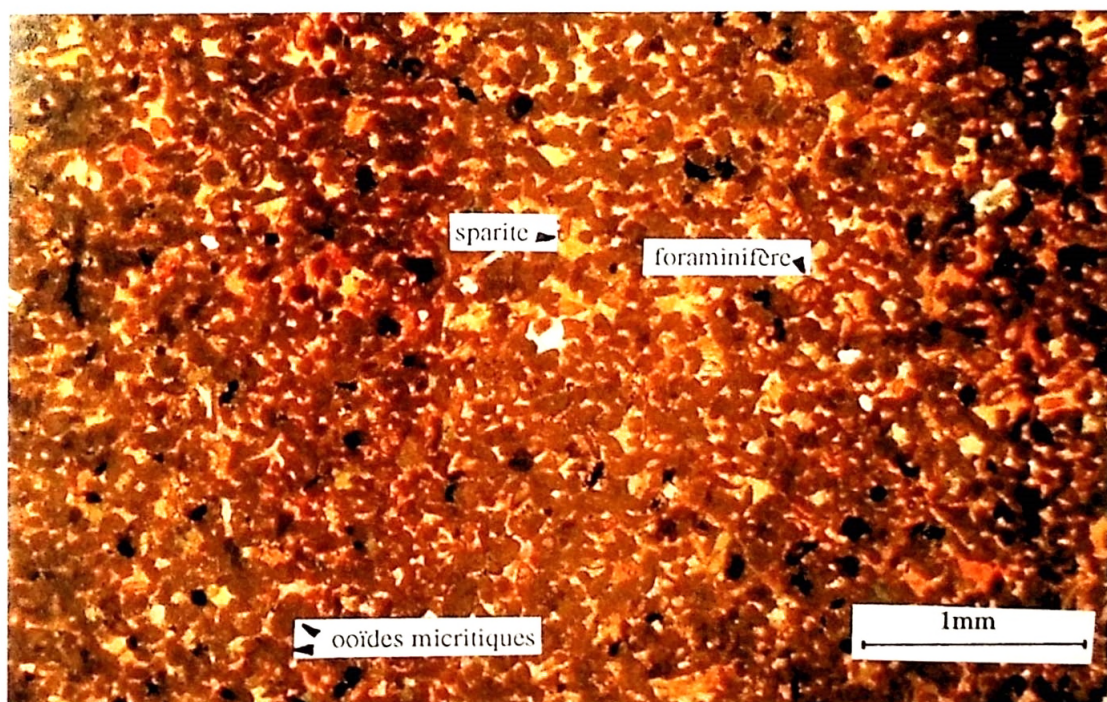


fig. 13: Vue microscopique du calcaire de la carrière de Fresnoy (lame 30).

fig. 14: Vue microscopique du calcaire finement oolithique à l'ouest de Grand (lame 32).



DEUXIÈME PARTIE

Recherche des causes de l'altération des blocs du grand appareil de l'amphithéâtre, identification de la pathologie et proposition de remède

Les roches employées dans la construction du "grand appareil" de l'amphithéâtre présentent manifestement des faciès assez homogènes (calcaire graveleux du "Niveau à matrice ou calcaire sublithographiques"). Il est pourtant possible de constater que certains blocs sont très altérés alors que les autres ne le sont pratiquement pas. Ceci ne devait logiquement pas être ainsi lors de la construction, puisque l'on peut supposer que les Romains utilisaient uniquement des blocs sains, en apparence du moins.

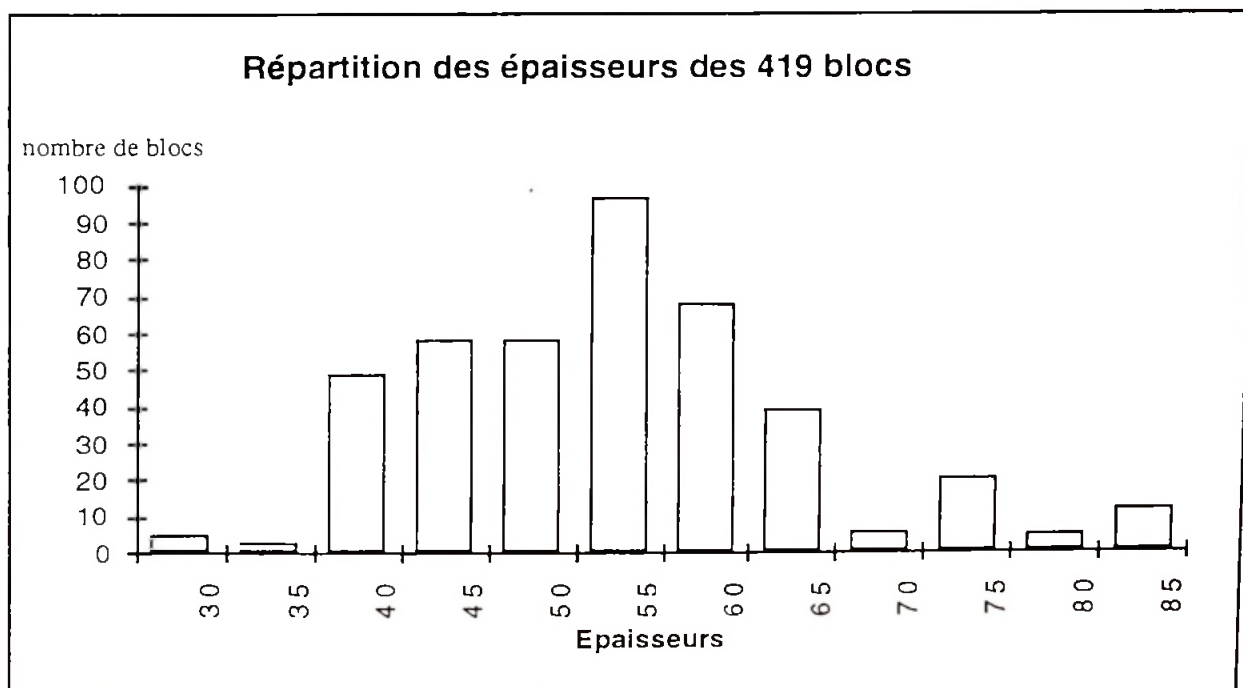
Pour cerner les mécanismes responsables de l'altération des blocs, une étude statistique à propos de la répartition de l'altération a préalablement été menée. Puis les recherches ont été dirigées suivant plusieurs éventualités possibles, à savoir le rôle de la dolomite, celui des argiles et enfin le rôle des joints stylolithiques et de la charge mécanique.

II) CONSTAT DE LA VULNERABILITE DES GEOMATERIAUX AUX

INTEMPÉRIES: Statistiques concernant la répartition de l'altération

419 blocs en "grand appareil" ont été inventoriés, afin de quantifier l'importance de l'altération et de permettre d'envisager différentes corrélations. Pour ce faire, les constructions en "grand appareil" ont été divisées en différents tronçons (cf. plan, fig. 17) à l'intérieur desquels chaque bloc a été répertorié suivant sa position, son épaisseur et son état apparent (voir annexes). Trois classes d'état apparent ont été envisagées : les blocs "sains", les blocs "altérés", et les blocs "semi-altérés". Cette dernière catégorie comporte des blocs en partie dégradés (le restant du bloc demeurant en bon état), ou moyennement dégradé sur la totalité ou la quasi totalité du bloc. Cette méthode principalement fondée sur un critère visuel est en partie subjective. Elle permet tout de même d'avoir une idée de la répartition des blocs suivant leur état apparent, et de mesurer l'ampleur de l'altération.

Fig. 15: Répartition des 419 blocs répertoriés, suivant leur épaisseur. On remarquera que la plupart des blocs ont une épaisseur comprise entre 40 et 65 cm.



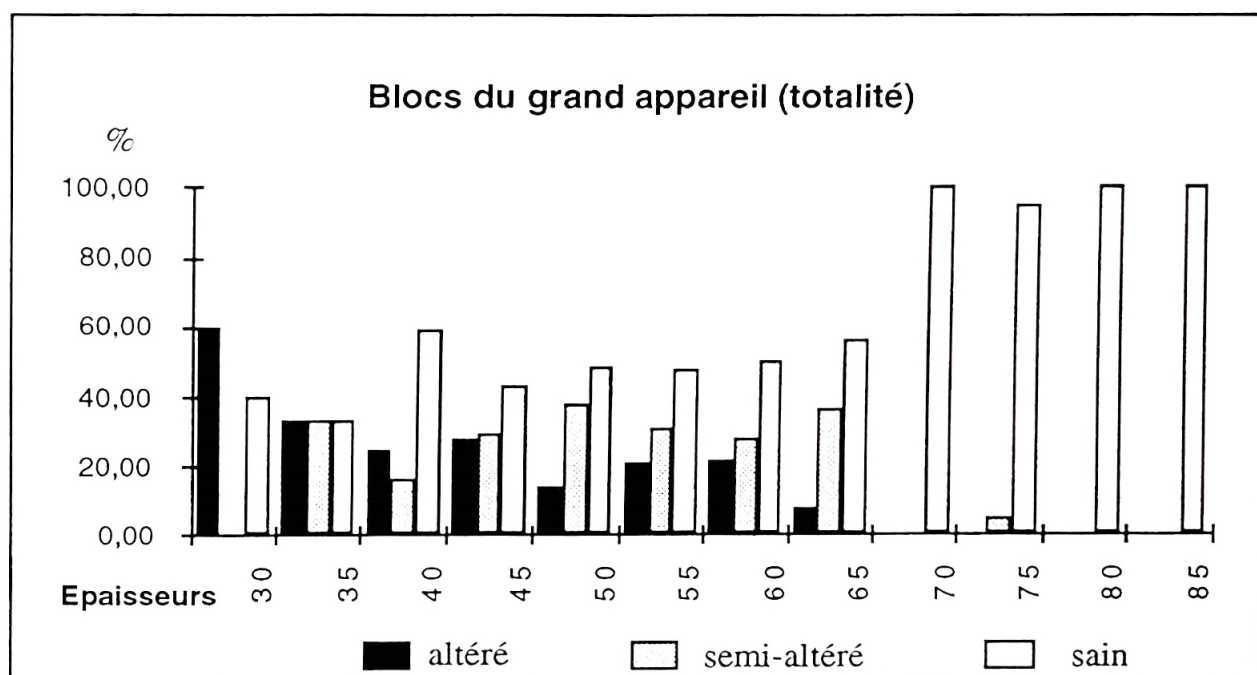
Épaisseurs par classes	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Nombre de blocs	5	3	49	58	58	96	68	39	6	20	5	12

Cette phase de recensement terminée, plusieurs analyses statistiques ont été effectuées. Elles visaient notamment à envisager une possible action de l'eau dans le processus d'altération, quantifier une certaine prédisposition des blocs à ce processus suivant leur épaisseur, leur exposition aux intempéries, ou leur position verticale.

A) Vulnérabilité des blocs en fonction de leur épaisseur

Suivant leur épaisseur, les blocs ne présentent pas la même vulnérabilité. Les classes allant de l'épaisseur 70 cm à 85 cm ne présentent que des blocs sains (hormis un bloc "semi-altéré" de 75 cm). Les blocs dont l'épaisseur varie entre 40 et 65 cm ont tous un comportement globalement identique, c'est-à-dire une proportion de blocs sains variant aux alentours de 50%. Les pourcentages de blocs "altérés" ou "semi-altérés", variables d'une classe à l'autre, varient respectivement aux alentours de 20% et 30%. Enfin, les blocs de faible épaisseur (30 à 35 cm) présentent apparemment une plus grande vulnérabilité. Mais leur quantité, peu importante, entraîne le problème de leur très faible représentativité.

Fig. 16:



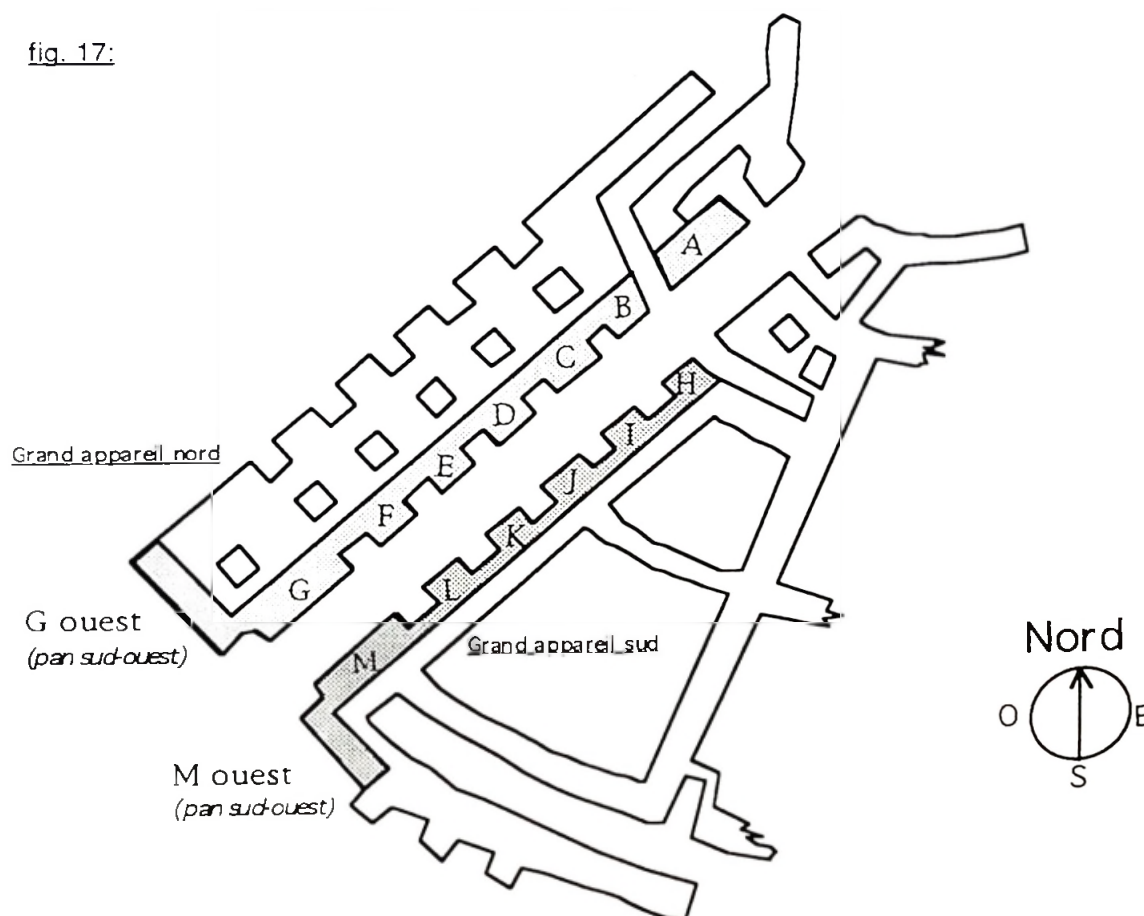
A la lumière de ces résultats on ne peut pas réellement mettre en évidence des bancs rocheux exploités en carrière, très sensibles ou non à l'altération. Il serait juste possible de suspecter la présence d'un banc épais, très résistant à l'altération, ayant essentiellement servi à extraire les blocs de 65 à 85 cm. Les autres blocs de plus petites tailles ayant alors été exploités dans un ou plusieurs bancs de plus faible épaisseur, plus sensible à l'altération.

Classes d'épaisseur	nombre de blocs altérés	% par classes	nombre de blocs semi-altérés	% par classes	nombre de blocs sains	% par classes	Total par classes
30	3	60,00		0,00	2	40,00	5
35	1	33,33	1	33,33	1	33,33	3
40	12	24,49	8	16,33	29	59,18	49
45	16	27,59	17	29,31	25	43,10	58
50	8	13,79	22	37,93	28	48,28	58
55	20	20,83	30	31,25	46	47,92	96
60	15	22,06	19	27,94	34	50,00	68
65	3	7,69	14	35,90	22	56,41	39
70		0,00		0,00	6	100,00	6
75		0,00	1	5,00	19	95,00	20
80		0,00		0,00	5	100,00	5
85		0,00		0,00	12	100,00	12
TOTAUX	78	18,62	112	26,73	229	54,65	419

B) Vulnérabilité des blocs et exposition aux intempéries

Pour cette étude, les constructions en "grand appareil" ont été découpées en quatre parties. Le grand appareil nord, comportant un pan exposé Sud-Est, et un autre exposé Sud-Ouest. De la même manière, le grand appareil sud comporte un pan exposé Nord-Ouest et un autre orienté vers le Sud-Ouest (voir plan du grand appareil, fig. 17). Dans chacune de ces parties, les blocs ont été classés dans les trois catégories "saine", "altérée", et "semi-altérée".

fig. 17:



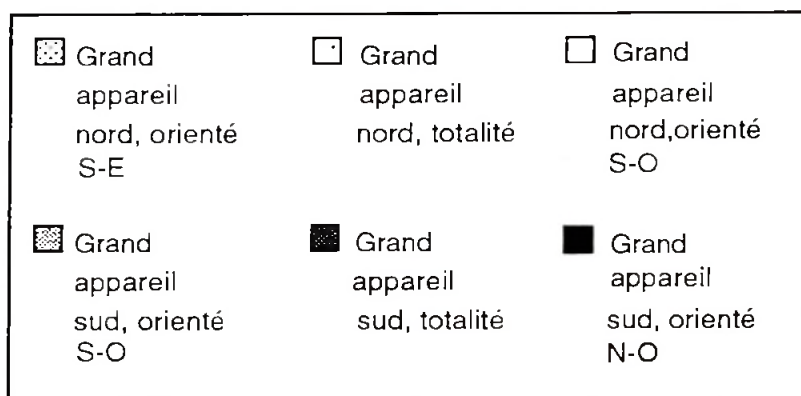
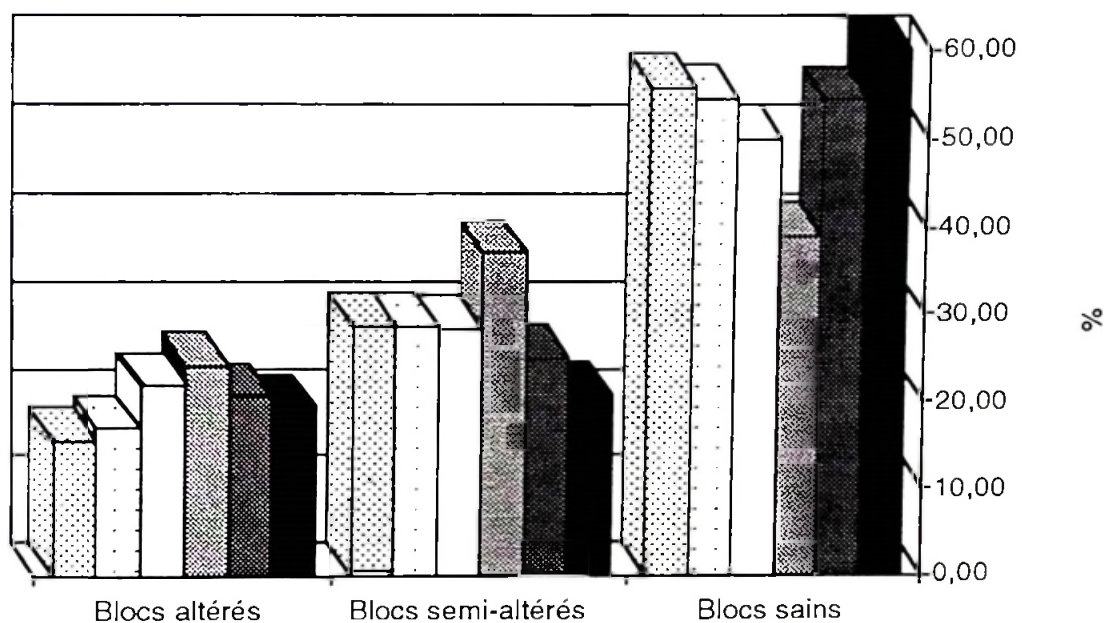
Désignation des différents tronçons du "grand appareil" de l'amphithéâtre.

Le dessin détaillé de chaque élément de maçonnerie, et la désignation des blocs figurent en annexe.

Etat	Grand appareil nord, orienté S-E	Grand appareil nord, totalité	Grand appareil nord, orienté S-O	Grand appareil sud, orienté S-O	Grand appareil sud, totalité	Grand appareil sud, orienté N-O
Blocs altérés	15,57	16,90	21,74	24,07	20,59	19,33
Blocs semi- altérés	28,74	28,64	28,26	37,04	25,00	20,67
Blocs sains	55,69	54,46	50,00	38,89	54,41	60,00

fig. 18:

Altération comparée des divers pans du grand appareil



On constate d'emblée que les pans exposés au sud-ouest sont nettement plus altérés que ceux exposés au sud-est ou au nord-ouest. En outre, parmi les deux pans exposés au sud-ouest, celui appartenant à la partie Sud du "grand appareil" présente une altération un peu plus prononcée.

Si le "grand appareil", parties nord et sud prises dans leur ensemble, contiennent le même pourcentage de blocs sains, la partie nord présente toutefois moins de blocs altérés et plus de blocs semi-altérés que la partie sud. En considérant que les blocs semi-altérés constituent une étape intermédiaire dans le processus d'avancement de l'altération, la partie nord présente une altération moins avancée que la partie sud, orientée vers le nord-ouest et le sud-ouest. Cette dernière est en effet plus soumise à l'humidité que la partie nord, qui est quant à elle plus ensoleillée car exposée vers le sud-est. On peut supposer qu'avec le temps, les blocs semi-altérés de la partie nord deviendront totalement altérés. Le degré d'altération de la partie nord du "grand appareil" finira donc par rattraper celui de la partie sud, avec un certain décalage temporel.

Ces deux constatations permettraient alors de mettre en évidence l'influence de l'exposition des blocs du "grand appareil" au soleil ou aux pluies dominantes (ouest à sud-ouest) sur leur altération. Les deux facteurs (ensoleillement et pluies dominantes) contrôlent effectivement le degré d'humidité permanente ou temporaire des différentes parties de l'ouvrage, d'où découle leur imprégnation hydrique. L'altération est donc étroitement liée à la présence de l'eau et de l'humidité.

Ces statistiques excluent également le rôle prépondérant du gel dans l'altération des blocs par gélifraction. Le gélifract affecterait les pans exposés vers le sud, donc principalement la partie Nord du grand appareil. Ce sont en effet les parties subissant la plus grande amplitude thermique journalière qui seraient préférentiellement touchées.

C) Vulnérabilité des blocs et position verticale dans les contreforts et façades

Afin de connaître la répartition verticale des blocs altérés, chaque contrefort et mur du "grand appareil" a été partagé en trois zones d'un tiers chacune (le tiers supérieur, le tiers intermédiaire, et le tiers inférieur). Il a ainsi été possible de voir la répartition de l'état des blocs, en fonction de leur position verticale. Cette étude a été réalisée successivement sur le "grand appareil nord", le "grand appareil sud", puis le "grand appareil" pris dans son intégralité (cf. dessin du grand appareil, fig 17).

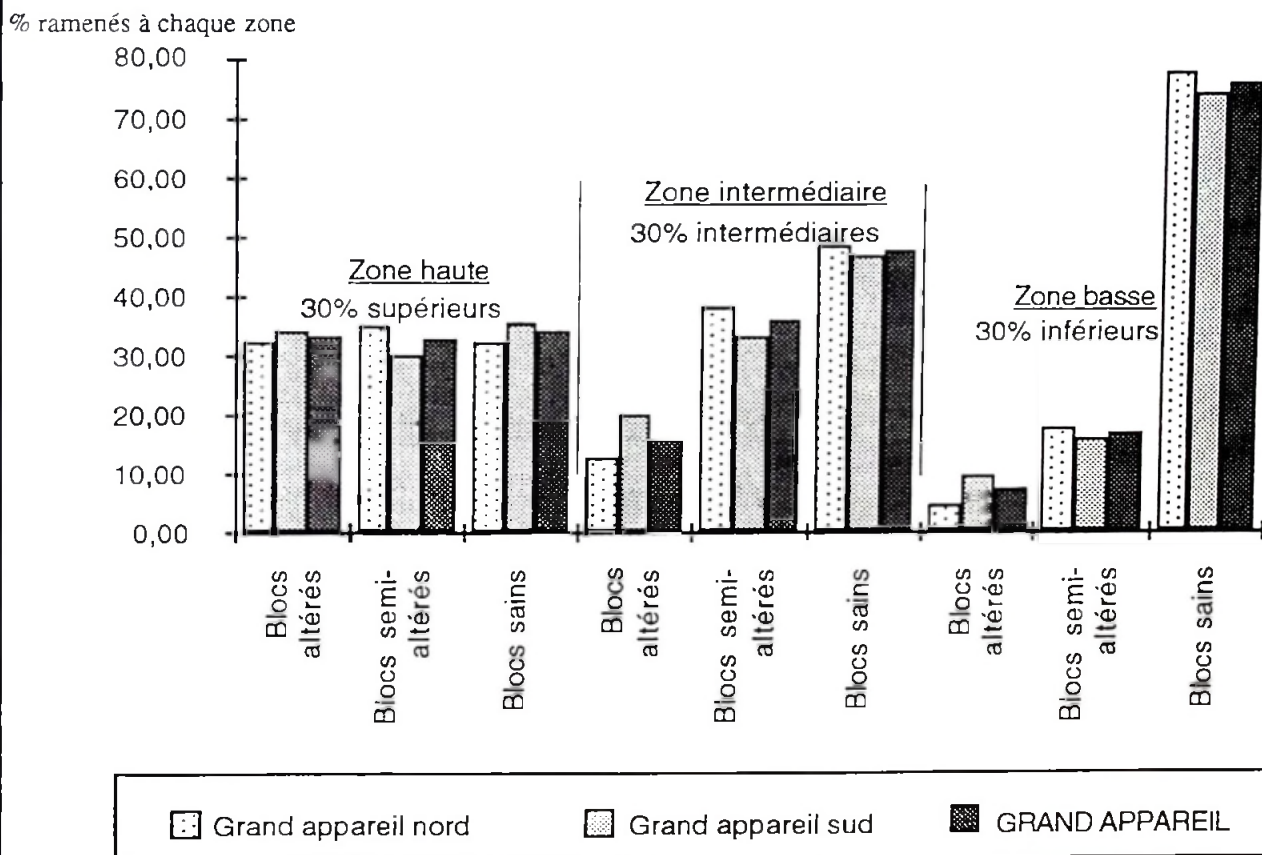
Emplacement	Partie supérieure (30% sup.)		
	Blocs altérés %	Blocs semi-altérés %	Blocs sains %
Grd. app. nord	32,43	35,14	32,43
Grd. app. Sud	34,25	30,14	35,62
GRAND APPAREIL	33,33	32,65	34,01

Emplacement	Partie intermédiaire (30% sup.)		
	Blocs altérés %	Blocs semi-altérés %	Blocs sains %
Grd. app. Nord	13,08	38,32	48,60
Grd. app. Sud	20,00	33,33	46,67
GRAND APPAREIL	16,24	36,04	47,72

Emplacement	Partie inférieure (30% inf.)		
	Blocs altérés %	Blocs semi-altérés %	Blocs sains %
Grd. app. Nord	4,71	17,65	77,65
Grd. app. Sud	9,88	16,05	74,07
GRAND APPAREIL	7,23	16,87	75,90

fig. 19:

Etat des blocs suivant leur altitude dans l'ouvrage



Pour chaque partie du grand appareil (nord,sud,et totalité), répartition de l'état des blocs suivant trois zones verticales

On peut voir de façon très nette que le caractère altéré des blocs croît progressivement au fur et à mesure que l'on monte dans les ouvrages. L'inverse se produit pour les blocs sains. Ils représentent en moyenne 34% des blocs dans la partie supérieure contre 76% dans la partie inférieure. Cette distribution préférentielle des blocs altérés vers le haut des ouvrages est certainement la conséquence de la pluie. Les blocs du haut sont en effet plus soumis à la pluie et aux ruissellements.

On remarquera encore à tous les niveaux, ce qui avait été remarqué précédemment (cf. § II, B) : la partie nord du grand appareil possède plus de blocs sains et semi-altérés et moins de blocs altérés que la partie sud.

L'hypothèse qui consisterait à associer l'altération à une remontée capillaire de l'eau de la nappe phréatique est totalement écartée, vu la polarité de l'altération.

D) Observation des différents degrés d'altération des blocs

Pour les besoins statistiques, les blocs ont été classés en trois catégories, sains, altérés et semi-altérés. Une observation plus détaillée montre en réalité que tous les blocs, y compris les blocs "sains", ont subi une altération autre que la patine de la pierre au cours du temps.

On remarque en définitive deux types d'altération distincts affectant les blocs en "grand appareil" de l'amphithéâtre de Grand, à savoir un phénomène de délitage des blocs suivant leur allongement, (cf. § III, C) et un phénomène de desquamation (cf. § III, D).

Les blocs ne sont pas touchés de la même façon par le délitage, ce qui permet ainsi de reconstituer l'évolution de ce type de processus au fil de son avancement.

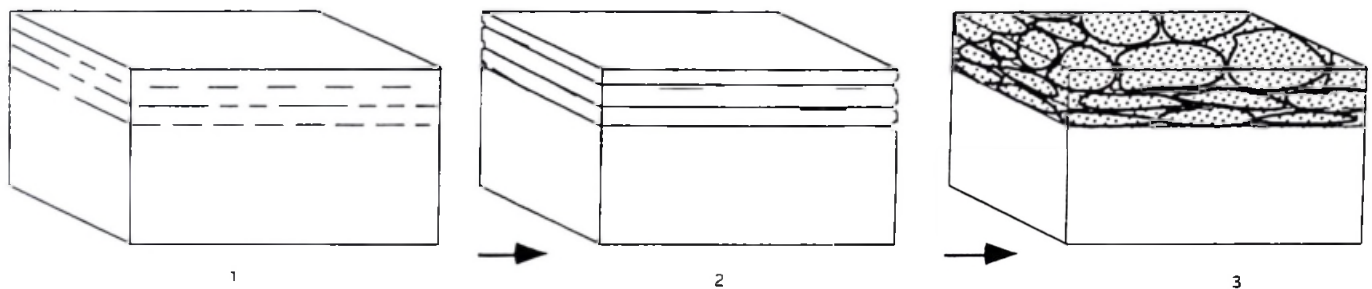


fig. 20: Déléitage progressif d'un bloc du "grand appareil":
ouverture progressive de lits plans, puis fissuration et débit de la roche en "rognons".

Le délitage est causé par l'ouverture progressive sous l'effet de l'eau de plans parallèles soulignant le litage de la roche. On verra plus loin que ces plans qui marquent le litage de la roche sont visibles en carrière, et sont des joints stylolithiques.

E) Conclusion

Cette étude statistique permet de mettre parfaitement en évidence le rôle de l'eau dans l'altération des blocs du "grand appareil" de l'amphithéâtre de Grand. En effet, les parties les plus exposées à la pluie (cf. § II, C, "influence sur la répartition verticale") et à l'humidité (cf. § II, B, "influence sur l'exposition") sont les plus touchées par l'altération. Cette dernière se manifeste donc plus ou moins en fonction de variations d'ensoleillement et d'exposition à la pluie, ou de positionnement dans l'ouvrage. La pluie a par ailleurs une action beaucoup plus prononcée que l'humidité comme le montrent les écarts statistiques, plus importants dans un cas que dans l'autre.

L'épaisseur des blocs semble également intervenir, puisque les plus épais (65 cm et plus) sont très peu vulnérables, contrairement aux blocs de taille moyenne dont seulement 50% sont dans un état correct.

Il faut cependant faire attention à l'imbrication de ces deux phénomènes. Les blocs épais peuvent en effet être sains en raison de deux hypothèses:

- 1- Ils possèdent des propriétés rhéologiques caractéristiques, responsables de leur bonne résistance à l'altération.
- 2- Leur position verticale est plutôt vers le bas de l'édifice, d'où une attaque moins sévère de la part des eaux de pluie.

Le moteur de l'altération étant identifié, on a pu constater par ailleurs deux modes d'altération dont l'un prédomine. En effet, la plupart des blocs altérés subissent un phénomène de délitage suivant leur allongement alors que quelques autres sont affectés par une desquamation.

III) IDENTIFICATION DES FACTEURS RESPONSABLES DE LA VULNERABILITE DES BLOCS DU GRAND APPAREIL DE L'AMPHITHEATRE

A) La dédolomitisation

Des phénomènes de dédolomitisation ont été observés dans l'étude pétrographique des blocs de l'amphithéâtre (cf. § I, C, 3 : "étude microscopique"). Il est intéressant d'approfondir la question pour mettre en évidence son éventuel rapport avec l'altération, d'autant plus que la dolomite semblait être liée aux blocs altérés.

1) Colorations sélectives à l'Alizarine rouge S

La dolomite avait uniquement été identifiée sur les critères de sa forme losangique et de son aspect clivé plus systématique. Des colorations sélectives ont donc été effectuées pour confirmer cette hypothèse, et la coloration d'une lame mince à l'alizarine rouge S confirme effectivement le caractère dolomitique (fig. 21).

L'alizarine rouge S colore en rouge la calcite, mais n'affecte pas la dolomite qui reste donc incolore. La solution utilisée pour les roches est réalisée avec 1 gramme de rouge d'alizarine (Alizarine Sulfonate de Soude), mélangé à 10 cm³ d'acide chlorhydrique par litre d'eau distillée (et seulement 1 cm³ d'acide chlorhydrique par litre d'eau distillée pour la coloration des lames minces).

Les échantillons partiellement destinés à la confection des lames minces ont donc servi de test après un décapage à l'acide chlorhydrique dilué. On note une bonne corrélation entre l'observation de petits minéraux non colorés par l'alizarine et la présence de dolomite dans la lame correspondante.

Fig. 21:

Numéro d'échantillon (lame mince)	Etat de l'échantillon	Présence de dolomite (lame mince)	Présence de fantôme (lame mince)	Recristallisation des fantômes (lame mince)	Test à l'Alizarine
1	altéré	+	+	-	++
2	sain	-	+	+	-
3	altéré	+	+	-	++
4	sain	-	+	+	qq?
5	altéré	++	qq	-	++

Ce test rapide fonctionnant de manière acceptable, d'autres petits fragments de roches ont été prélevés sur des blocs de l'amphithéâtre. Le but étant de confirmer ou non l'association systématique de dolomite avec les blocs altérés, et son absence dans les blocs sains.

Fig. 22: Les numéros d'échantillons se réfèrent à la désignation des blocs (voir la désignation des blocs en "Annexes").

Echantillon	Etat apparent	Test à l'Alizarine
M 61	A	+
E (base)	S	-
M w	A	+
G 14	A	+
E 41	A (fractures)	-
F 22	S	-
E 12	S	-
F 21	S	-

Echantillon	Etat apparent	Test à l'Alizarine
I (base)	S	-
M 33	A	+
M 40	A	+
A 32	A	+
B 41	A	+
B 51	A	+
G w	A	+

2) Observation au microscope optique

Les blocs échantillonnés présentent un faciès semblable, à la structure près (packstone ou wackstone). Sur tous les blocs échantillonnés on constate cependant que les lames minces provenant des blocs altérés présentent systématiquement des cristaux de dolomite, alors que les lames réalisées dans les blocs sains n'en présentent pas ou très peu. Par contre, dans un cas comme dans l'autre, de nombreux pores ont une forme caractéristique en losange et seraient ainsi des fantômes d'anciens cristaux de dolomite.

a) Les blocs sains

Comme cela vient d'être indiqué, les lames minces effectuées dans les blocs sains ne présentent pas de dolomite, mais ont des pores losangiques secondaires probablement issus d'une dédolomitisation. Dans ce cas, contrairement au précédent, la dédolomitisation a été quasiment totale. A la loupe binoculaire, après coloration à l'alizarine, les échantillons montrent encore quelques rares cristaux incolores.

Une observation plus fine de la fraction interstitielle de la roche montre des formes losangiques visiblement recristallisées par une calcite nécessairement plus tardive (fig. 23, et § III, A, 3, c.). C'est ainsi qu'il est parfois possible de distinguer un losange de micrite ou de microsparite dans une plage sparitique. Les plages micritiques, quant à elles, regorgent en certains endroits de petits losanges souvent marqués par un liseré d'oxydes de fer qui permet de les identifier. Leur texture interne ne comporte en effet qu'une micrite plus grossière à tendance microsparitique, peu différente de la roche environnante. Certains pores losangiques peuvent être partiellement comblés par des oxydes de fer. Ces oxydes de fer associés aux pores losangiques peuvent être issus de la dédolomitisation, puisque les dolomites en s'altérant libèrent la faible quantité de fer qu'elles possèdent.

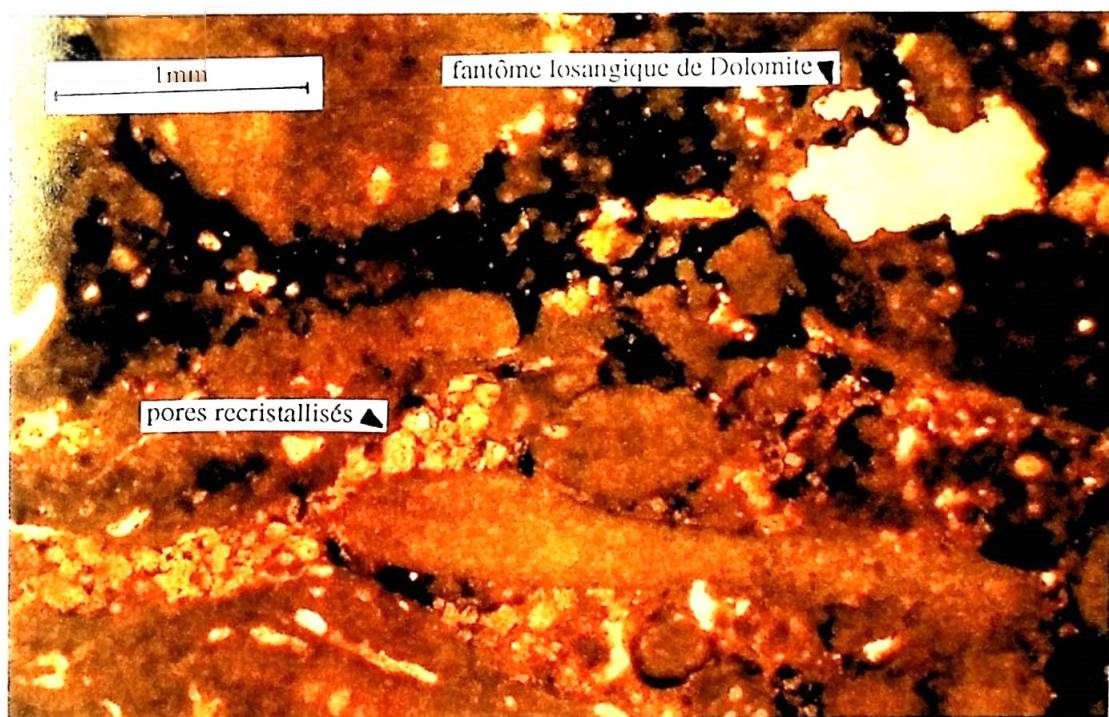


Fig. 23: Pores losangiques recristallisés par une calcite plus tardive (lame n°4)

Une partie de la porosité secondaire de ces blocs a donc été recimentée par de la calcite ou de la dédolomite. Le caractère magnésien ou non analysé au M.E.B., devrait permettre de trancher en faveur de l'une ou l'autre de ces deux phases, leur stabilité chimique n'étant pas la même.

b) Aspect des cristaux de dolomite des blocs altérés

Au microscope polarisant, la différence entre la dolomite et la calcite est normalement assez délicate, mais dans le cas présent les cristaux de dolomite ont un aspect manifestement très altéré qui se manifeste par un gonflement très net des clivages (et rendent le minéral encore plus facilement reconnaissable). Si l'altération est plus avancée, une partie du minéral, de forme initialement losangique, a disparu au profit de la formation partielle d'un pore secondaire. La dolomite totalement altérée, il ne reste plus qu'un pore losangique comme ceux mentionnés plus haut. Dans de nombreux cas, il est possible de constater une disparition prioritaire et maximale de la dolomite au coeur des cristaux (fig. 24).

Certains auteurs expliquent la genèse de certaines dolomites à partir de pelotes bactériennes, autour desquelles elles se formeraient. Partant de cette hypothèse, le "pore" au centre des cristaux ne pourrait être qu'un artefact dû à l'arrachement de la pelote au moment de la confection de la lame mince. Ceci est difficilement vérifiable. Il est enfin possible de remarquer que la dolomitisation s'est uniquement développée dans la phase interstitielle, ce qui indique un caractère partiel du phénomène de dolomitisation. Les parties micritiques étant alors les premières à subir une dolomitisation (PURSER, 1975).

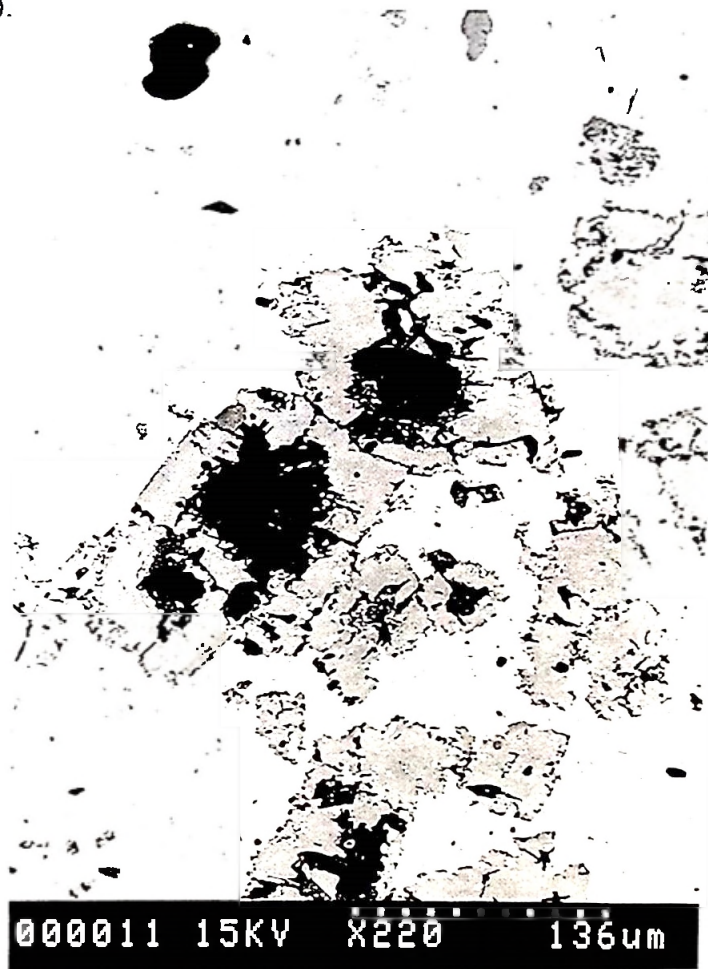


Fig. 24: Cristaux de dolomite aux clivages très apparents, et un "pore" central (lame 1b).

3) Observation au Microscope Electronique à Balayage

Des analyses ont été réalisées sur des lames minces et des fragments des roches de l'amphithéâtre, pour connaître la composition des différentes générations de minéraux et observer la structure de la roche.

Un spectre de répartition du magnésium sur une lame mince confirme sans équivoque la présence de dolomite. On s'aperçoit alors que les zones de forte réponse en magnésium coïncident exactement avec les minéraux attendus (photos MEB, fig. 25).

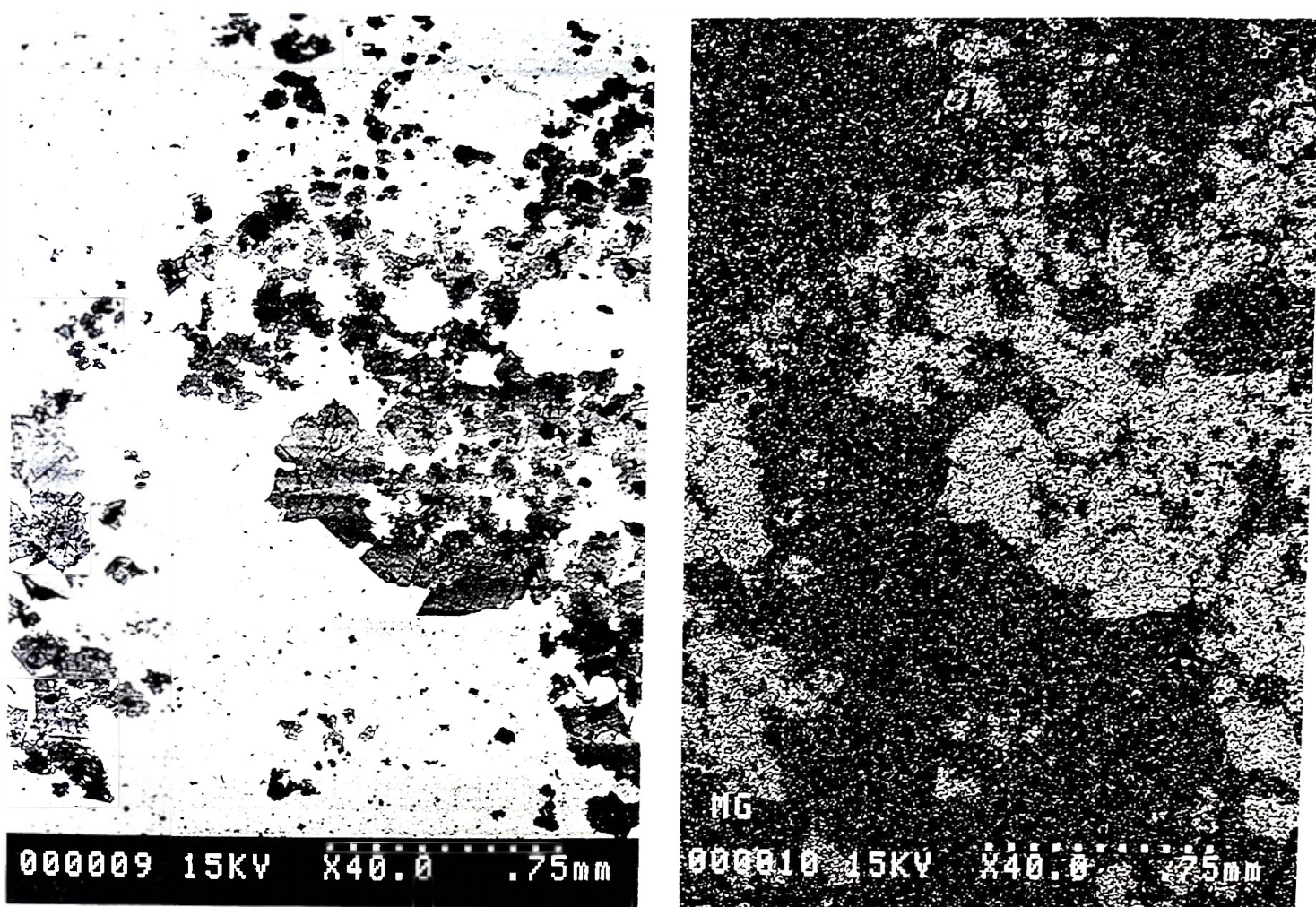


Fig. 25: Répartition des cristaux de dolomite (cristaux sombres à gauche) et du magnésium (plages blanches à droite)

a) Teneur en magnésium de la dolomite

L'analyse quantitative effectuée sur une partie peu altérée d'un cristal de dolomite donne la composition suivante :

Fig. 26:

Element & Line	Weight percent	Atomic percent
O K α	55,13	74,55
Mg K α	4,71	4,19
Ca K α	37,36	20,17
Fe K α	2,80	1,09

Les cristaux de dolomite présents dans la roche n'ont pas de magnésium dans des proportions stoechiométriques. La dolomite légèrement ferrifère est en effet à 17% de magnésium, il s'agit donc de "Calcite Magnésienne".

b) Répartition du calcium-magnésium dans la dolomite

Sur les clichés ci-après réalisés au M.E.B. (fig. 27), une même plage de lame mince a subi trois analyses successives mettant en évidence le calcium, le magnésium et le silicium (inutile dans notre cas). Le quatrième cliché en bas à droite correspond à la photographie de la plage étudiée, et permet de distinguer des cristaux losangiques de dolomite partiellement altérés (pores visibles au centre). Les spectres de répartition du calcium et du magnésium montrent une légère

baisse de la teneur en calcium (zones plus sombres) là où la teneur en magnésium est plus élevée (zones brillantes). Cette constatation est tout à fait normale pour un carbonate double de calcium et magnésium. On remarquera surtout que les deux spectres se recouvrent parfaitement et qu'il n'existe pas de zonalité particulière en un élément comme, l'atteste la répartition uniforme en calcium et magnésium.

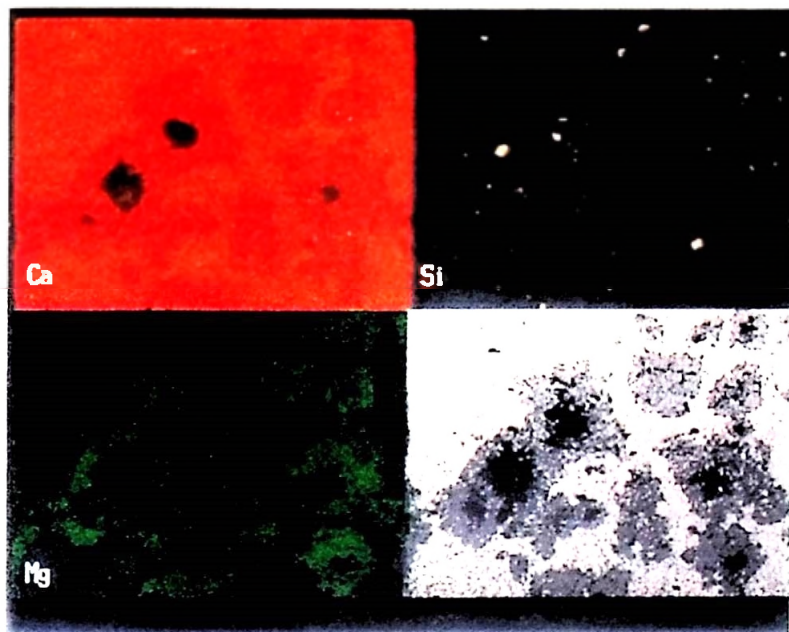
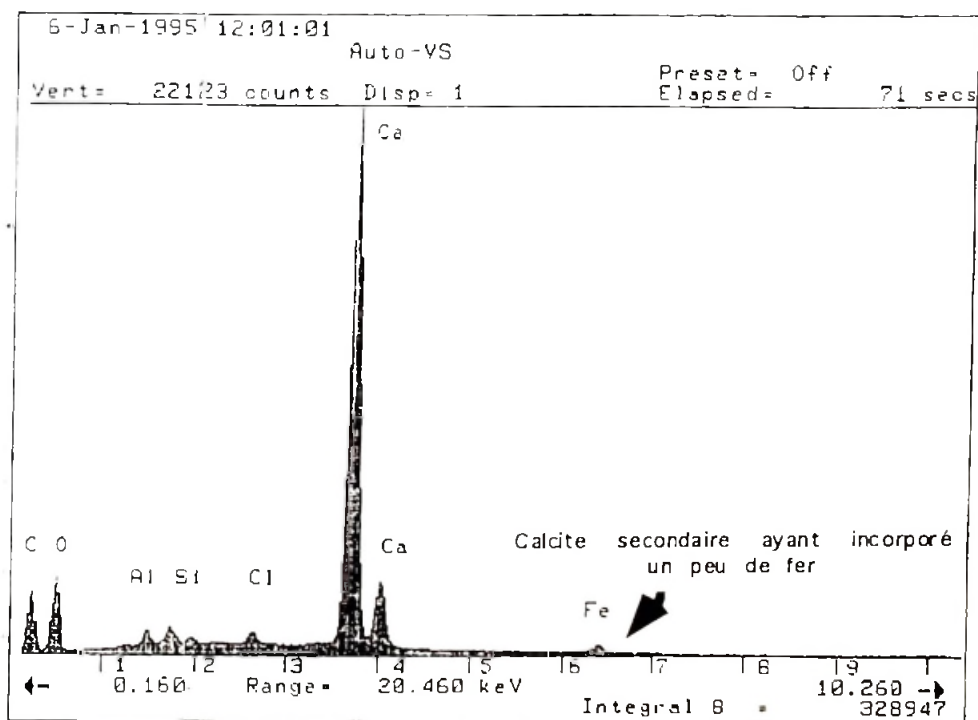


Fig. 27: Répartition du calcium et du magnésium dans la dolomite.

c) Analyse de la phase cimentant les pores losangiques

Une analyse qualitative focalisée sur le contenu d'un pore recimenté (lame mince d'un bloc sain) confirme la présence de calcite très légèrement ferrifère (ou d'aragonite, mais elle ne présente pas de structure fibreuse). D'autre part, elle ne contient pas de magnésium de façon significative (cf diffractogrammes, fig; 28).

Analyse réalisée sur de la calcite tardive recimentant un pore losangique.



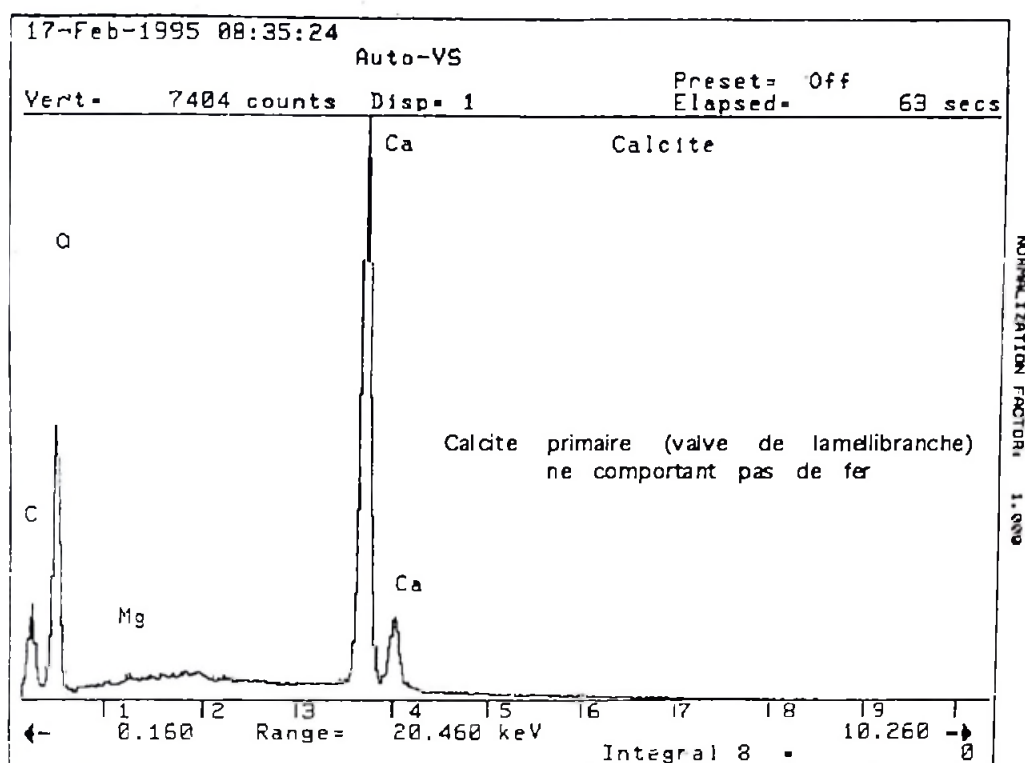


Fig. 28: Analyse comparée de calcite primaire et secondaire

Le fait que cette calcite ait incorporé un peu de fer dans son réseau pourrait indiquer une cristallisation secondaire intervenue après la dédolomitisation. Ces cristaux de calcite secondaire ont ainsi repris une partie du fer libéré par les dolomites et la pseudomorphose de la pyrite. On trouve également le restant de ce fer disséminé dans la roche sous forme d'oxydes et notamment dans des pores vides. A titre de comparaison, l'analyse d'une calcite primaire constituant une valve de lamelibranche ne présente aucune trace de fer sur son diffractogramme (cf. fig. 28).

Le caractère non magnésien de cette phase montre qu'il ne s'agirait pas de dédolomite, et indique par conséquent qu'elle est stable et ne peut contribuer à un phénomène d'altération. La dédolomite est en effet métastable en raison de sa teneur encore élevée en magnésium. Présente dans la roche, elle pourrait donc se dissoudre à son tour en relibérant les pores initialement occupés par la dolomite (EVAMY, 1967). Ce phénomène aurait pour effet probable l'altération de la roche par désagrégation hydrique. De plus, la dédolomite redessine généralement la texture prédolomitique (mais dans nos blocs, elle ne recoupe pas de structure particulière) et présente une texture microgrenue (EVAMY, 1967).

Il faut cependant faire attention au fait que la dolomite étant très peu magnésienne, la dédolomite qui la remplace ne pourrait l'être pratiquement plus. Elle aurait alors la composition d'une calcite.

d) Géométrie des pores

Des échantillons ont été observés en relief pour observer la forme des pores et en particulier ceux ayant une forme losangique en lame mince. A plusieurs reprises de petites cavités avaient une allure de rhomboèdre. On peut effectivement penser que ces pores sont issus d'une dédolomitisation. D'un autre côté, un autre fragment de roche prélevé sur un bloc altéré présente des cristaux rhomboédriques de dolomite partiellement altérés.

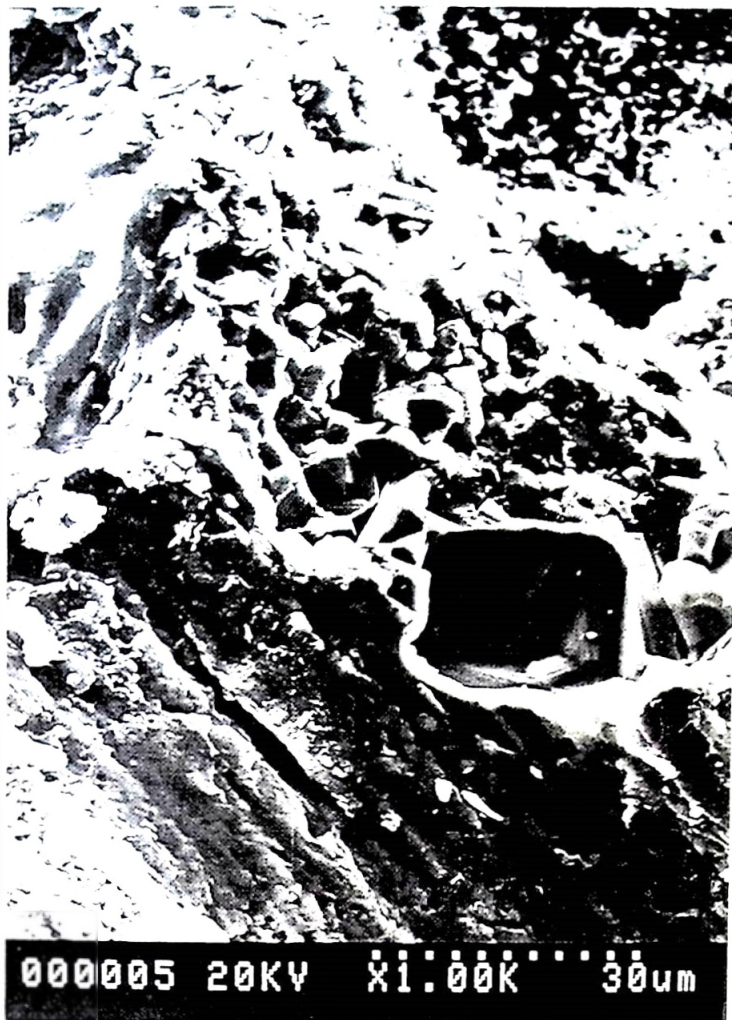


Fig. 27: Géométrie d'un pore rhomboédrique (à gauche), et d'un cristal de dolomite (à droite).

4) Conditions de stabilité de la dolomite

Suivant que la réaction de dédolomitisation est congruente (à forte P_{CO_2} , plus de 1 atm) ou incongruente (à faible P_{CO_2} , moins de $0,3 \cdot 10^{-3}$ atm), on a une dissolution pure et simple de la dolomite, ou une libération d'eau et de calcite (dédolomite). Dans tous les cas, la dédolomitisation ne peut se faire à une température supérieure à $50^\circ C$. Il ne peut donc s'agir que d'un processus très tardif (DE GROOT, 1967), ou au contraire très précoce (PURSER, 1975).

Une dédolomitisation partielle de la roche ayant pour effet d'augmenter la porosité et la perméabilité pourrait contribuer à altérer les blocs en accélérant les circulations d'eau. En outre elle contribuerait à rendre la roche moins cohérente.

Divers arguments permettent de penser que la dolomite est stable et n'intervient pas directement dans le processus d'altération. Dans les conditions de surface, elle est plus stable que la calcite elle-même. Cependant, la présence de sulfates pourrait, dans ces mêmes conditions, la déstabiliser. Or des analyses par fluorescence aux rayons X montrent que la teneur en sulfates est quasiment négligeable dans la roche, comme dans le ciment romain que l'on peut rencontrer au contact de certains blocs. Des analyses d'eau prélevée dans la nappe phréatique (CEBTP, 1990) aboutissent à une conclusion similaire : la teneur en sulfates de 21 mg/l est faible.

Il est d'autre part possible d'observer en lame mince un cristal de dolomite qui dépasse à l'intérieur d'une microfracture. Or on peut supposer que de l'eau percolait dans cette fracture de l'échantillon prélevé en surface d'un bloc altéré. La dolomite n'a pourtant pas été

déstabilisée. Cette observation tend une nouvelle fois à démontrer que la dolomite est stable dans les conditions actuelles.

5) Mesures de porosimétrie

La masse volumique réelle, le coefficient d'absorption d'eau et la porosité ont été mesurés suivant les prescriptions de la norme expérimentale P18-554 (AFNOR 1990).

On obtient alors pour les blocs sains en "grand appareil" de l'amphithéâtre:

Coefficient d'absorption: 1,04 Porosité: 3,01

La porosité connectée des échantillons donne une valeur relativement faible.

6) La dédolomitisation et l'altération des blocs

Les deux types de roche, saine et altérable, ont été affectées par une dolomitisation faiblement magnésienne. Mais malgré la présence plus systématique de dolomite dans les blocs altérés, on peut abandonner l'idée selon laquelle elle serait la cause actuelle de l'altération. En l'absence de sulfates, la dolomite est plus stable que la calcite. De plus, la phase qui la remplace après la dédolomitisation n'est pas métastable : sa composition est celle d'une calcite légèrement ferrifère.

La dédolomitisation qui a concerné les blocs sains a conduit à l'apparition d'une porosité secondaire, mais celle-ci non connectée et partiellement recomblée par de la calcite et ne permet pas la circulation d'eau.

On peut néanmoins envisager une association assez étroite du processus de dolomitisation-dédolomitisation avec la véritable cause de l'altération.

B) Le rôle des argiles

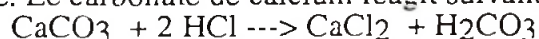
Puisque le phénomène de dégradation des blocs de l'amphithéâtre est lié à l'eau, la présence d'argiles et plus particulièrement d'argiles gonflantes pourrait être en cause dans le processus. On a donc cherché à quantifier le pourcentage d'argiles et leur nature dans les deux types de blocs, sains et altérés. Les deux échantillons prélevés ("Ibase", sain, et "M40", altéré, sur le plan de répartition des blocs en annexe) ont été concassés au concasseur à mâchoires jusqu'à l'obtention d'une granulométrie de 10 mm. Ensuite et pour chaque manipulation, la fraction d'échantillon prélevée a été préalablement quartée avec un quarteur.

1) Mesure du pourcentage d'insolubles

La mesure de ce pourcentage massique s'est faite suivant deux méthodes différentes. Une méthode d'extraction des insolubles par centrifugation, et une autre par calcimétrie. Tous les échantillons analysés ont été préalablement quartés à partir du concassé de 10 mm.

a) Extraction des insolubles par centrifugation

La méthode consiste en une attaque totale, à l'acide chlorhydrique, d'un fragment de calcaire préalablement pesé. Le carbonate de calcium réagit suivant la réaction:



Il reste alors, en suspension, une fraction insoluble composée d'argiles, de matière organique et de quartz-feldspath. On sépare les deux phases solide et liquide par centrifugation. Le surnageant acide est alors pipeté (en prenant garde de ne pas aspirer une partie de la fraction solide formant le culot). Pour pouvoir sécher les insolubles à l'étuve, ils sont ensuite rincés à l'eau distillée pour éliminer l'acide résiduel. Après passage à l'étuve, on connaît la masse d'insolubles en mesurant la variation de masse des tubes de la centrifugeuse avant et après les manipulations. Pour ne pas engendrer de pertes durant toutes les manipulations, les éprouvettes de centrifugation ne sont jamais vidées de leur contenu en insolubles. Le protocole des manipulations figure en annexe.

Les pourcentages obtenus en insolubles sont les suivants :

Roche altérée (M40): 4,16%

Roche saine (I base): 2,53%

b) Calcimétrie

La calcimétrie consiste à connaître la teneur en CaCO_3 d'une roche en la faisant réagir avec de l'acide chlorhydrique en excès et en mesurant la quantité de gaz dégagé. Toutes les mesures se font sur 0,50 g d'échantillon finement broyé. Dans notre cas, les échantillons analysés en calcimétrie avaient été porphyrisés durant trois minutes dans un broyeur à anneaux. Les pourcentages de carbonate de calcium sont calculés en ramenant le volume de gaz dégagé à celui d'un échantillon de carbonate de calcium pur.

Les résultats suivants ont été obtenus : fig. 30.

Echantillon	Essai	Volume de gaz dégagé (cm ³)	Pourcentage CaCO_3	Pourcentage d'insolubles
CaCO_3 pur I base	1	121	100	0
	1	118	97,52	2,48
	2	116	95,87	4,13
M 40	1	118	97,52	2,48
	2	118	97,52	2,48

c) Conclusion

Les mesures précédemment effectuées permettent de voir que les calcaires utilisés sont très purs, puisque leurs teneurs en carbonate de calcium sont élevées, proches de 97-98%. On remarquera également que la roche altérée, comme la non altérée, présentent des teneurs en insolubles (et probablement en argiles) assez semblables. L'altération préférentielle d'un bloc par rapport à un autre ne semble donc pas être causée par une plus forte teneur en argiles.

Elle est peut-être liée, non pas à une notion quantitative, mais qualitative, ou à un problème de concentration dans des zones données, comme les joints stylolithiques. C'est ce que l'on se propose de vérifier dans le paragraphe suivant en analysant la nature des argiles.

2) Diffractogramme des argiles

a) Méthodologie

Les poudres analysées aux rayons X sont issues des échantillons "I base" et "M 40" concassés à 10 mm, quartés, puis porphyrisés pendant trois minutes au broyeur à anneaux.

Les diffractogrammes ont été obtenus : sur la poudre "nature", après chauffage à l'étuve à 490°C pendant plusieurs heures, après traitement à la glycérine, après traitement à l'hydrazine.

La source des rayons X est la raie $K\alpha$ (1,937 Å) d'une anticathode au fer.

b) Dépouillement des résultats

A partir des angles 2θ fournis par le diffractogramme, il est possible de retrouver les distances " $d(hkl)$ " par la relation de Bragg : $d(hkl) = \lambda / 2 \sin \theta$.

Les différentes valeurs " d " permettent ensuite d'identifier les espèces minéralogiques. Les résultats numériques des deux échantillons figurent dans les tableaux disposés en annexe.

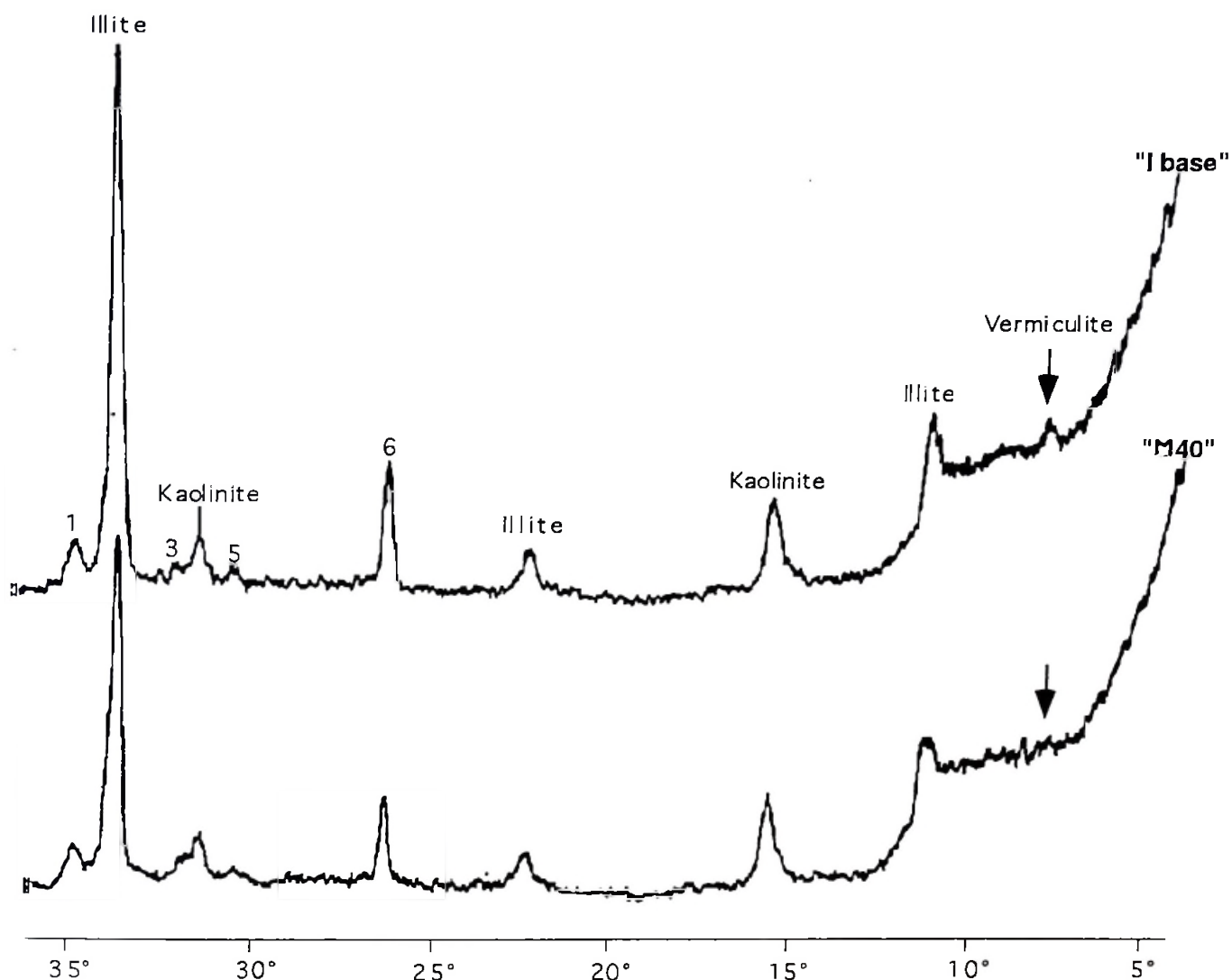


fig. 30:

Diffractogrammes des échantillons "I base" et "M40" à l'état nature, obtenus avec une anticathode au fer (dépouillement des diffractogrammes en annexe).

c) Analyse des résultats

Les deux types de blocs échantillonnés, l'un sain et l'autre altéré, présentent des diffractogrammes similaires où trois types d'argiles ont été identifiés : l'illite, la kaolinite et la vermiculite. L'illite et la kaolinite n'ont pas réellement de propriétés gonflantes, contrairement à la vermiculite. Cette dernière possède des propriétés gonflantes en raison de la couche d'eau présente entre ses feuillets. Ceci se traduit lors d'un traitement à l'hydrazine, par un passage du pic centré à 14 Å à une valeur de 10 Å.

d) Conclusion

Il n'existe pas de différence fondamentale au niveau de la teneur et de la nature minéralogique des argiles des blocs sains et altérés. Uniformément disséminées dans le bloc, les argiles que l'on vient de caractériser ne peuvent pas être à l'origine de l'altération de la roche. Par contre, très concentrées au niveau des joints stylolithiques, elles peuvent très certainement avoir une influence non négligeable dans le phénomène d'altération.

C) Les joints stylolithiques

1) L'action des joints stylolithiques dans le délitage

Les joints stylolithiques se forment à la faveur d'une contrainte exercée sur la roche, qui tend à rapprocher deux compartiments qui s'interpénètrent. Suite à cette interpénétration, la roche subit une dissolution près de la surface de discontinuité appelée "joint stylolithique".

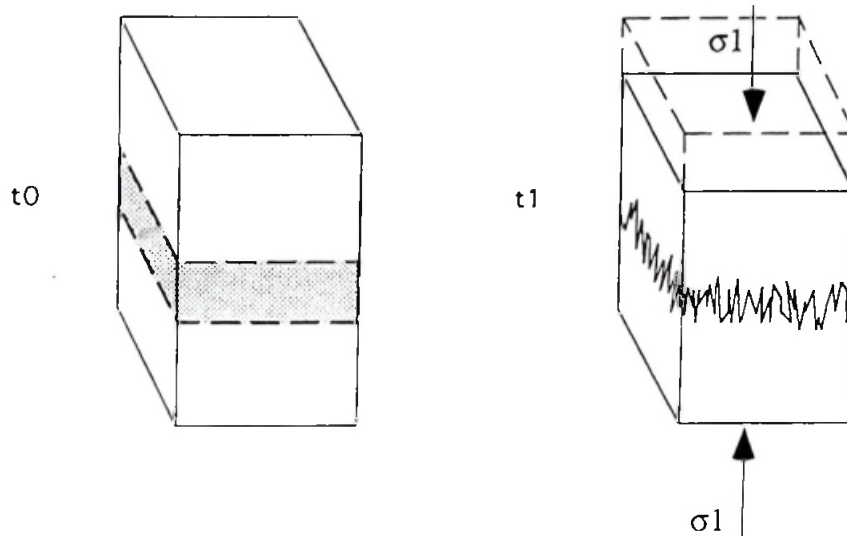


fig. 31: Formation d'un joint stylolithique, sous l'effet d'une contrainte σ_1 .

Le joint stylolithique forme donc un plan de dissolution perpendiculaire à la contrainte principale " σ_1 " et rassemble finalement tous les éléments insolubles présents dans la portion de roche dissoute. C'est ainsi que dans notre cas les joints stylolithiques regroupent les argiles identifiées dans l'analyse de roche totale (kaolinite, illite et vermiculite - cf § III,B,2,b), les oxydes de fer et une fraction siliceuse (principalement des fragments de quartz).

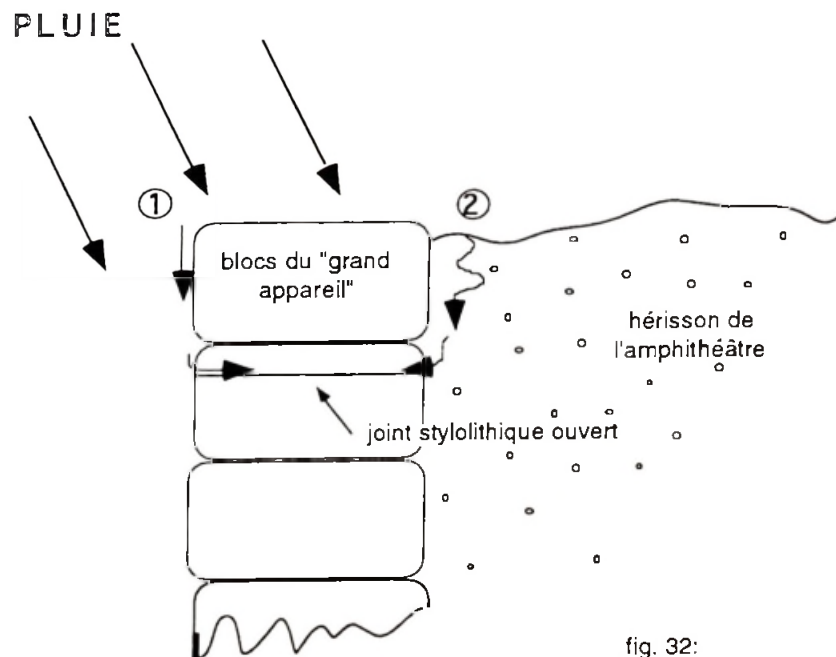


fig. 32:

Infiltrations directes (1) et indirectes (2) de l'eau de pluie.



Fig. 33: Suintement d'eau à travers des blocs altérés

Les joints stylolithiques de par leur forte teneur en argiles et autres insolubles*¹ constituent une zone de circulation privilégiée de l'eau, et de la même façon une zone de fragilité de la roche. En effet, lorsqu'on observe l'extrémité d'un plan de délitage d'un bloc (cf. § II, D), il correspond systématiquement à un joint stylolithique (fig. 34), tout comme les linéations visibles sous forme de petites rainures à la surface des blocs. Les joints vont permettre une circulation horizontale de l'eau dans la roche à partir d'une circulation initialement verticale le long du bloc (fig. 32). L'eau va ainsi pouvoir imprégner les blocs en profondeur, en suivant les joints stylolithiques, et provoquer une attaque préférentielle de la roche. Cette circulation interne d'eau est attestée par des suintements à la surface des blocs, encore bien visibles plusieurs jours après des précipitations (photo, fig. 33). De l'eau de pluie percole à travers le hérisson de l'amphithéâtre et va pouvoir s'infiltrer au travers des blocs en "grand appareil" en empruntant des joints stylolithiques. Ceci montre également qu'il peut exister plusieurs sens de circulation d'eau au niveau des blocs (fig. 32).

NOTA : *¹ -> Des mesures de calcimétrie effectuées dans un même bloc de calcaire, en prenant un échantillon avec, et un autre sans stylolithe, révèlent déjà une différence de teneur en insolubles de l'ordre de 5%. Et ceci, malgré la faible fraction volumique occupée par le stylolithe de l'échantillon analysé. On obtient les résultats suivants pour un banc quasi sommital de la carrière de Trampot (88):

- _ Echantillon de roche sans stylolithe : 90,4% Ca CO_3 , soit 9,6% d'insolubles
- _ Echantillon de roche contenant le stylolithe : 85,5% Ca CO_3 , soit 14,5% d'insolubles

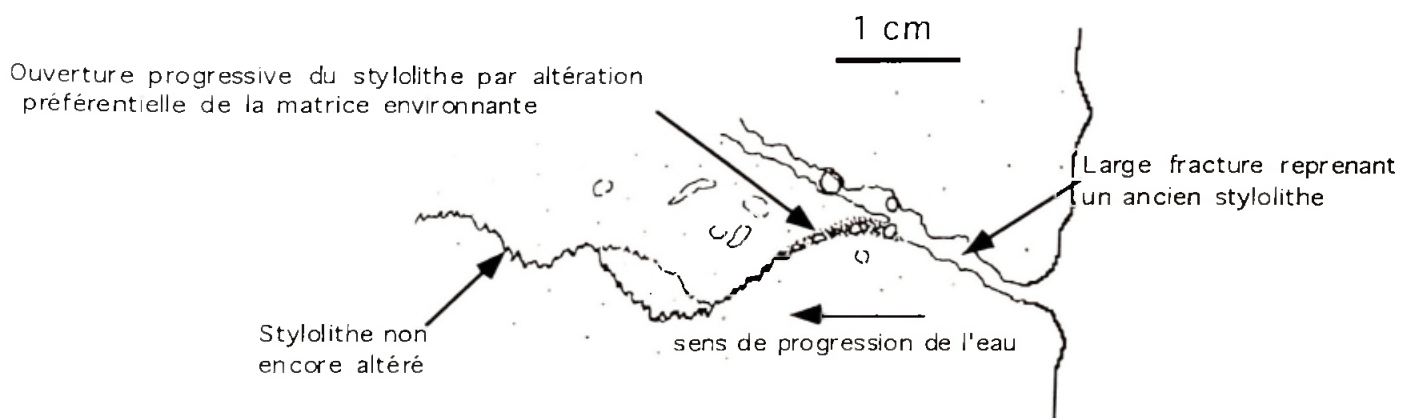


Fig. 34: Ouverture d'un joint stylolithique par dissolution de la phase interstitielle environnante.

L'ouverture progressive du joint stylolithique se fait par l'altération préférentielle de la matrice environnante, sous l'action de l'eau chargée en dioxyde de carbone (fig. 34). En raison de sa texture très fine, la matrice est beaucoup plus facile à dissoudre que les éléments figurés de la roche*². Les grains de la roche seront altérés à leur tour bien après le début du phénomène, lorsque l'altération donnera carrément lieu à la formation d'une fracture ouverte. Les joints stylolithiques semblent donc bien constituer une des causes de l'altération des blocs en "grand appareil" de l'amphithéâtre, par le biais des infiltrations d'eau qu'ils canalisent.

NOTA : *2 -> Pour la même raison, on observe un processus identique au cours de la formation des stylolithes. La stylolithisation est plus facile dans les faciès à grain fin (PURSER, 1975).

Une autre action imputable aux circulations d'eau peut intervenir. La roche possède 2 à 4% d'insolubles en "roche totale", mais les stylolithes concentrent au contraire une forte proportion d'insolubles, dont les argiles font partie. Une partie d'entre elles sont susceptibles de posséder des propriétés gonflantes significatives au passage de l'eau, qui ne peuvent qu'amplifier le phénomène d'altération en ouvrant encore plus les joints stylolithiques.

L'observation des joints stylolithiques en lame mince confirme à plusieurs reprises l'hypothèse précédente. On observe une microfracture ouverte qui suit de près le cheminement d'un stylolithe (lames effectuées dans les blocs "altérés" M33 et Mw base). L'origine de cette microfracture peut être causée par l'action de la charge mécanique (cf. § D) dans une zone stylolithique fragilisée.

Les stylolithes sont disposés suivant l'allongement des blocs, car ils sont parallèles au banc de calcaire dans lesquels ces derniers ont été extraits. Ils engendrent donc une altération horizontale de la roche, comme le mettent en évidence des mesures d'auscultation dynamique réalisées sur le "grand appareil". En effet, les vitesses de propagation du son mesurées sont plus élevées dans le sens parallèle au litage des blocs, que dans le sens perpendiculaire. Ceci démontre une chute de compacité au niveau des stylolithes (CEBTP, 1990).

2) Différents comportements mécaniques des joints stylolithiques

Si l'altération des blocs est en partie causée par l'ouverture des stylolithes au contact de l'eau, on peut toutefois se demander pourquoi tous les blocs stylolithisés soumis à des conditions d'altération équivalentes ne réagissent pas de la même façon. On a vu dans un paragraphe précédent (§ II,C) que l'altération des blocs liée à l'eau de pluie avait essentiellement une polarité verticale. L'eau n'est manifestement pas le seul facteur mis en cause, comme on le suggérait alors.

On constate en effet en divers endroits que des blocs comportant de nombreux stylolithes sont d'un aspect sain, alors qu'ils se trouvent dans une zone haute soumise aux ruissellements de la pluie, où l'altération est forte (si l'on se réfère à l'état des blocs voisins). Par ailleurs, un bloc "sain" de 70 centimètres d'épaisseur (E11) comporte de nombreux joints stylolithiques fermés, alors que certains d'entre eux sont placés en partie haute du bloc, directement au contact d'une fracture dans laquelle de l'eau doit logiquement s'écouler. Ces stylolithes paraissent malgré tout fermés et n'occasionnent pas le début d'un délitage (figure 35).

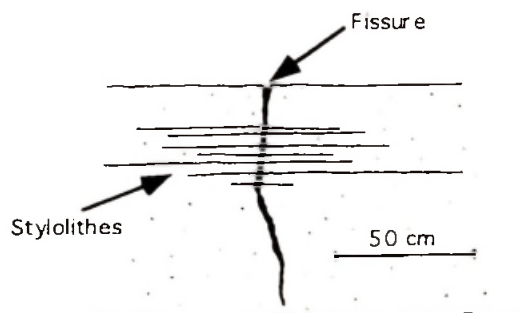


Fig. 35: Joints stylolithiques fermés au contact de l'eau.

Enfin, des essais mécaniques en compression et en traction (cf § III,D,2,a) réalisés sur des éprouvettes de bloc sain comprenant un joint stylolithique n'ont pas cédé au niveau de ce dernier. Le joint stylolithique avait donc une résistance suffisamment grande. Ceci est d'autant plus surprenant que son plan n'était, dans certains cas, pas perpendiculaire à la contrainte. Il s'exerçait alors également une composante cisailante sur ce joint stylolithique.

Il apparaît donc que tous les joints stylolithiques ne laissent pas s'infiltrer l'eau de la même façon. Par conséquent, ils ne présentent pas la même fragilité et la même résistance à l'érosion. En définitive, on peut distinguer deux sortes de stylolithes dans les blocs de l'amphithéâtre:

- ceux qui laissent s'infiltrer l'eau et provoquer ainsi le délitage de la roche;
- ceux qui restent fermés malgré la présence de l'eau, en entraînant un bien meilleur état de conservation général du bloc.

3) Les différents joints stylolithiques observables dans le secteur de Grand

Dans les affleurements à proximité de Grand (carrières de Trampot (88) et Leurville (52)), on distingue deux types de joints stylolithiques, dont un seul se retrouve dans les blocs de l'amphithéâtre.

On repère tout d'abord des joints stylolithiques de taille importante (une dizaine de centimètres d'épaisseur) ressemblant à ceux issus de la compaction de la pile sédimentaire, d'origine diagenétique. Leur orientation parallèle à la stratigraphie de la carrière, et l'allure de leurs "stylolithes cylindriques" (BLES, 1981) sont des éléments favorables à cette hypothèse. Cependant, l'épaisseur de la pile sédimentaire lors de l'enfouissement n'a pas été suffisamment importante, et le deuxième type de joints stylolithiques (d'origine tectonique) possède aussi la même orientation. Ils ne pourraient différer de ces derniers qu'au niveau de l'intensité de formation. En l'absence d'une étude plus approfondie, leur origine tectonique ou diagenétique n'est pas évidente (ARTHAUD, MATTAUER, 1972). Ils marquent souvent des limites de bancs, décimétriques à métriques.

Il existe d'autre part une grande quantité de microjoints stylolithiques globalement parallèles à la stratification, et comparables à ceux observés dans les blocs de l'amphithéâtre. Leurs stylolithes sont "coniques" (BLES, 1981), et sont parfois associés à de petites fentes perpendiculaires remplies de calcite. Leur origine tectonique est à mettre en relation avec la grande phase oligocène de distension lithosphérique qui a affecté la région (HAGUENAUER, HILLY, 1987). Les fossés d'effondrements de la Marne, de Gondrecourt (55), de Colombey-les-Belles (54) en sont l'illustration (STEINER, 1980 ; COULON, 1992), tout comme les deux grandes directions structurales conjuguées observables à Grand, N 40° et N 160° (HAGUENAUER, DELETIE, 1991).

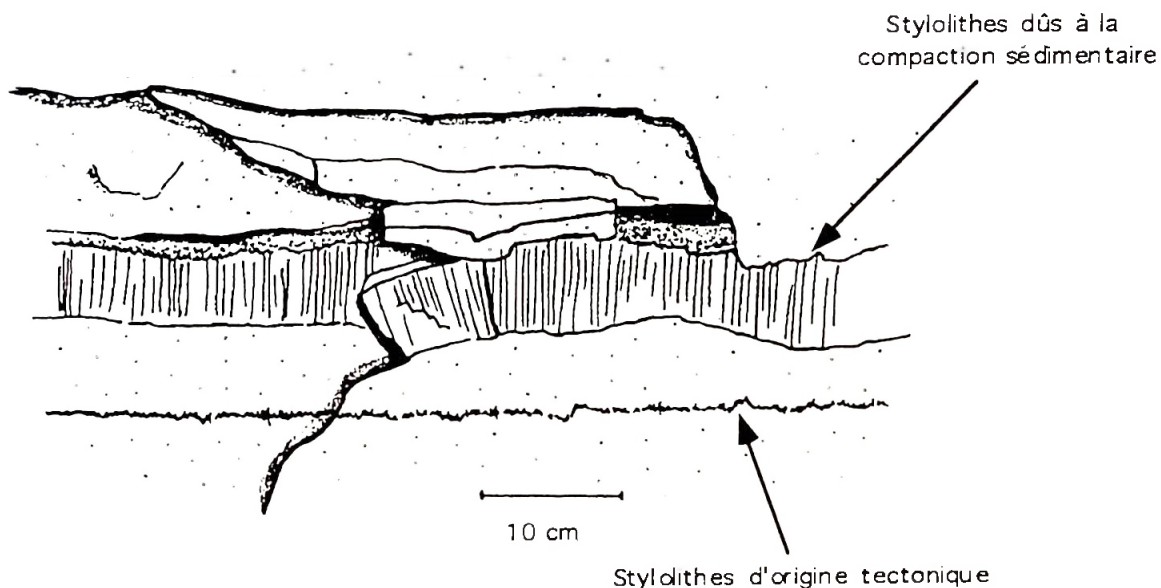


Fig. 36: Les deux types de joints stylolithiques visibles dans la carrière de Trampot (88).

4) Conclusion

Les blocs se délitent au niveau des joints stylolithiques de la roche qui les compose. Les stylolithes s'ouvrent petit à petit et permettent l'altération de la roche environnante. Le stade final étant la désagrégation du bloc en "rognons" de calcaire .

Les joints stylolithiques constituent par conséquent une zone d'hétérogénéité fragile dans le bloc, au niveau de laquelle les mécanismes de l'altération peuvent agir. Les joints sont une zone privilégiée de circulation d'eau et permettent la formation d'une fracturation par le biais des plans de moindre résistance mécanique qu'ils engendrent. L'eau chargée en dioxyde de carbone, agit par dissolution du pourtour du stylolithe, et par le gonflement de certaines argiles contenues au niveau de celui-ci.

Paradoxalement, certains blocs contiennent des joints apparemment plus résistants qui laissent très peu ou pas infiltrer l'eau. Ces blocs ont par conséquent une meilleure tenue à l'altération et paraissent encore actuellement en assez bon état.

D) La charge mécanique exercée sur les blocs

Les mesures de comportement mécanique des géomatériaux ont été effectuées par Abdollah SADEGHI qui poursuit la recherche. Les résultats actuels sont obtenus avec sa collaboration.

1) Effets apparents de la charge mécanique

L'autre processus mis en cause dans l'altération des blocs est la desquamation, c'est-à-dire que des écailles de roche se désolidarisent des blocs. Dans ce cas, au lieu d'être horizontale, l'altération se produit suivant des plans verticaux, mais peut emprunter à certains endroits des structures horizontales planaires, comme les joints stylolithiques.

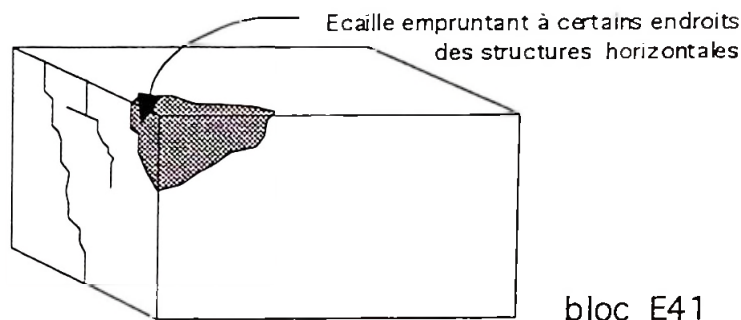


Fig. 37: Desquamation des blocs due à la charge mécanique.

On observe également sur certains blocs des fractures verticales à sub-verticales qui ne correspondent à aucune structure géologique des blocs. Elles pourraient être des fentes de tension occasionnées par la charge mécanique, d'autant plus qu'elles se poursuivent parfois sur plusieurs blocs voisins.

2) Essais mécaniques

Des éprouvettes ont été réalisées à l'aide d'un carotier, dans un bloc de calcaire correspondant au faciès du "grand appareil". Les dimensions des éprouvettes, orientées perpendiculairement à la stratification, sont les suivantes : $D=30\text{ mm}$; $l=65\text{ mm}$. Les essais avaient alors pour but, de mesurer la résistance mécanique des échantillons, et leur porosité.

a) Résistance à la compression et à la traction

Méthodologie.

Pour mesurer la résistance à la compression, l'éprouvette est soumise à une contrainte orientée suivant son axe. La valeur de la pression "P" pour laquelle l'éprouvette cède est mesurée. On obtient alors la résistance à la compression de l'essai en appliquant la formule : $R_c = P/A$ ou R_c : résistivité à la compression - P : pression de rupture de l'éprouvette.

A : aire de la section de l'éprouvette

Fig. 38:



La résistance à la traction se mesure en exerçant sur l'éprouvette une contrainte perpendiculaire à son axe. Comme pour le type de mesure précédente, la valeur de la pression "P" pour laquelle l'éprouvette cède est mesurée. La résistance à la traction est alors calculée suivant la formule : $R_t = 2P / (\pi \cdot A \cdot l)$. ou R_t : résistance à la traction - P : pression de rupture de l'éprouvette

A : aire de la section de l'éprouvette - l : longueur de l'éprouvette

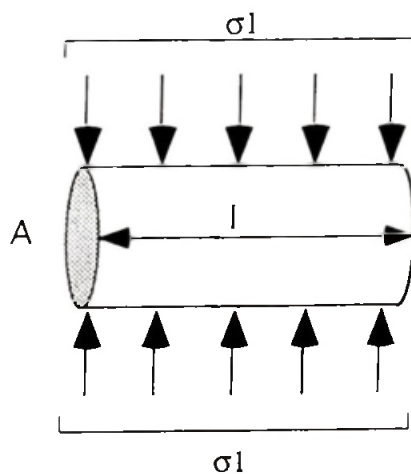


Fig. 39:

Résultats obtenus sur un bloc sain :

Résistance à la traction : 13,51 MPa.

Résistance à la compression : 68,62 MPa.

b) Voies de recherche

Le type de roche utilisé dans le "grand appareil" de l'amphithéâtre présente une grande résistance à la compression : 68,62 MPa.

Si on admet qu'un bloc situé dans les assises du "grand appareil" est surmonté par 10 mètres de bloc ($\rho = 2,58$), il supporte donc une pression d'environ 26 tonnes / m², soit environ 260 000 N/m² (en arrondissant g à 10m/s²) ou 0,26 MPa (1 Pa = 1N/m²). La charge mécanique que supporte ce bloc est donc largement insuffisante pour le fragmenter dans le cadre d'une compression pure.

Les rangées de bloc, et les blocs eux-mêmes, ne sont pas parfaitement horizontaux. Il y a au contraire une très légère pente de 1 à 3%. D'une compression pure, les contraintes engendrées par la charge mécanique induisent alors une composante cisailante qui pourrait être responsable de la fracturation de certains blocs, sous forme de fentes ou d'écailles voire même entraîner la fracturation parallèle à certains joints stylolithiques. Cette composante cisailante est nécessairement très faible: pour une pente de 2,5% et une contrainte principale de 0,26 MPa, elle serait de $6,5 \cdot 10^{-3}$ MPa. Il faut remarquer que la surface du bloc n'étant pas rigoureusement plane, cette contrainte cisailante s'applique plus particulièrement en quelques points précis, au contact de deux blocs. Cette irrégularité dans l'application de la force peut certes entraîner des déséquilibres et aboutir plus facilement à la fracturation du bloc, mais cela ne paraît toujours pas suffisant. Il ne faut pas oublier que les contreforts du "grand appareil" sont une structure porteuse sur laquelle reposaient des arcades, avec les forces supplémentaires que cela suppose.

Il faut enfin envisager l'action du temps dans la modification de la réponse mécanique. En effet, le diagramme ci-dessous montre qu'au cours du temps, et en maintenant une contrainte constante, la déformation d'une roche peut aboutir à la rupture de cette dernière.

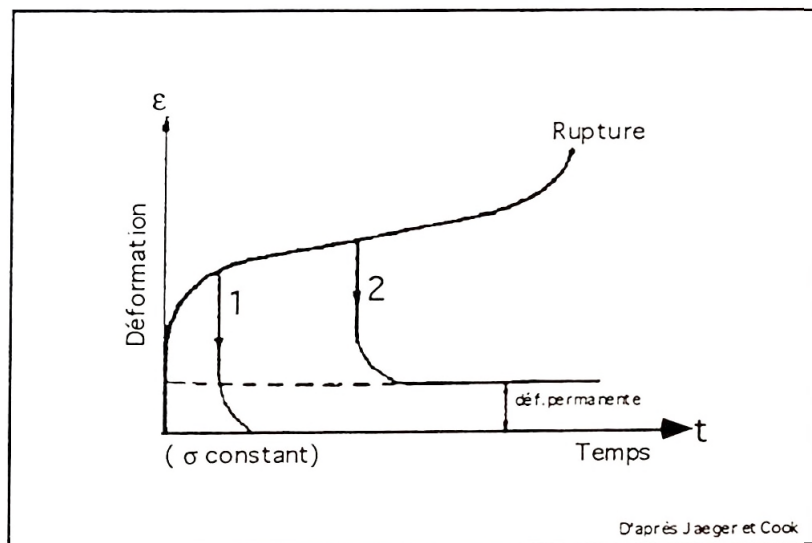


Fig. 40: Comportement mécanique d'une roche au cours du temps :
1 - comportement élastique; 2 - comportement plastique, fluage au cours du temps.

3) Conclusion

Même si toutes les données nécessaires ne sont pas réunies pour le démontrer clairement, il semble que la charge mécanique de l'amphithéâtre joue un rôle dans la dégradation des blocs, en entraînant une desquamation et aussi un certain nombre de fractures au niveau de ceux-ci. Les écailles seraient en réalité des fractures superficielles des blocs, ce qui n'empêche pas de retrouver ce même type de fractures dans les blocs. Cette fragmentation engendre une grande vulnérabilité des blocs qu'elle affecte, en permettant également à l'eau de circuler plus facilement. La desquamation peut se produire au niveau des blocs pauvres en dolomite, mais elle semble préférentiellement affecter ceux qui en contiennent beaucoup.

On peut également mentionner un autre processus plus marginal, en marge de l'altération mécanique des blocs. Il s'agit de la colonisation végétale qui peut affecter certains blocs

altérés. Les racines de ceux-ci peuvent en effet contribuer à une fragmentation progressive et profonde des blocs.

E) Essai de reconstitution de l'histoire de la roche des blocs en grand appareil, et altération

1) Les grandes étapes de l'histoire de la roche

Dépôt des grains, de la matrice, et micritisation

Les oïdes micritiques composées d'un cortex de carbonate micritique vaguement laminé ou sans structure peuvent pour certaines être issues d'une micritisation. On observe alors une limite très imprécise entre le cortex et le nucléus qui paraît alors plus ou moins micritisé. Au contraire, dans d'autres cas le cortex micritique semble s'être nettement déposé autour d'un noyau sparitique (en général un bioclaste). Le milieu de dépôt correspondant le mieux à ce type de faciès serait alors un milieu peu profond et chaud de type néritique.

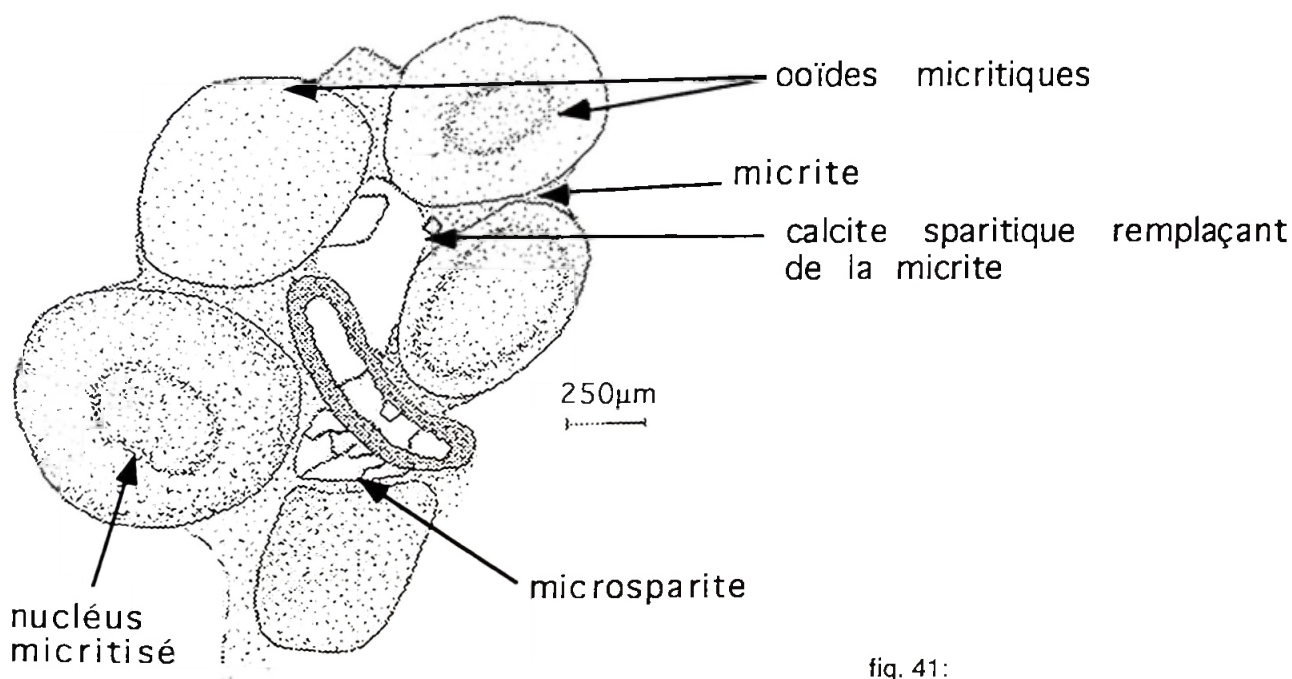


fig. 41:

Dans certaines lames, il est possible d'observer autour des grains un petit liseré calcitique à texture palissadique que l'on peut interpréter comme une cimentation précoce.

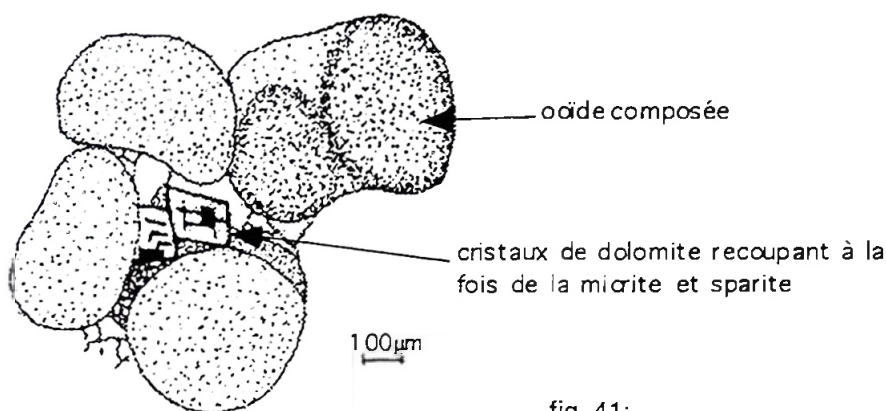
Beaucoup plus fréquemment, de nombreux grains s'interpénètrent sans laisser apparaître de joint stylolithique. On peut envisager ce phénomène comme étant une légère compaction précoce.

Recristallisation de microsparite et sparite

La phase interstitielle n'est pas uniquement occupée par de la micrite, mais aussi par un ciment microsparitique à sparitique. Celui-ci remplace le sédiment, puisque la micrite semble à de nombreuses reprises bloquée entre les grains, le restant du pore étant occupé par le ciment. Lorsque la recristallisation est plus poussée, il ne reste plus de micrite dans le pore.

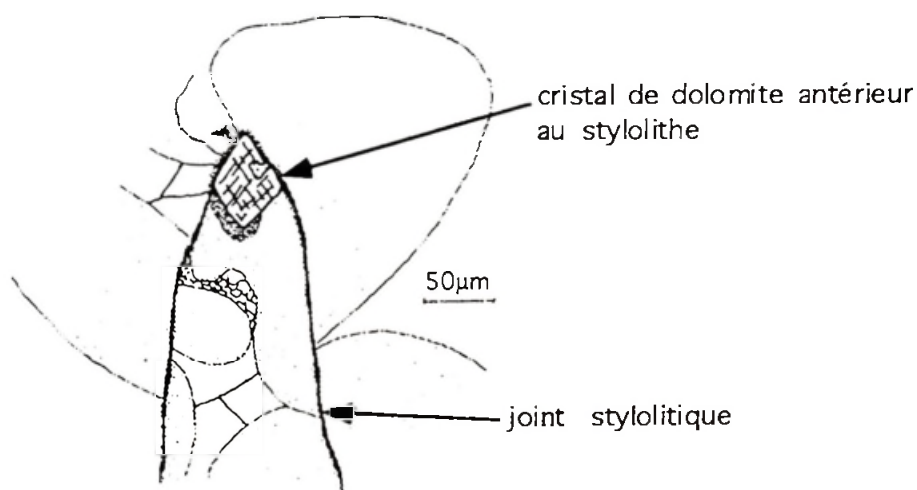
Dolomitisation de faible degré

La dolomitisation a concerné presque uniquement la phase interstitielle, qu'elle soit micritique ou sparitique. Il est même assez rare que les cristaux de dolomite recoupent légèrement les grains. Cette dolomitisation préférentielle caractérise un faible degré de réaction. En effet, la dolomitisation affecte prioritairement un sédiment fin car son instabilité peut être due à celle inhérente aux petites particules ou à sa minéralogie aragonitique (PURSER, 1975). La dolomitisation intervient avant les phases de stylolithisation comme l'indiquent les cristaux de dolomite repris ou contourné par un joint stylolithique.



Les différentes phases de stylolithisation.

Il a été possible d'observer en quelques points des cristaux de dolomite contournés par un stylolithe. Ceci permet de démontrer l'antériorité de la stylolithisation par rapport à la dolomitisation.



Ensuite suivant le type de roche, résistante ou non à l'altération, l'évolution géologique est envisagée de différentes façons .

- les blocs "sains".

Déstabilisation de la pyrite

Tout à la fin de son histoire géologique, la roche se rapproche de la surface et repasse dans des conditions oxydantes qui ont pour effet de déstabiliser la pyrite formée au cours de

la diagénèse. Des pseudomorphoses de pyrite en divers oxydes de fer sont visibles en lame mince, et ont eu pour conséquence de libérer des sulfates dans la roche, suivant la réaction :

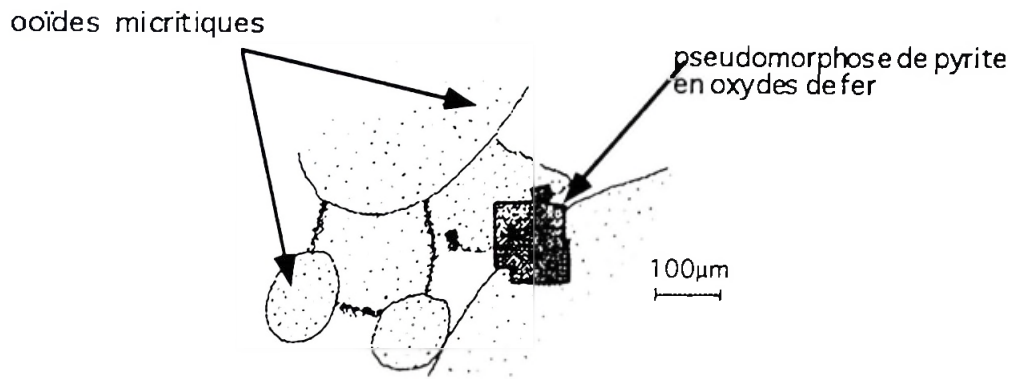
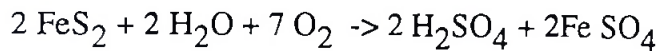


fig. 44:

Dédolomitisation

En présence de sulfates, la dolomite n'est plus stable et réagit suivant la réaction:
 $\text{Ca,Mg (CO}_3)_2 + \text{CaSO}_4 \rightarrow \text{Mg SO}_4 + 2 \text{CaCO}_3$

La dédolomitisation est presque totale, à en juger les très nombreux pores rhomboédriques et l'extrême rareté des cristaux de dolomite visibles en lame mince. Cette réaction est accompagnée d'une libération de dédolomite, sans que l'on puisse réellement dire s'il s'agit de la phase actuellement recristallisée dans les pores rhomboédriques. Elle en a l'aspect micritique, mais bien qu'incorporant un peu de fer, elle ne possède aucune trace de magnésium. Il se peut cependant que la dolomite, faiblement magnésienne, donne une dédolomite sans magnésium (cf § III, A, 3, c). Autre hypothèse, la dédolomite de nature métastable aurait également pu s'altérer et être remplacée par une recristallisation tardive de calcite (EVAMY, 1967).

Recristallisation(s) tardive(s) de calcite

Quelques observations semblent étayer cette hypothèse. La micrite que l'on vient d'évoquer, qui recristallise fréquemment dans les pores secondaires, peut elle-même être remplacée par une plage sparitique. Les contours de l'ex fantôme de dolomite sont alors marqués par une petite bordure très fine, micritique.

- les blocs altérés-

Ces blocs ont également subi une dédolomitisation consécutive à l'oxydation de la pyrite, mais elle est alors nettement moins poussée que dans le cas des blocs sains. Il reste une très grande proportion de dolomite initiale, et les pores rhomboédriques sont par conséquent moins nombreux. La dédolomitisation étant partielle, on observe des pores contenant encore une partie de leur dolomite initiale, et aucun d'entre eux n'est recombé par une micrite ou une sparite plus tardive.

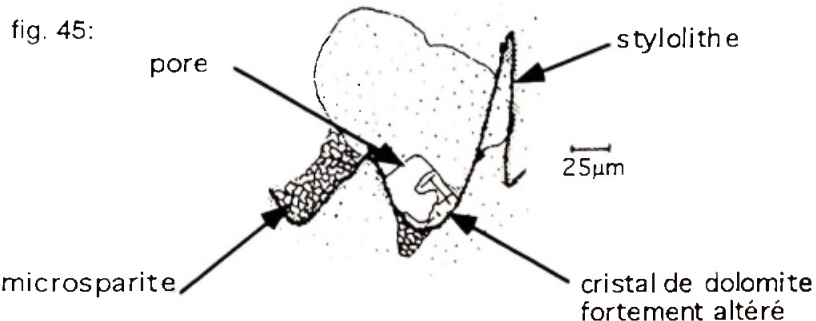


fig. 45:

2) Interprétation : les mécanismes de la détérioration de certains blocs

Dans le cas des blocs sains, la dédolomitisation libère de la calcite. Eventuellement, une autre calcite tardive recristalliserait ultérieurement. Toute cette calcite finirait par recristalliser par endroits dans les joints stylolithiques. Ceci contribue à limiter leur rôle dans l'imprégnation hydrique de la roche qui induit par conséquent une zone fragile de dissolution. On peut alors émettre l'hypothèse selon laquelle **ces deux phases de cristallisation calcitique contribueraient à souder et colmater les joints stylolithiques** de la roche constituante des blocs sains.

Au contraire, les blocs n'ayant guère subi de dédolomitisation n'ont par conséquent pratiquement pas bénéficié d'apports calcitiques au cours de ce processus, ni après. Les joints stylolithiques et la roche n'ayant pas été consolidés, l'eau chargée en dioxyde de carbone contribue à détériorer mécaniquement et chimiquement la roche et à engendrer des blocs altérés, via les joints stylolithiques.

F) Conclusion

Les causes de l'altération des blocs du "grand appareil" de l'amphithéâtre de Grand sont multiples et interdépendantes. L'agent responsable est l'eau chargée en dioxyde de carbone. Cette intervention de l'eau se fait par le jeu de facteurs texturaux et structuraux.

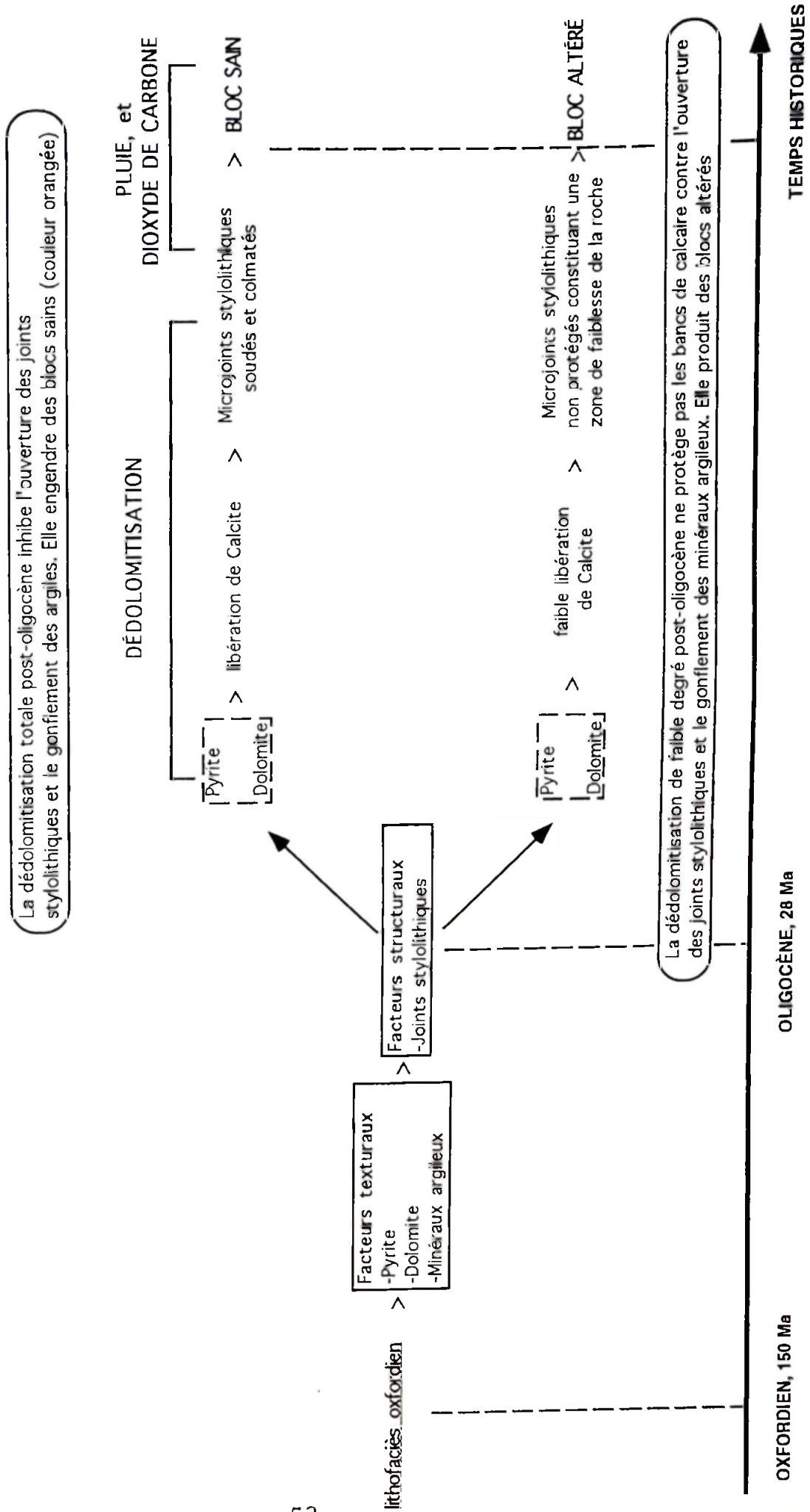
Les facteurs texturaux sont d'ordre minéralogique et regroupent la présence dans la roche de dolomite, de pyrite, et d'une fraction argileuse. Ces facteurs, comme la dolomite et indirectement la pyrite, vont surtout intervenir et avoir un rôle important dans l'altération grâce à un facteur structural qu'ils contrôlent : les joints stylolithiques. La pyrite permet de déstabiliser la dolomite qui pourra alors renforcer les joints stylolithiques en libérant de la calcite : le bloc est consolidé. A l'inverse, la fraction argileuse concentrée dans les joints stylolithiques a une action significative de rétention de l'eau et de gonflement. Elle contribue donc à ouvrir les joints et à faciliter la circulation de l'eau en l'absence de consolidation par la calcite. Ce processus aboutit à l'altération progressive des blocs par dissolution de la roche environnant le stylolithe.

Outre les joints stylolithiques, les facteurs texturaux influencent également la rhéologie de la roche, et donc sa résistance mécanique.

S'il existe une hiérarchisation de ces facteurs, l'action de la pluie en est la clef de voûte. Mais au niveau des facteurs internes de la roche, c'est au contraire la dolomite qui conditionne le comportement mécanique du bloc. C'est elle qui, en effet, permet ou non l'ouverture des stylolithes. Le rôle des argiles vient ensuite, uniquement dans le cas où le stylolithe n'aurait pas été renforcé par des cristallisations tardives de calcite.

Quant aux propriétés rhéologiques des blocs, elles nécessitent d'être étudiées plus en détail pour voir en quoi la dédolomitisation joue un rôle, de façon quantitative. Néanmoins, il paraît certain que la desquamation et la fracturation subverticale de certains blocs est liée à un problème de charge mécanique exercée par l'amphithéâtre.

Analyse structurale et schéma fonctionnel de la vulnérabilité différentielle des blocs de calcaire



IV) CONCLUSION GENERALE

La recherche aboutit aux résultats suivants :

A- Les matériaux mis en oeuvre par les aménageurs romains

- La recherche aboutit à la **caractérisation de l'identité pétrographique** des géomatériaux;
- La recherche aboutit à une **corrélation entre ces géomatériaux et la série lithostratigraphique locale**;
- La recherche aboutit à la **localisation géographique des sites probables d'extraction** compte tenu de la situation géologique du massif carbonaté oxfordien de la région de Grand affecté d'un pendage nord-ouest de 1,5 à 2°;
- La recherche aboutit à la mise en évidence de la **gestion optimale de la ressource locale** en fonction de la typologie des ouvrages.

La recherche aboutit en fait à la compréhension de la gestion de la ressource locale par les aménageurs, ce qui permet d'**envisager une restauration conforme de l'ouvrage**.

B- La vulnérabilité des géomatériaux aux contraintes du climat

- Le rapport effectué par le CEBTP en 1990 conclut à un **constat** de la vulnérabilité différentielle des géomatériaux mis en oeuvre dans l'ouvrage.
- La recherche permet de **comprendre les mécanismes** responsables de la vulnérabilité des géomatériaux aux contraintes du climat.
- La recherche démontre que cette **vulnérabilité des géomatériaux à l'eau** est d'ordre plurifactoriel et fait intervenir conjointement :
 - * la microstructure de la roche sous la forme de **micro-joints stylolithiques**;
 - * l'évolution de la **dolomite** contenue dans la roche;
 - * les **minéraux argileux** et particulièrement **les minéraux gonflants**;
 - * l'évolution des sulfures et notamment de la **pyrite**.
- La recherche, par la **compréhension de facteurs et de mécanismes**, permet de définir des **mesures de protection efficaces**. Ces mesures prennent en compte :
 - * la maîtrise du comportement de l'eau à l'échelle de l'ouvrage
 - * la lutte contre la colonisation de l'ouvrage par les végétaux

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARTHAUD F., MATTAUER M., 1972, "Sur l'origine de certains joints stylolithiques; leur relation avec une phase de distension (exemple du Languedoc)", *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 7^e série, tome XIV, pp.13-17.
- BLES J-L. et FEUGA B., 1981, "La fracturation des roches", B. R. G. M., *Manuels et Méthodes*, t 1, 121p.
- CEBTP, 1990, "Investigations Amphithéâtre de Grand (88)", Procès-verbal n° 1 du 20/11/1990, dossier n° 2122.6.274 DG/CV, 57 p.
- COLLECTIF, 1993, "Grand, l'amphithéâtre gallo-romain ", Conseil Général des Vosges, Direction des Archives départementales, 132p; 103 fig.
- COULON M., 1992, "La distension oligocène dans le nord-est du bassin de Paris, perturbations des directions d'extension et distributions des stylolithes", *Bull. Soc. Géol. Fr.*, n°5, tome 162, pp.531-540.
- DE GROOT K., 1967, "Experimental dedolomitization": *Jour. Sedimentology Petrology*, Vol. 37, N° 4, pp. 1216-1220.
- EVAMY B.D., 1967, "Dedolomitization and the development of rhomboedral pores in limestone": *Jour. Sedimentology Petrology*, Vol. 37, N° 4, pp. 1203-1215.
- FLAGEOLLET J.-C., LE ROUX J., VINCENT P.-L. et al., 1985, Carte géologique de Toul à 1/50000, B. R. G. M., (n° 229), 3^e édition.
- HAGUENAUER B., HILLY J., 1987, "Naissance et déclin du Bassin Parisien dans ses marches orientales", *Bull. Inform. Géol. Bassin de Paris*, Mém. h.-sér. n°6, "Aspect et évolution géologiques du Bassin Parisien", Cavelier C. et Lorenz J. coord., pp. 105-115, 6 fig.
- HAGUENAUER B., DELETIE P., 1991, "Mythe ou réalité de la ressource en eau du site", *"Les Dossiers de l'Archéologie"* n°162, pp. 67-72.
- HUMBERT L. 1971, "Recherche méthodologique pour la restitution d'un bassin - L'ensemble carbonaté oxfordien de la partie orientale du bassin de Paris": Thèse de l'Université de Nancy I, 364 p; 165 planches hors texte.
- HUMBERT L., 1975, Symposium de Nice.
- MAUBEUGE P.-L., 1974, Carte géologique de Neufchâteau à 1/50 000, B. R. G. M., feuille n° XXXII-17.
- Normalisation Française, 1990, "Granulats: Mesures des masses volumiques, de la porosité, du coefficient d'absorption et de la teneur en eau des gravillons et cailloux", *Afnor* 1990 P 18-554, 5 p.
- PHILIPPON J., JEANETTE D., LEFEVRE R.-A., "la conservation de la pierre monumentale en France", Presses du CNRS, 270 p., ISBN 2-87682-059-5.
- PURSER B.H., 1975, "Sédimentation et diagénèse précoce des séries carbonatées du Jurassique moyen de Bourgogne": Thèse d'Etat, Université de Paris Sud - Centre d'Orsay, 383 p.
- QUENEE B., 1990, "Transformations minéralogiques et texturales des matériaux rocheux, mortiers et bétons d'ouvrages variés - Approche de la cinétique des mécanismes et identification des facteurs responsables.": Thèse de l'Université de Nancy I, 190 p.
- STEINER P., 1980, "Lithostratigraphie et fragmentation du Dogger lorrain." : Thèse de 3^{ème} cycle, Nancy, 206p; 5 planches hors texte.

ANNEXES

COMPLEMENTS D'ETUDES STATISTIQUES.

Blocs du Grand appareil sud, (totalité).

Blocs du grand appareil nord, (totalité).

Blocs du grand appareil sud, pan orienté nord.

Blocs du grand appareil nord, pan orienté sud.

Blocs du grand appareil sud, pan orienté ouest.

Blocs du grand appareil nord, pan orienté ouest.

Blocs du grand appareil, répartition en fonction de l'état dans les différents contreforts.

Etat des blocs et altitude dans les contreforts et façades.

PROTOCOLE D'EXTRACTION DES INSOLUBLES PAR CENTRIFUGATION

RESULTATS DES DIFFRACTOGRAMMES DE "I base" ET "M 40"

REPRODUCTION DES DIFFERENTS ELEMENTS DE MAÇONNERIE ETUDIES SUR LE GRAND APPAREIL A DES FINS STATISTIQUES.

Nomenclature des blocs

Contreforts A, B, C

Contreforts D, E, F

Murs G, G ouest

Contreforts H, I, J

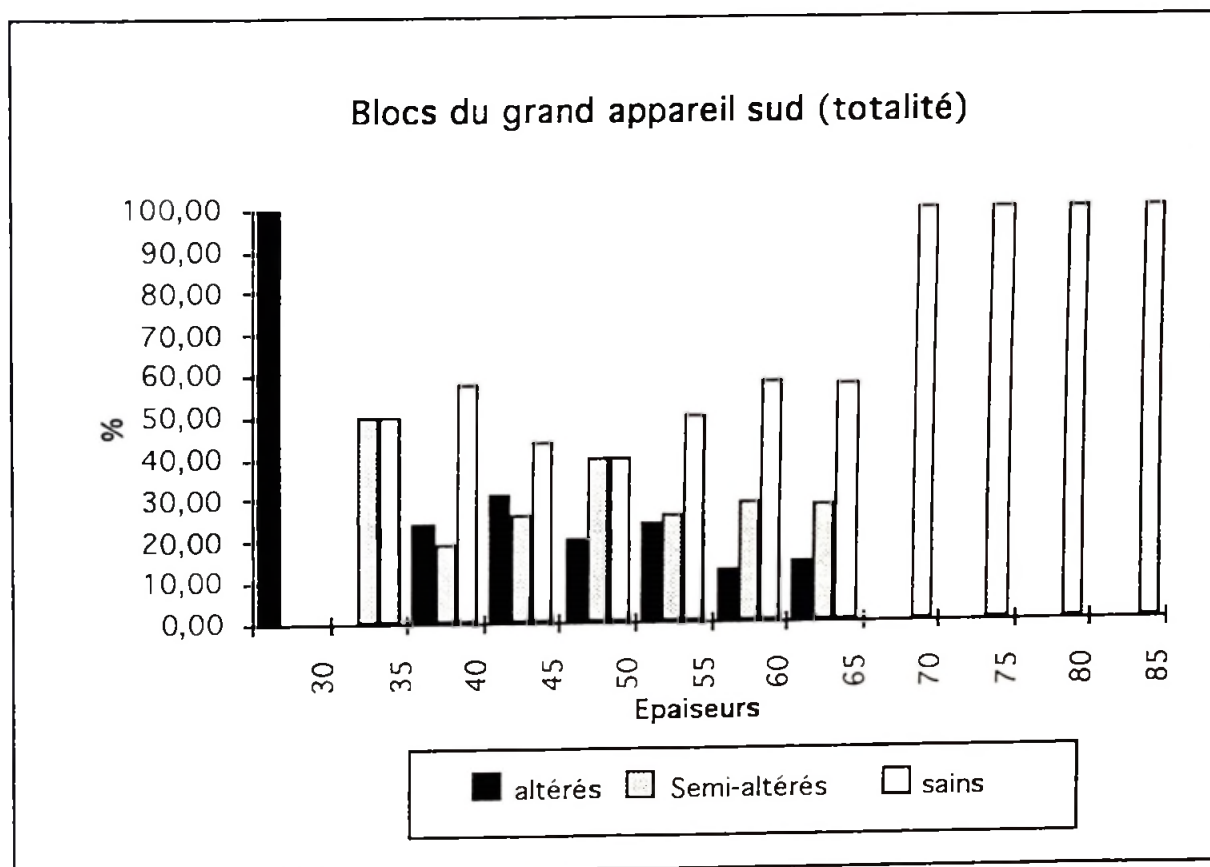
Contreforts K, L

Murs M, M ouest

COMPLEMENTS D'ETUDES STATISTIQUES.

Blocs du Grand appareil sud (totalité)

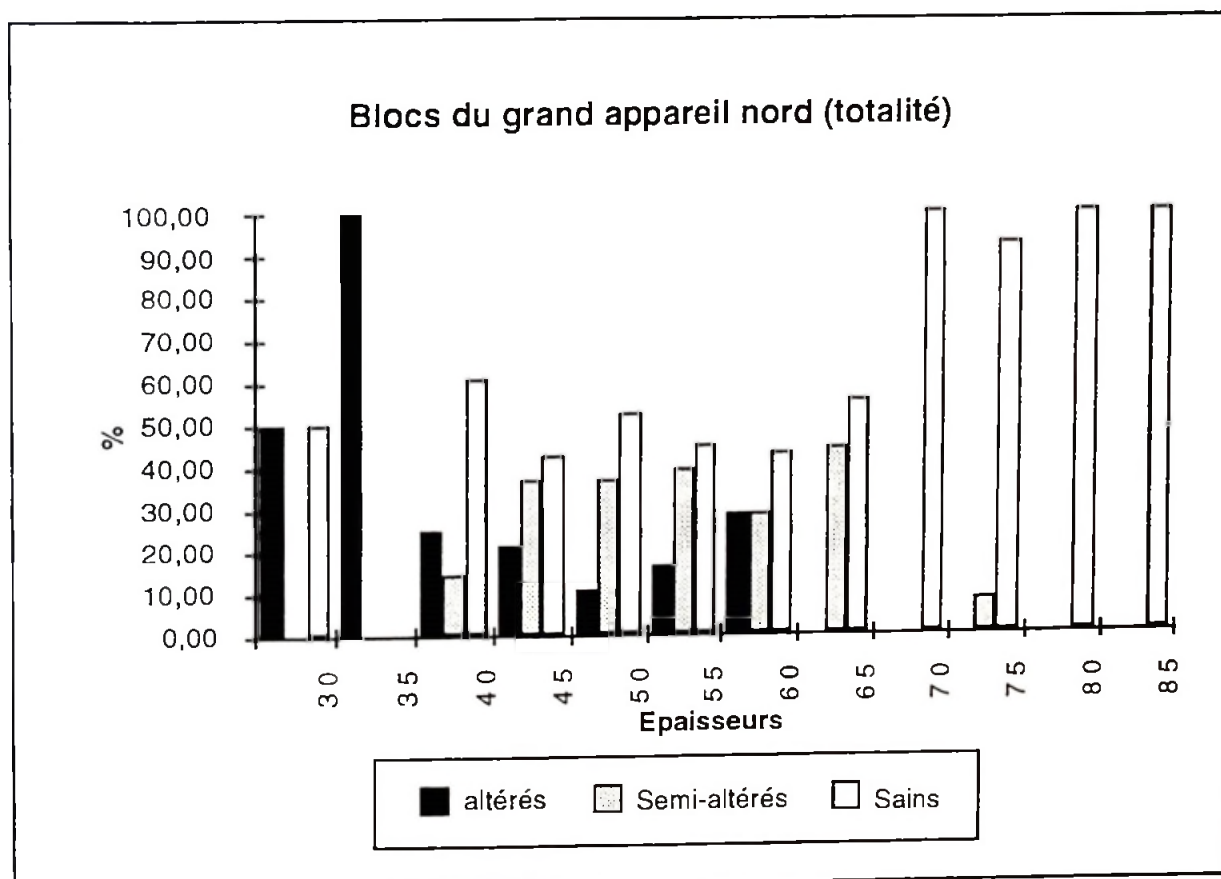
Épaisseurs , par classes	nombre de blocs altérés	%	nombre de blocs semi- altérés	%	nombre de blocs sains	%	Total par classe
30	1	100,00					1
35			1	50,00	1	50,00	2
40	5	23,81	4	19,05	12	57,14	21
45	12	30,77	10	25,64	17	43,59	39
50	4	20,00	8	40,00	8	40,00	20
55	14	24,14	15	25,86	29	50,00	58
60	3	12,50	7	29,17	14	58,33	24
65	3	14,29	6	28,57	12	57,14	21
70					3	100,00	3
75					7	100,00	7
80					3	100,00	3
85					5	100,00	5
TOTAUX ->	42	20,59	51	25,00	111	54,41	204



Répartition par classe d'épaisseur, de l'état des blocs dans toute la partie sud du "grand appareil".

Blocs du grand appareil nord. (totalité).

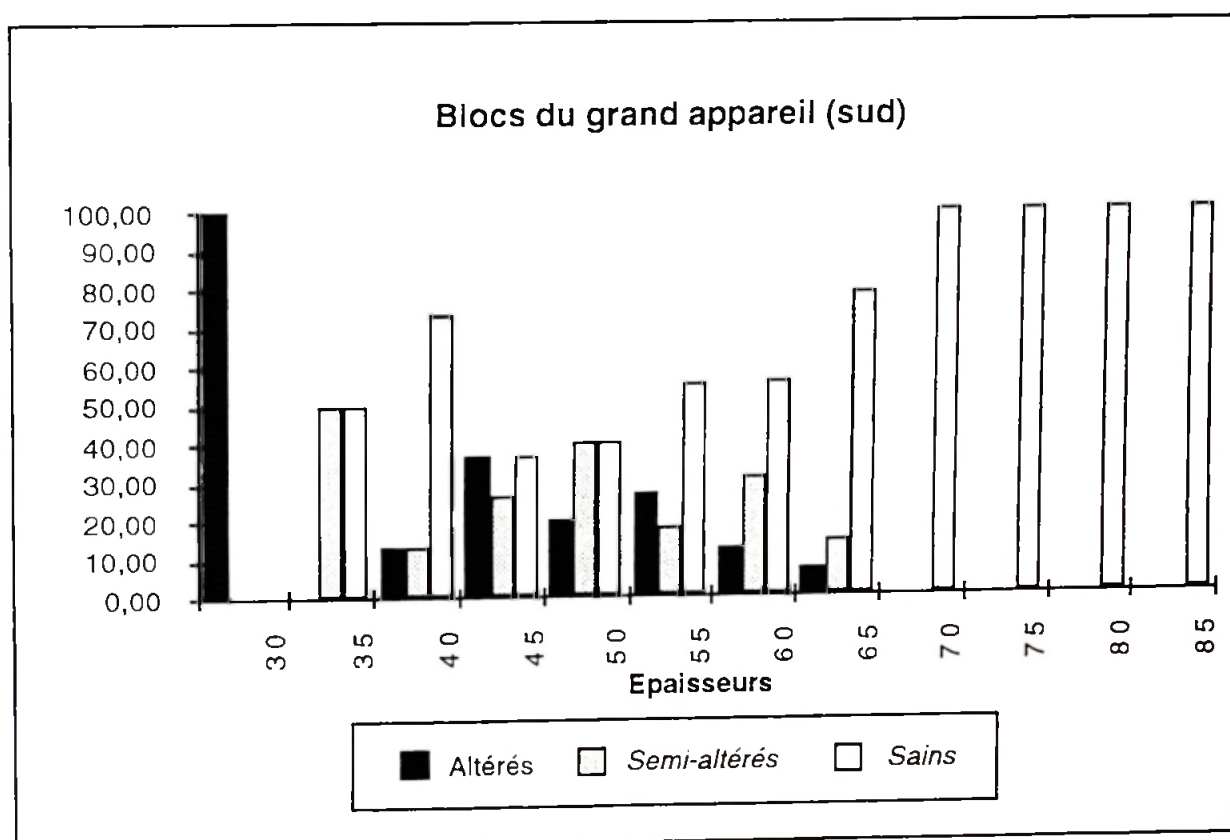
Épaisseurs , par classes	nombre de blocs altérés	%	nombre de blocs semi- altérés	%	nombre de blocs sains	%	Total par classe
30	2	50,00			2	50,00	4
35	1	100,00					1
40	7	25,00	4	14,29	17	60,71	28
45	4	21,05	7	36,84	8	42,11	19
50	4	10,53	14	36,84	20	52,63	38
55	6	15,79	15	39,47	17	44,74	38
60	12	28,57	12	28,57	18	42,86	42
65			8	44,44	10	55,56	18
70					3	100,00	3
75			1	7,69	12	92,31	13
80					2	100,00	2
85					7	100,00	7
TOTAUX ->	36	16,90	61	28,64	116	54,46	213



Répartition par classe d'épaisseur, de l'état des blocs dans toute la partie nord du "grand appareil".

Blocs du grand appareil sud, pan orienté nord.

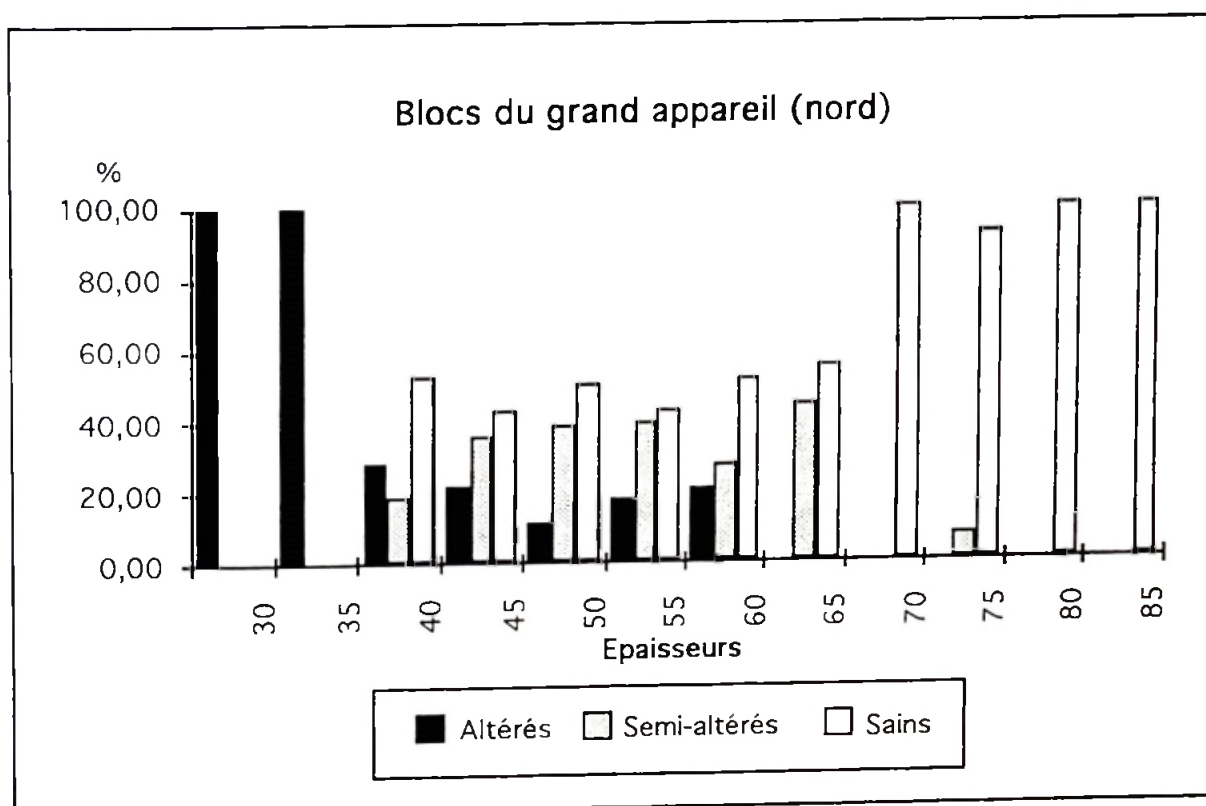
Epaisseurs , par classes	nombre de blocs altérés	%	nombre de blocs semi- altérés	%	nombre de blocs sains	%t	Total par classe
30	1	100,00		0,00		0,00	1
35		0,00	1	50,00	1	50,00	2
40	2	13,33	2	13,33	11	73,33	15
45	7	36,84	5	26,32	7	36,84	19
50	4	20,00	8	40,00	8	40,00	20
55	12	26,67	8	17,78	25	55,56	45
60	2	12,50	5	31,25	9	56,25	16
65	1	7,14	2	14,29	11	78,57	14
70		0,00		0,00	3	100,00	3
75		0,00		0,00	7	100,00	7
80		0,00		0,00	3	100,00	3
85		0,00		0,00	5	100,00	5
TOTAUX ->	29	19,33	31	20,67	90	60,00	150



Répartition par classe d'épaisseur, de l'état des blocs dans la partie sud du "grand appareil";
 contreforts et mur regardant vers le nord-ouest.

Blocs du grand appareil nord, pan orienté sud.

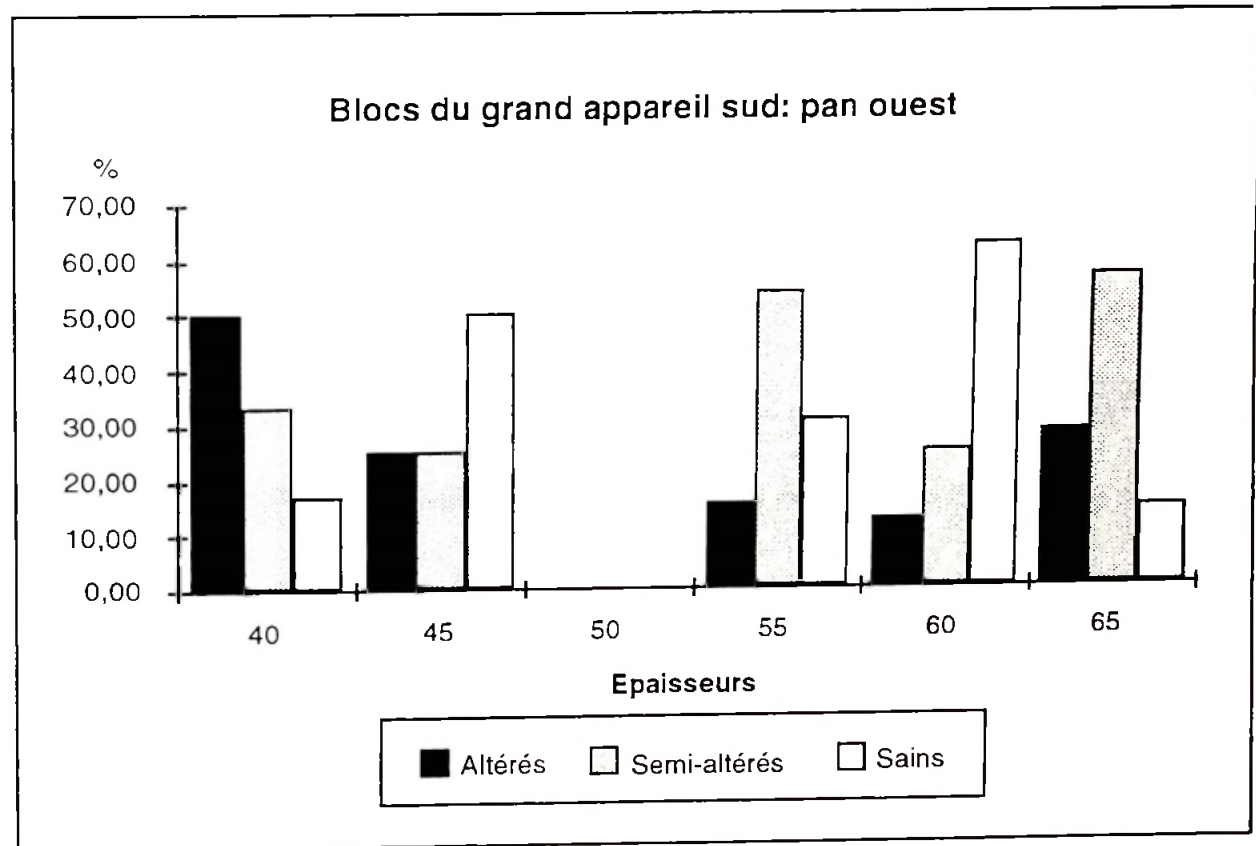
Epaisseurs , par classes	nombre de blocs altérés	%	nombre de blocs semi- altérés	%	nombre de blocs sains	%	Total par classe
30	1	100,00		0,00		0,00	1
35	1	100,00		0,00		0,00	1
40	6	28,57	4	19,05	11	52,38	21
45	3	21,43	5	35,71	6	42,86	14
50	3	11,54	10	38,46	13	50,00	26
55	5	17,86	11	39,29	12	42,86	28
60	7	21,21	9	27,27	17	51,52	33
65		0,00	8	44,44	10	55,56	18
70		0,00		0,00	3	100,00	3
75		0,00	1	7,69	12	92,31	13
80		0,00		0,00	2	100,00	2
85		0,00		0,00	7	100,00	7
TOTAUX ->	26	15,57	48	28,74	93	55,69	167



Répartition par classe d'épaisseur, de l'état des blocs dans la partie nord du "grand appareil"; contreforts et mur regardant vers le sud-est.

Blocs du grand appareil sud, pan orienté ouest.

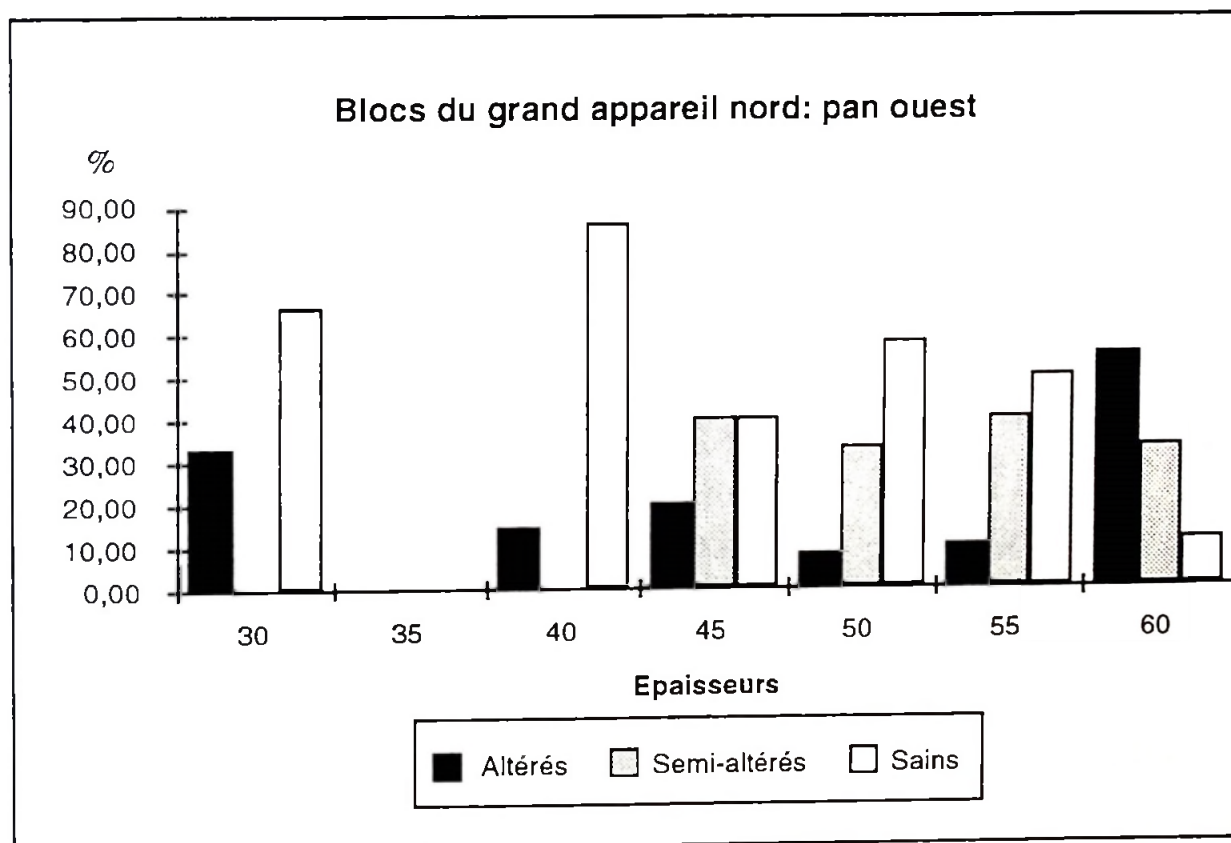
Epaisseurs , par classes	nombre de blocs altérés	%	nombre de blocs semi- altérés	%	nombre de blocs sains	%	Total par classe
30							
35							
40	3	50,00	2	33,33	1	16,67	6
45	5	25,00	5	25,00	10	50,00	20
50							
55	2	15,38	7	53,85	4	30,77	13
60	1	12,50	2	25,00	5	62,50	8
65	2	28,57	4	57,14	1	14,29	7
70							
75							
80							
85							
TOTAUX ->	13	24,07	20	37,04	21	38,89	54



Répartition par classe d'épaisseur, de l'état des blocs dans la partie sud du "grand appareil";
mur regardant vers le sud-ouest.

Blocs du grand appareil nord, pan orienté ouest.

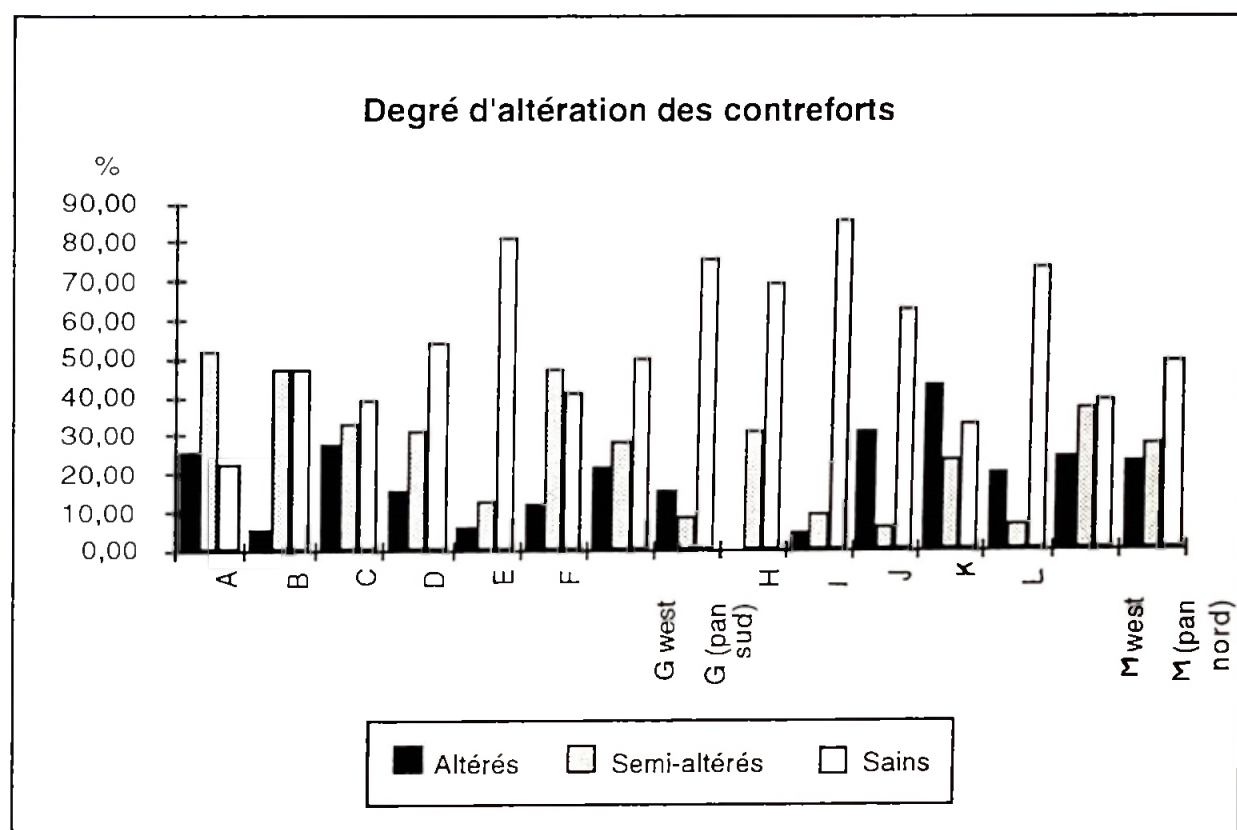
Epaisseurs , par classes	nombre de blocs altérés	%	nombre de blocs semi- altérés	%	nombre de blocs sains	%	Total par classe
30	1	33,33		0,00	2	66,67	3
35							
40	1	14,29		0,00	6	85,71	7
45	1	20,00	2	40,00	2	40,00	5
50	1	8,33	4	33,33	7	58,33	12
55	1	10,00	4	40,00	5	50,00	10
60	5	55,56	3	33,33	1	11,11	9
65							
70							
75							
80							
85							
TOTAUX ->	10	21,74	13	28,26	23	50,00	46



Répartition par classe d'épaisseur, de l'état des blocs dans la partie nord du "grand appareil"; mur regardant vers le sud-ouest.

**Blocs du grand appareil, répartition en fonction de l'état
dans les différents contreforts.**

Pilliers	Blocs altérés	Pourcentage	Blocs semi-altérés	Pourcentage	Blocs sains	Pourcentage
A	7	25,93	14	51,85	6	22,22
B	1	5,26	9	47,37	9	47,37
C	5	27,78	6	33,33	7	38,89
D	2	15,38	4	30,77	7	53,85
E	1	6,25	2	12,50	13	81,25
F	2	11,76	8	47,06	7	41,18
G ouest	10	21,74	13	28,26	23	50,00
G (pan sud)	9	15,52	5	8,62	44	75,86
H	0	0,00	4	30,77	9	69,23
I	1	4,76	2	9,52	18	85,71
J	5	31,25	1	6,25	10	62,50
K	9	42,86	5	23,81	7	33,33
L	3	20,00	1	6,67	11	73,33
M ouest	13	24,07	20	37,04	21	38,89
M (pan nord)	15	23,08	18	27,69	32	49,23



Etat des blocs et altitude dans les contreforts et façades

(données numériques de la figure n° 19).

Emplacement	Partie supérieure (30% sup.)			Partie intermédiaire			Partie inférieure (30% inf.)		
	Blocs altérés (%)	Blocs semi-altérés (%)	Blocs sains (%)	Blocs altérés (%)	Blocs semi-altérés (%)	Blocs sains (%)	Blocs altérés (%)	Blocs semi-altérés (%)	Blocs sains (%)
A	44,44	33,33	22,22	13,33	80,00	6,67	8,33	58,33	33,33
B		85,71	14,29	10,00	60,00	30,00			100,00
C	71,43	14,29	14,29		62,50	37,50		28,57	71,43
D	40,00	40,00	20,00		33,33	66,67			100,00
E	20,00	40,00	40,00		16,67	83,33			100,00
F	22,22	55,56	22,22	14,29	42,86	42,86		16,67	83,33
G	28,57	7,14	64,29	13,79	6,90	79,31	3,57	10,71	85,71
G ouest	33,33	33,33	33,33	23,08	38,46	38,46	14,29	14,29	71,43
Tronçon Nord	32,43	35,14	32,43	13,08	38,32	48,60	4,71	17,65	77,65
H		50,00	50,00		42,86	57,14			100,00
I	9,09		90,91		20,00	80,00		16,67	83,33
J	25,00		75,00	66,67		33,33	12,50	12,50	75,00
K	57,14		42,86	45,45	36,36	18,18	28,57	28,57	42,86
L	60,00	20,00	20,00		11,11	88,89			100,00
M	33,33	52,38	14,29	22,22	37,04	40,74	14,29	7,14	78,57
M ouest	47,37	36,84	15,79	15,00	50,00	35,00	4,76	33,33	61,90
Tronçon Sud	34,25	30,14	35,62	20,00	33,33	46,67	9,88	16,05	74,07
GRAND APPAREIL	33,33	32,65	34,01	16,24	36,04	47,72	7,23	16,87	75,90

PROTOCOLE D'EXTRACTION DES INSOLUBLES PAR CENTRIFUGATION

Manipulations

Pour que la pesée des insolubles s'effectue dans les mêmes conditions d'hydratation avant et après l'attaque acide, les deux échantillons ont d'abord été mis à l'étuve à 70°C pendant 18 heures 30. Les masses de produit analysé ont été choisies les plus grandes possibles afin de limiter au maximum les erreurs de mesure, soit :

- 19,32 g pour la roche saine (I base);
- 42,50 g pour la roche altérée (M 40).

L'attaque acide s'est faite avec de l'acide chlorhydrique concentré pour limiter le volume de solution à centrifuger, tout en tenant compte de la stoechiométrie de la réaction.

I base a été attaqué avec 100 ml HCl 4N;
M 40 a été attaqué avec 100 ml HCl 8N.

Les centrifugations successives ont été effectuées comme suit :

-1^{ère} centrifugation à 3000 tr/min pendant 15 minutes

-> pipetage du surnageant acide et rinçage du culot d'insolubles en complétant les tubes de la centrifugeuse à l'eau distillée.

-2^e centrifugation à 3000 tr/min pendant 15 minutes

-> pipetage du surnageant (eau distillée de rinçage) et deuxième rinçage à l'eau en complétant de nouveau les tubes.

-3^e centrifugation à 3000 tr/min pendant 15 minutes

-> pipetage du surnageant

L'élimination de 6 à 8 ml de surnageant résiduel et le séchage des argiles a été effectué en plaçant les éprouvettes de centrifugation à l'étuve à 70°C. Le temps de séchage pour que les argiles forment une croûte dure se détachant du fond du tube a varié de 1h 30 à 2h 30 suivant la quantité de dépôt.

Les masses d'insolubles pesés sont :

Roche altérée : 1,76 g soit 4,16%;

Roche saine : 0,49 g soit 2,53%.

RESULTATS DES DIFFRACTOGRAMMES DE "I base" ET "M 40"

Echantillon de roche saine "I base" : relevés des pics du diffractogramme.

Pic	Angle 2 θ (degrés)	d	Espèce minérale	Largeur du pic	Traitement
1	34,8	3,24	Illite		Nature
2	33,8	3,33			"
3	32,3	3,48	Kaolinite		"
4	31,6	3,56			"
5	30,7	3,66			"
6	26,5	4,23	Illite		"
7	22,4	4,99			"
8	15,6	7,14	Kaolinite		"
9	11,2	9,92	Illite		"
10	8,0	13,88	Vermiculite		"
11	11,2	9,92	Illite		Etuve 490°
12	15,6	7,14	Kaolinite		
13	11,2	9,92	Illite		Glycérine
14	15,8	7,05	Kaolinite		"
15	11,0	10,10	Illite		Hydrazine
16	0,0				"

Echantillon de roche altérée "M40" : relevé des pics du diffractogramme.

Pic	Angle 2 θ (degrés)	d	Espèce minérale	Largeur du pic	Traitement
1	34,9	3,23	Illite		Nature
2	33,8	3,33			"
3	32,1	3,50	Kaolinite		"
4	31,5	3,57			"
5	30,6	3,67			"
6	26,4	4,24	Illite		"
7	22,4	4,99			"
8	15,7	7,09	Kaolinite		"
9	11,2	9,92	Illite		"
10	8,0	13,88	Vermiculite		
11	11,2	9,92	Illite		Etuve 490°
12	15,6	7,14	Kaolinite		
13	11,2	9,92	Illite		Glycérine
14	15,7	7,09	Kaolinite		"
15	10,8	10,29	Illite		Hydrazine
16	0,0				"
17	0,0				"

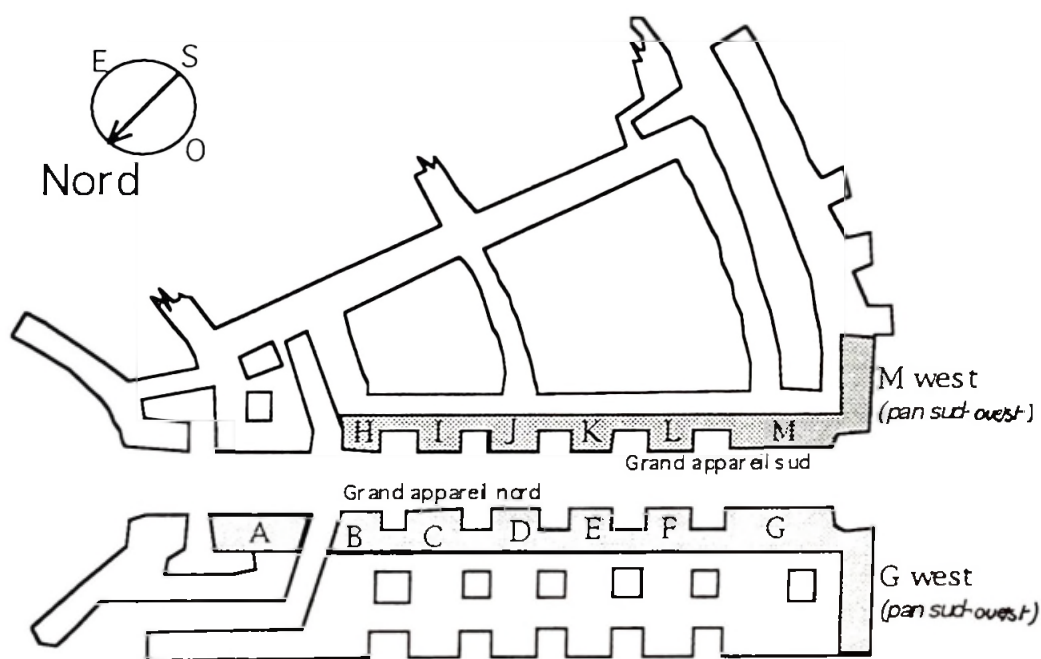
REPRODUCTION DES DIFFERENTS ELEMENTS DE MAÇONNERIE ETUDIES SUR LE GRAND APPAREIL A DES FINS STATISTIQUES.

Nomenclature des blocs

Chaque bloc est repéré par une référence comprenant une lettre et un nombre.

- La lettre indique l'élément de maçonnerie dans lequel se trouve le bloc (voir plan).
- Le premier chiffre du nombre indique la rangée, en partant au dessus de la base, dans laquelle se situe le bloc.
- Le deuxième chiffre du nombre indique le numéro d'ordre du bloc dans la rangée, en partant de l'ouest ou du centre du corridor.

Exemple: M 33 -> Il s'agit du 3^e bloc en partant de l'ouest, de la 3^e rangée verticale du mur "M".

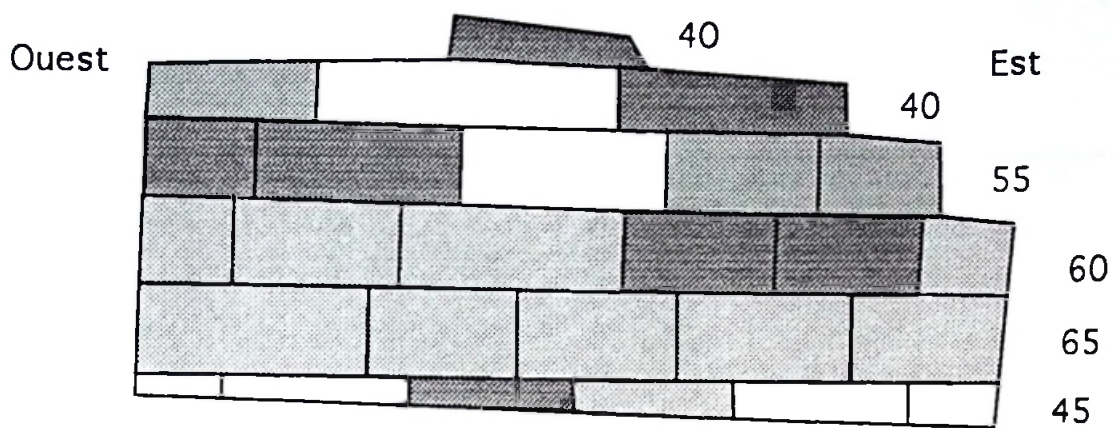


Désignation des différents tronçons du "grand appareil" de l'amphithéâtre.

Reproductions suivantes

Le dessin de chacun des éléments de maçonnerie a été réalisé d'après des photographies prises le 1^{er} mai 1995.

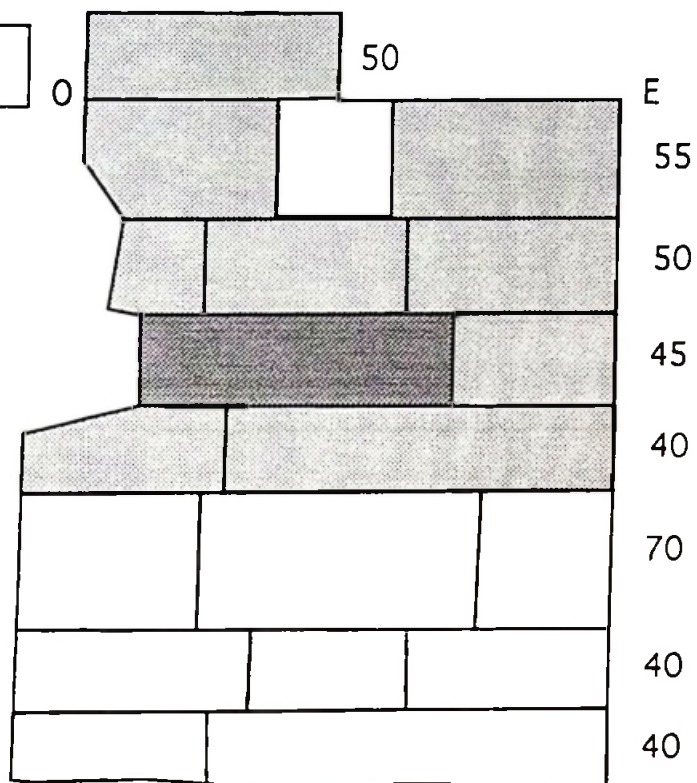
- en gris sombre figurent les "blocs altérés";
- en gris clair figurent les "blocs semi-altérés";
- en blanc figurent les "blocs sains".



CONTREFORT A

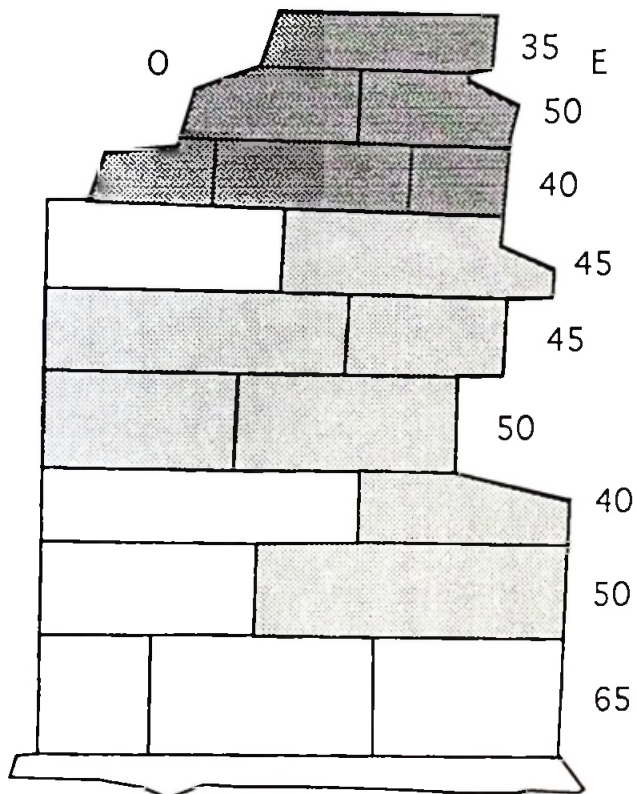
Hauteur totale: 3,05m
Epaisseur moyenne des blocs: 53,88cm

Désignation des blocs: voir
début du chapitre, page XII.



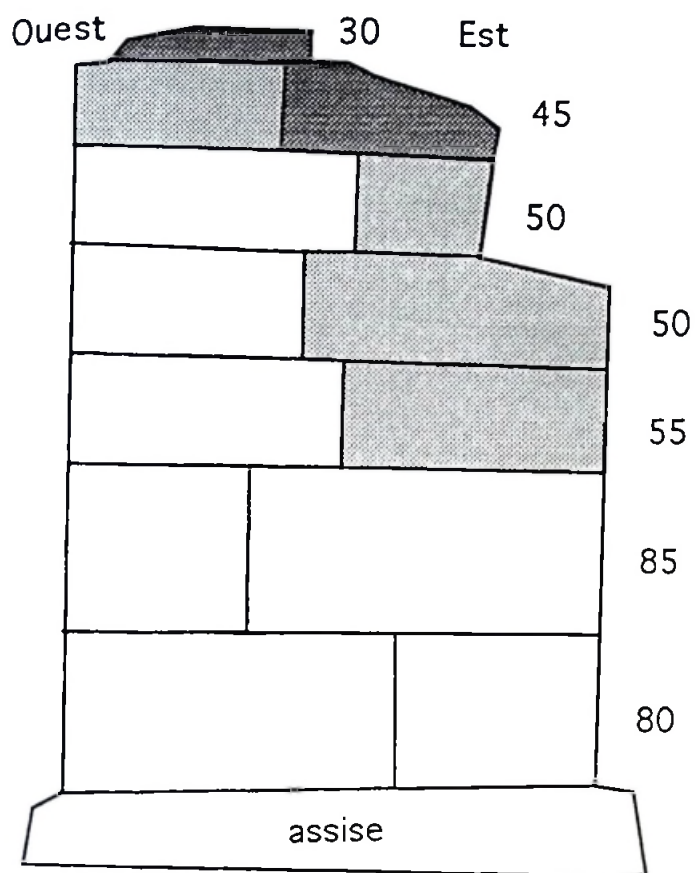
CONTREFORT B

Hauteur totale: 3,90m
Epaisseur moyenne des blocs: 49,73cm



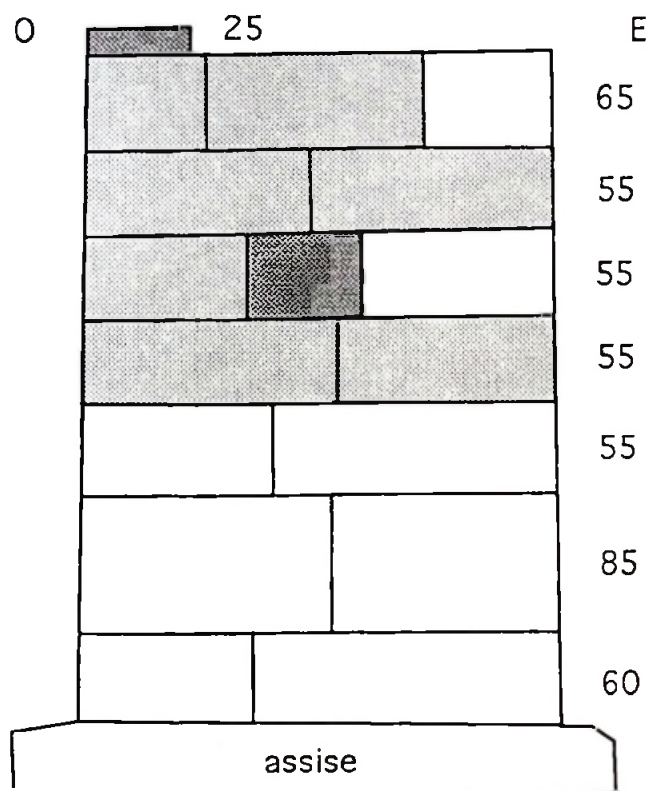
CONTREFORT C

Hauteur totale: 4,20m
Epaisseur moyenne des blocs: 47,77cm



CONTREFORT D

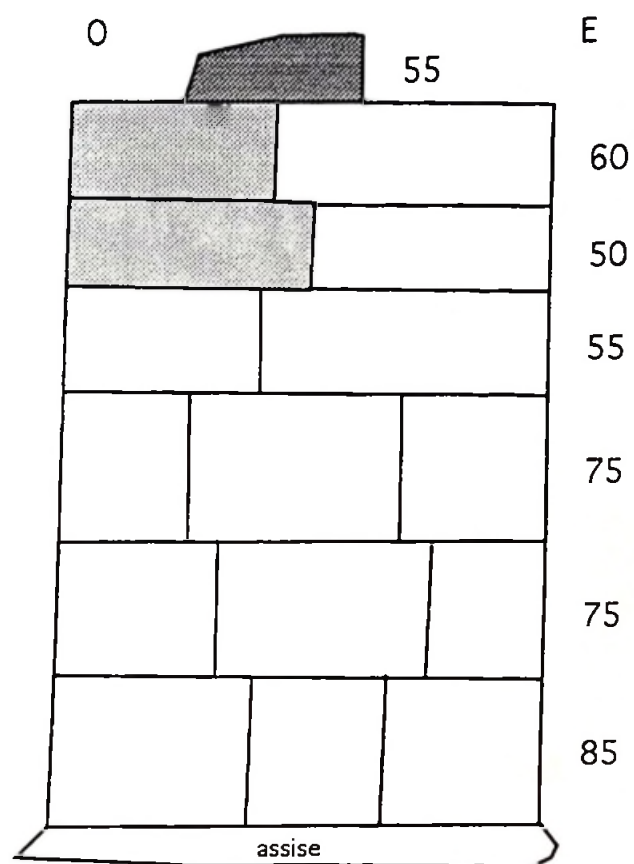
Hauteur totale: 3,95m
Épaisseur moyenne des blocs: 58,84cm



CONTREFORT F

Hauteur totale: 4,55m
Épaisseur moyenne des blocs: 59,41cm

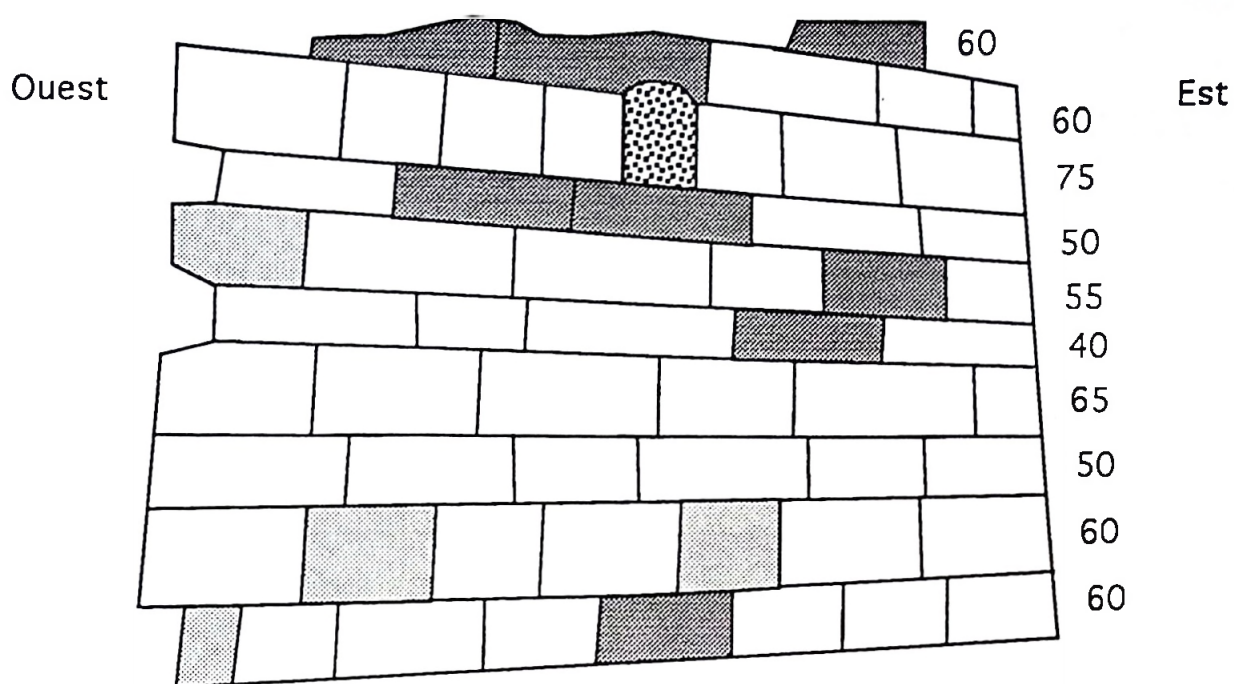
Désignation des blocs: voir
début du chapitre, page XII.



CONTREFORT E

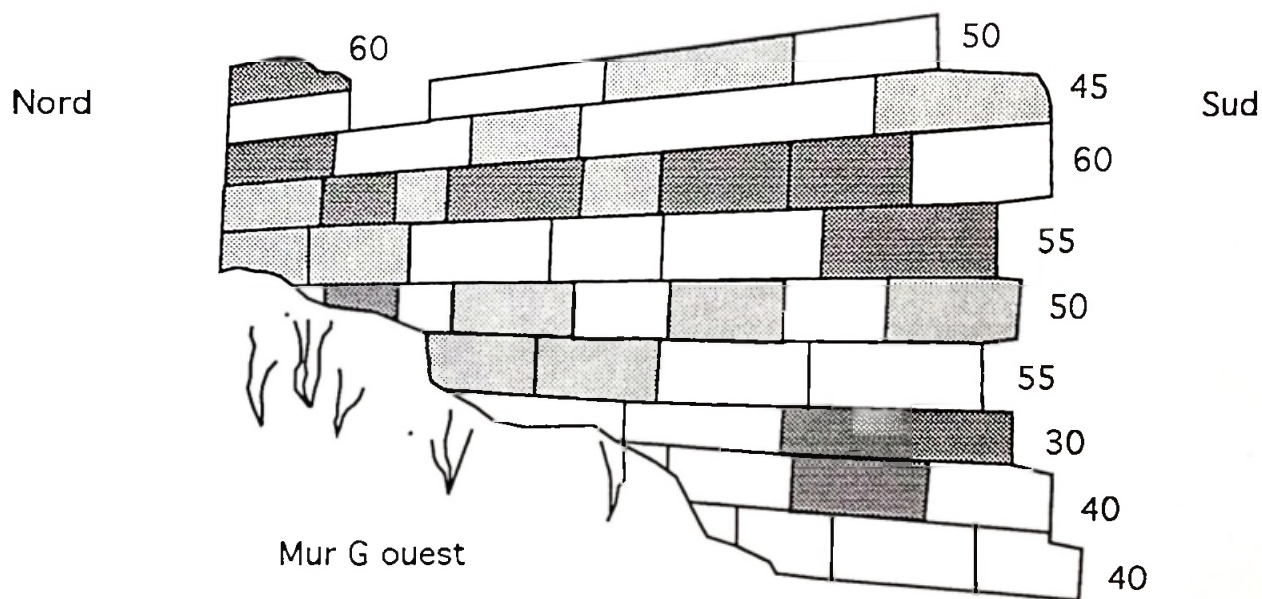
Hauteur totale: 4,55m
Épaisseur moyenne des blocs: 68,12cm

Désignation des blocs: voir
début du chapitre, page XII.

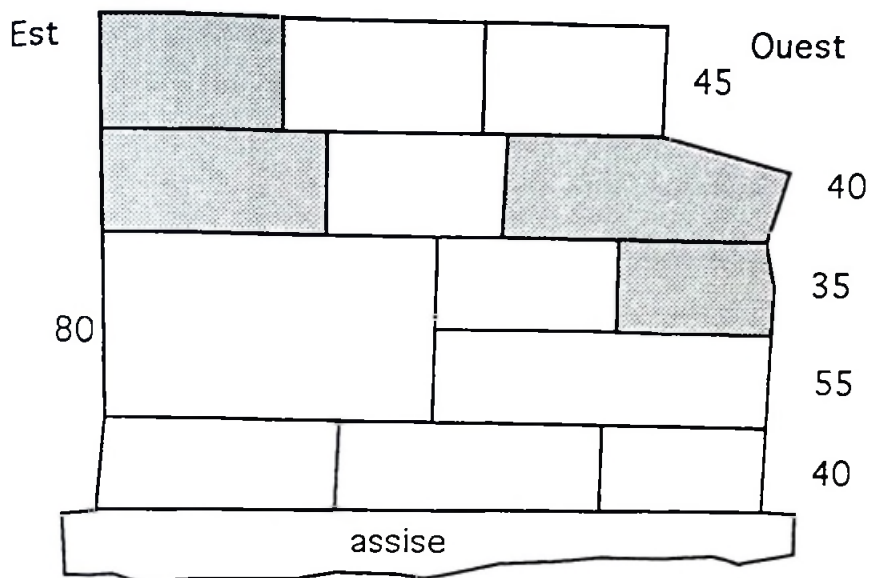


Mur G

Hauteur totale: 5,75m
Epaisseur moyenne des blocs: 58,18cm



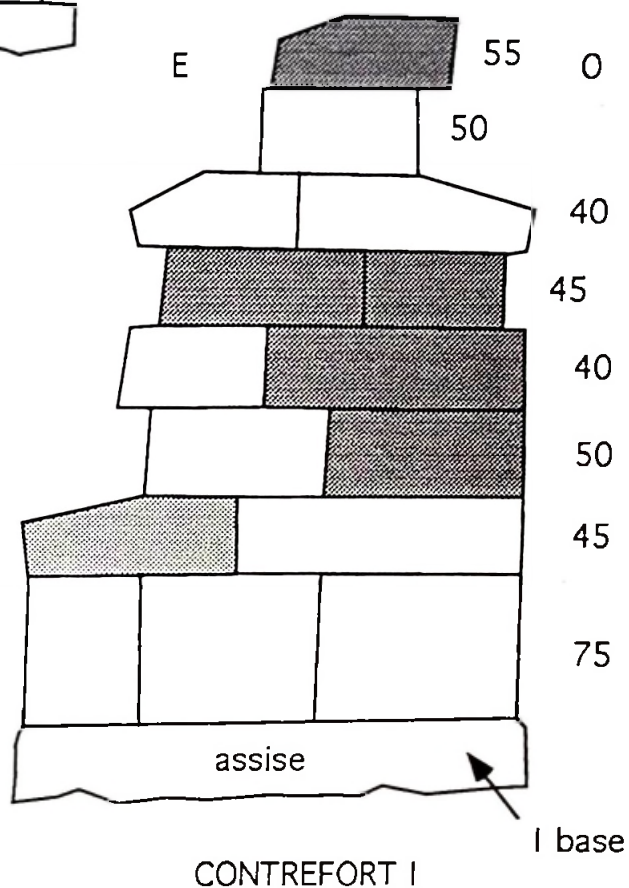
Hauteur totale: 4,85m
Epaisseur moyenne des blocs: 49,67cm



CONTREFORT H

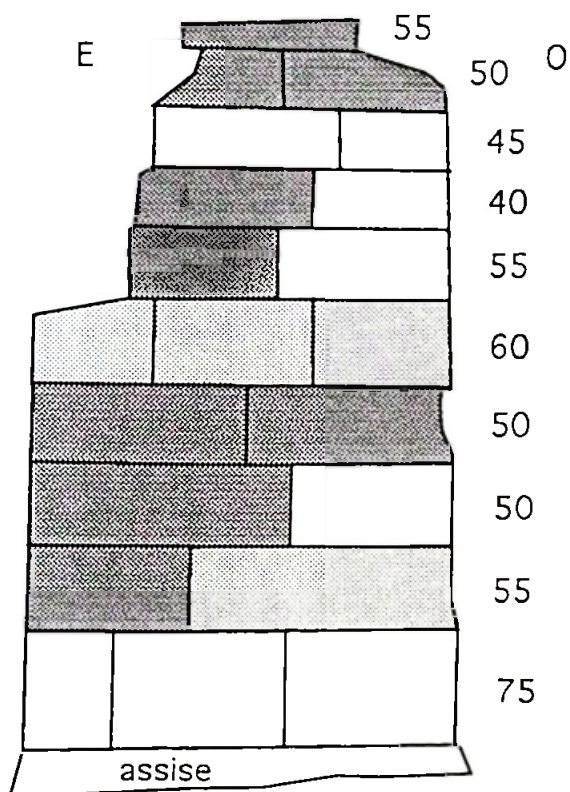
Hauteur totale: 2,10m
Épaisseur moyenne des blocs: 45,00cm

Désignation des blocs: voir
début du chapitre, page XII.



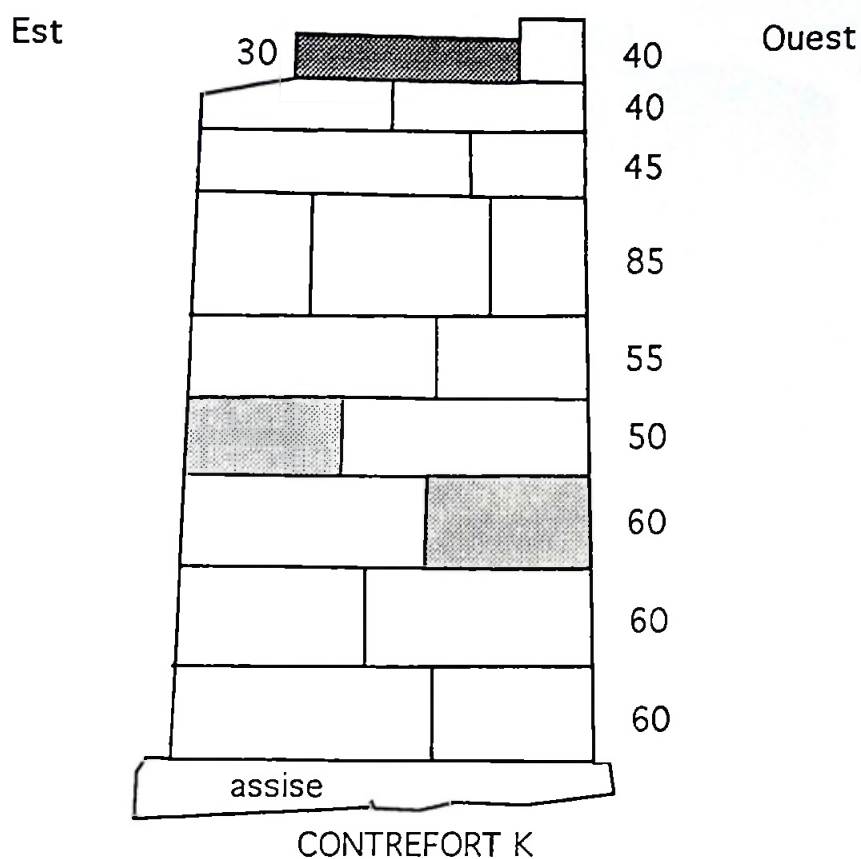
CONTREFORT I

Hauteur totale: 4,00m
Épaisseur moyenne des blocs: 52,81cm

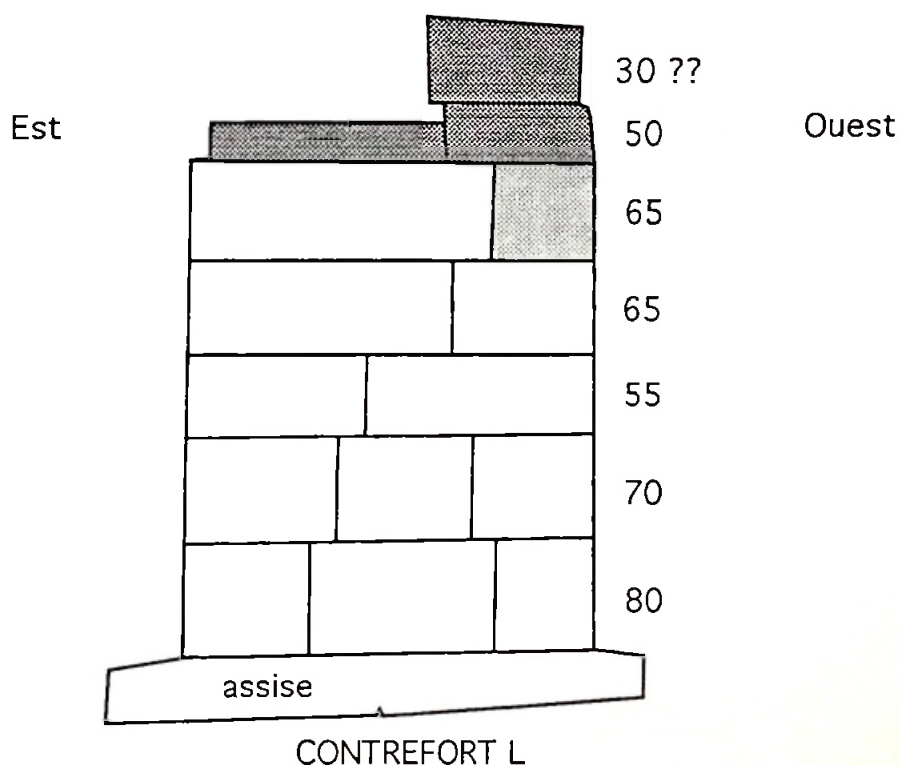


CONTREFORT J

Hauteur totale: 5,35m
Épaisseur moyenne des blocs: 54,76cm

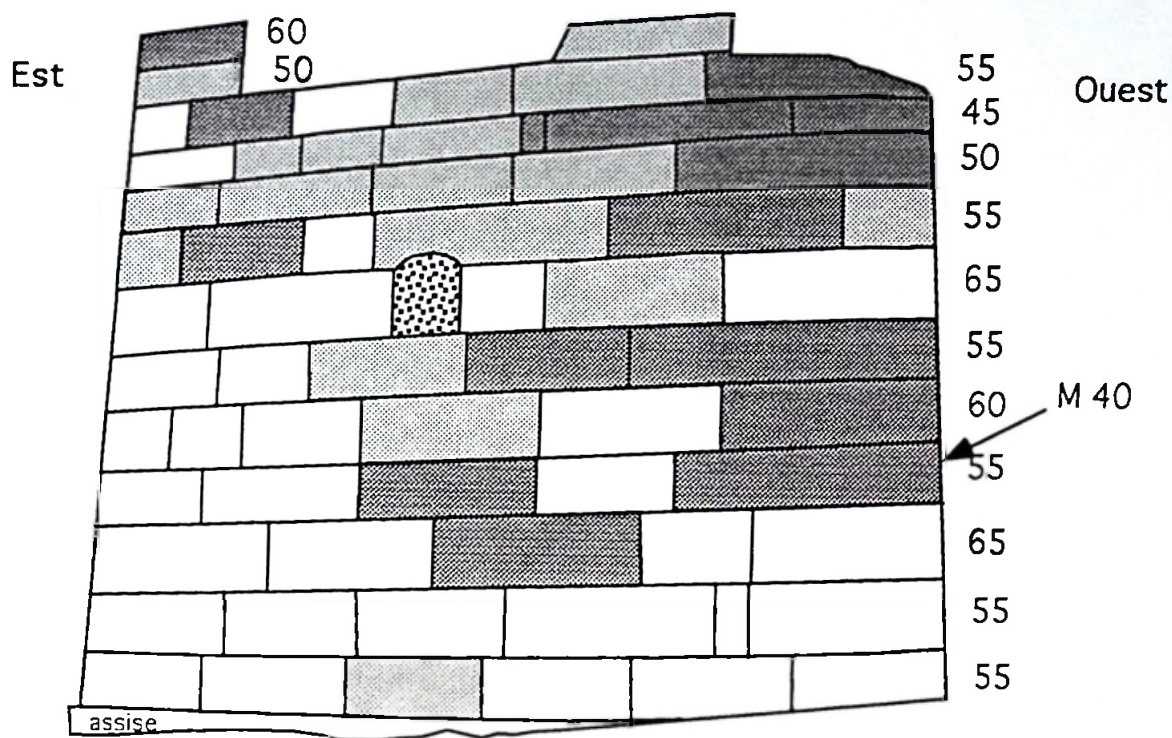


Hauteur totale: 4,95m
Epaisseur moyenne des blocs: 56,90cm



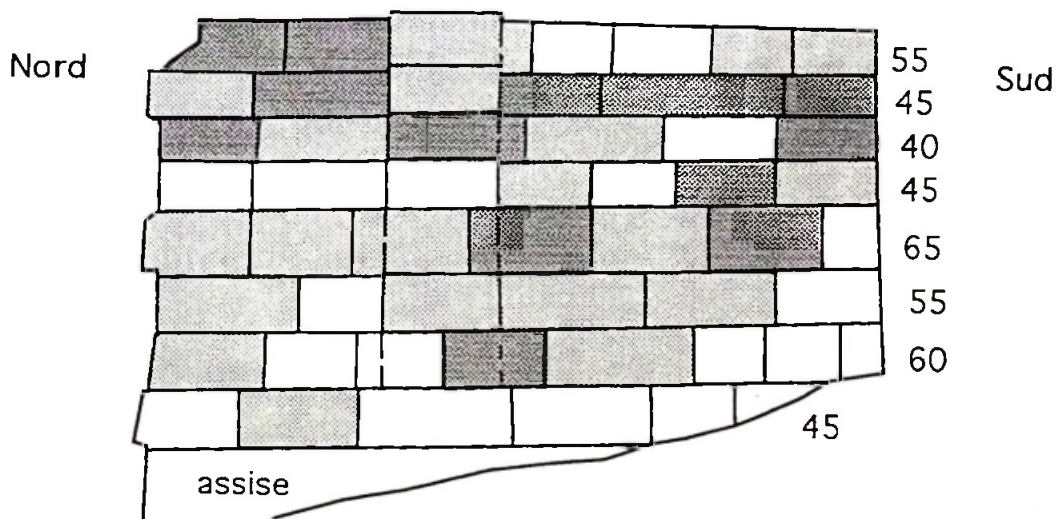
Hauteur totale: 4,15m
Epaisseur moyenne des blocs: 64,66cm

Désignation des blocs: voir
début du chapitre, page XII.



MUR M

Hauteur totale: 7,25m
Epaisseur moyenne des blocs: 55,46cm



MUR Mw

Hauteur totale: 4,10m
Epaisseur moyenne des blocs: 51,66cm

Désignation des blocs: voir
début du chapitre, page XII.

