

DOCUMENT PUBLIC

***Guide méthodologique de sélection des pierres
des monuments en termes de durabilité
et compatibilité***

Etude réalisée dans le cadre du projet de recherche 2000-MET-D03

D. Dessandier
avec la collaboration de
P. Auger, H. Haas, G. Hugues

décembre 2000
BRGM/RP-50137-FR



Mots clés : Pierres, Altération, Durabilité, Compatibilité.

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

Dessandier D. (2000) – Guide méthodologique de sélection des pierres des monuments en termes de durabilité et compatibilité. BRGM/RP-50137-FR, 76 p., 5 fig., 12 tabl., 3 ann.

© BRGM, 2000, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

*L*a présente étude s'inscrit dans le cadre du projet de Recherche et Développement BRGM référencé METD03 et intitulé « Minéralogie et analyse des déchets ». Elle a débuté en janvier 1999 et s'est achevée en décembre 2000.

Comme tout matériau naturel, les pierres des monuments subissent au fil du temps des mécanismes physico-chimiques générant des altérations, dommageables pour l'esthétique de l'édifice et à terme pour sa stabilité.

Plus de la moitié des dépenses liées à la restauration des monuments historiques est consacrée à ces problèmes, qu'il s'agisse de la substitution des moellons altérés de l'édifice par de la pierre fraîchement extraite de carrière, ou du traitement conservatoire (par décapage et/ou application de produits hydrofuges/consolidants) des pierres en œuvre d'origine. Pour un monument donné, la maîtrise du coût « restauration de la pierre » apparaît donc étroitement liée à la fréquence des travaux de restauration, elle-même conditionnée par le choix des pierres et leur « durée de vie ».

Cette phase de sélection des matériaux pierreux est fondamentale et ne peut être réussie qu'en ayant mené une étude préalable des pierres d'origine et de substitution, basée sur les notions de durabilité et de compatibilité. Afin d'appréhender ces deux notions, 18 échantillons de pierres calcaires mises en œuvre d'origine sur monuments historiques ou utilisées en restauration de ces édifices et représentant des cas réels de durabilité et compatibilité variables, ont été sélectionnés et échantillonnés sur monuments ou en carrières.

L'eau représentant le principal facteur externe de développement des altérations, chaque échantillon a fait l'objet d'une méthodologie d'étude spécifique en laboratoire s'appuyant sur des méthodes de caractérisation susceptibles de qualifier et de quantifier leur milieu poreux, en tant que lieu de stockage et de transfert des fluides.

Parallèlement, l'étude des mécanismes d'altération des pierres a permis d'identifier les facteurs internes d'altération (caractéristiques intrinsèques) et d'obtenir une formulation générale de la durabilité et de la compatibilité des pierres. Elle a ensuite conduit à la mise au point d'une **fiche pratique d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité, attribuant un indice de durabilité et de compatibilité (IDC) à toute pierre.**

Les indices obtenus pour les 18 échantillons de pierres calcaires étudiées ont été confrontés aux observations in situ d'une part, et aux résultats d'un essai de vieillissement accéléré par cristallisation et hydratation de sel d'autre part. Cette confrontation a permis d'aboutir à une validation correcte pour les pierres calcaires, de l'indice de durabilité et de compatibilité formulé.

Cet indice (IDC) s'avère d'usage simple et obtenu à moindre coût. Basé sur la mesure de quatre paramètres obtenus selon des procédures normalisées, son utilisation systématique doit réellement guider les professionnels de la restauration des monuments (architectes, exploitants de carrières, restaurateurs), dans leur choix des pierres les mieux adaptées en terme de durabilité et de compatibilité, et limiter à terme les dommages liés à l'emploi de pierres non adéquates.

Validé pour les roches sédimentaires de type calcaire, l'utilisation de l'indice IDC doit maintenant être généralisée après ajustement éventuel et nouvelle validation, aux autres types de pierres mises en œuvre dans le patrimoine bâti : roches sédimentaires détritiques telles que les grès et roches ignées telles que les granites, les basaltes, etc.

Sommaire

1. Introduction	9
2. Connaissances sur l'altération des pierres	11
2.1. Mécanismes d'altération des pierres	11
2.1.1. Mécanismes physiques	11
2.1.2. Mécanismes physico-chimiques	11
2.1.3. Mécanismes biologiques	12
2.2. Facteurs d'altération des pierres	12
2.2.1. Facteurs internes	12
2.2.2. Facteurs externes	13
3. Pierres sélectionnées	15
3.1. Critères de sélection	15
3.1.1. Étude de cas réels	15
3.1.2. Valorisation des résultats	15
3.1.3. Volume disponible d'échantillon suffisant	15
3.2. Pierres échantillonnées	17
3.2.1. « Banc Franc » de Paris et pierre de Saint-Pierre-Aigle	17
3.2.2. Pierre de Saint-Leu et pierre de Saint-Maximin	17
3.2.3. Pierre de Jaumont et pierre de Rouffach	18
3.2.4. Tuffeau de Touraine et pierre de Richemont	18
3.2.5. Craie de Picardie, pierre de Migné et pierre de Savonnières	19
4. Étude des pierres en laboratoire	21
4.1. Étude minéralogique et pétrographique	21
4.1.1. Détermination des minéraux constitutifs	21
4.1.2. Description pétrographique	22
4.1.3. Résultats	22

4.2. Caractérisation du milieu poreux.....	24
4.2.1. Mesure de la porosité totale.....	24
4.2.2. Porosimétrie au mercure et spectre de porosité.....	24
4.2.3. Résultats	25
4.3. Propriétés de stockage des fluides.....	27
4.3.1. Mesure de la porosité à 48 h et du coefficient d'absorption d'eau.....	27
4.3.2. Résultats	28
4.4. Propriétés de transfert des fluides.....	29
4.4.1. Mesure de la cinétique d'imbibition capillaire.....	29
4.4.2. Mesure de la cinétique d'évaporation.....	30
4.4.3. Résultats	31
4.5. Résistance mécanique.....	32
4.5.1. Mesure de la résistance à la compression uniaxiale.....	32
4.5.2. Résultats	33
4.6. Comportement en présence d'eau.....	35
4.6.1. Mesure de la capacité d'adsorption au bleu de méthylène.....	35
4.6.2. Résultats	35
4.7. Analyse statistique des résultats	36
4.7.1. Principe de l'ACP.....	36
4.7.2. Règles d'interprétation.....	36
4.7.3. Application de l'ACP aux 18 échantillons.....	38
5. Formulation de la durabilité et de la compatibilité des pierres	43
5.1. Définitions	43
5.1.1. Durabilité.....	43
5.1.2. Compatibilité.....	43
5.2. Approche théorique de la durabilité	43
5.2.1. Intégration des facteurs d'altération.....	43
5.2.2. Identification des propriétés intrinsèques influentes	44

5.3. Formulation pratique de la durabilité	45
5.3.1. Intégration des paramètres expérimentaux	45
5.3.2. Fiche pratique d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité des pierres ...	46
5.4. Application aux pierres sélectionnées	48
5.4.1. Calcul de l'indice de durabilité et de compatibilité.....	48
5.4.2. Interprétation en terme de durabilité et compatibilité	49
5.4.3. Validation de l'indice de durabilité et de compatibilité	52
6. Conclusion	57
Bibliographie	59

Liste des figures

Fig. 1 – Positions remarquables des points représentatifs des variables dans un disque de corrélation.	37
Fig. 2 – Matrice des corrélations entre les 21 paramètres expérimentaux mesurés sur les 18 échantillons de pierres (les coefficients de corrélations dont la valeur absolue est supérieure à 0,75 sont notés en caractères gras)	39
Fig. 3 – Projection des 25 paramètres expérimentaux mesurés sur les 18 échantillons, selon les 2 premiers axes factoriels.	40
Fig. 4 – Projection des 18 échantillons selon les 2 premiers axes factoriels.....	41
Fig. 5 – Fiche pratique d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité d'une pierre (exemple de l'échantillon C-SAV).	48

Liste des tableaux

Tabl. 1 – Informations sur les pierres échantillonnées.....	16
Tabl. 2 – Composition minéralogique des pierres étudiées (T = Traces).	23
Tabl. 3 – Pétrographie des pierres étudiées.....	23

Tabl. 4 – Paramètres quantitatifs décrivant le milieu poreux des pierres étudiées.	26
Tabl. 5 – Paramètres liés aux propriétés de stockage des fluides des pierres étudiées.....	28
Tabl. 6 – Paramètres liés aux propriétés de transfert des fluides des pierres étudiées (n.d. = non déterminable).	31
Tabl. 7 – Résistance à la compression uniaxiale des pierres étudiées.	34
Tabl. 8 – Classification I.S.R.M. des roches basée sur la résistance à la compression uniaxiale (L. Dobereiner et M.H. De Freitas, 1986).....	35
Tabl. 9 – Capacité d'adsorption de bleu de méthylène des pierres étudiées.....	36
Tabl. 10 – Paramètres expérimentaux traités.	38
Tabl. 11 – Indices de Durabilité et Compatibilité IDC et classement relatif des pierres étudiées.	49
Tabl. 12 – Indices de résistance au sel IR_{sel} et classement relatif des pierres étudiées ; confrontation avec l'indice IDC.	54

Liste des annexes

Ann. 1 – Illustrations photographiques des pierres sélectionnées	61
Ann. 2 – Observations au microscope optique polarisant des pierres sélectionnées	67
Ann. 3 – Illustrations photographiques des pierres sélectionnées, soumises à un essai de vieillissement accéléré.....	73

1. Introduction

*L*a présente étude s'inscrit dans le cadre du projet de Recherche et Développement BRGM référencé METD03 et intitulé « Minéralogie et analyse des déchets ». Elle a débuté en janvier 1999 et s'est achevée en décembre 2000.

Comme tout matériau naturel, les pierres des monuments subissent au fil du temps des mécanismes physico-chimiques générant des altérations, dommageables pour l'esthétique de l'édifice et à terme pour sa stabilité.

La phase de sélection des matériaux pierreux est fondamentale et ne peut être réussie qu'en ayant mené une étude préalable des pierres d'origine et de substitution, basée sur les notions de durabilité et de compatibilité. Afin d'appréhender ces deux notions, 18 échantillons de pierres mises en œuvre d'origine sur monuments historiques ou utilisées en restauration de ces édifices et représentant des cas réels de durabilité et compatibilité variables, ont été sélectionnés et échantillonnés sur monuments ou en carrières.

L'eau représentant le principal facteur externe de développement des altérations, chaque échantillon fait dans un premier temps l'objet d'une méthodologie d'étude spécifique en laboratoire s'appuyant sur des méthodes de caractérisation susceptibles de qualifier et de quantifier leur milieu poreux, en tant que lieu de stockage et de transfert des fluides.

Parallèlement, l'étude des mécanismes d'altération des pierres a permis d'identifier les facteurs internes d'altération (caractéristiques intrinsèques) et d'obtenir une formulation générale de la durabilité et de la compatibilité des pierres. Elle a ensuite conduit à la mise au point d'une fiche pratique d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité, attribuant un indice de durabilité et de compatibilité (IDC) à chaque pierre.

Enfin, les indices obtenus pour les 18 échantillons de pierres étudiées ont été confrontés aux observations in situ d'une part, et aux résultats d'un essai de vieillissement accéléré par cristallisation et hydratation de sel d'autre part. Cette confrontation a permis d'aboutir à une validation correcte pour les pierres calcaires, de l'indice de durabilité et de compatibilité formulé.

2. Connaissances sur l'altération des pierres

Les morphologies d'altération des pierres observables sur les édifices sont la conséquence et l'illustration du développement de mécanismes physiques, physico-chimiques et biologiques divers.

Ces mécanismes d'altération sont conditionnés par les caractéristiques intrinsèques de la pierre (facteurs internes d'altération) et aggravés par les conditions d'exposition et d'alimentation du bâtiment en eau et sels dissous (facteurs externes d'altération) plus rudes que dans le contexte géologique originel.

Dans ce premier chapitre, nous nous proposons donc de passer en revue les mécanismes d'altération et les facteurs d'altération, dont la connaissance est le prérequis indispensable pour la formulation des notions de durabilité et de compatibilité (cf. chap. 3).

2.1. MÉCANISMES D'ALTÉRATION DES PIERRES

Dans son milieu ambiant, une pierre est soumise à différents **mécanismes d'altération** (simultanés ou séparés) classés suivant leur moteur en trois groupes : mécanismes d'altération physiques, chimiques et biologiques (J. Philippon, R.A. Lefèvre et D. Jeannette, 1991).

2.1.1. Mécanismes physiques

Ils provoquent la dissociation partielle des pierres, sous forme de grains ou d'éclats, mais sans en modifier la composition minéralogique.

Les principaux mécanismes physiques sont les ravinelements, dilatations hydriques et thermiques et la gélifraction.

2.1.2. Mécanismes physico-chimiques

a) Dissolutions

Elles se développent dans les pierres calcaires exposées à des lessivages et sont d'autant plus rapides que les eaux sont plus acides. Il s'agit d'un mécanisme chimique *sensu stricto*.

b) Mécanismes d'altération liés à des concentrations de sels

Suivant l'exposition de la pierre, ils génèrent des altérations de structures et morphologies différentes (C. Hammecker, 1993) :

- les **encroûtements** résultent de la combinaison d'un dépôt atmosphérique direct de particules, à l'abri des lessivages, et de la précipitation, lors de l'évaporation des solutions, de cristaux de gypse et de calcite ;
- les **altérations en plaques** et **desquamations** sont générées par des cycles répétés d'imbibition/séchage, avec en particulier les décollements résultant de dilatations de solution contenant des sels peu solubles. Il s'agit d'un mécanisme physico-chimique ;
- les **désagrégrations sableuses** et **alvéolisations** sont dues à la cristallisation de sels très solubles sous la surface, provoquant le dessertissage des grains. Il s'agit d'un mécanisme physico-chimique.

2.1.3. Mécanismes biologiques

Ils sont liés à la présence de bactéries, végétaux et lichens, et génèrent des dégradations (biodétériorations) beaucoup plus modestes que les mécanismes physico-chimiques.

2.2. FACTEURS D'ALTÉRATION DES PIERRES

Les différents mécanismes d'altération sont initialisés par l'association de **facteurs d'altération internes et externes** (F.J. Alonso, 1986).

2.2.1. Facteurs internes

Ce sont des **caractéristiques intrinsèques** à la pierre (caractéristiques minéralogiques, pétrophysiques, mécaniques) contrôlant un mécanisme d'altération donné. Pour exemples :

- dans le cas d'un mécanisme d'altération par dissolution, la composition minéralogique peut être un facteur interne important voire dominant de l'altération. Ainsi, une pierre très riche en carbonate (calcaire...) sera nettement plus sensible aux dissolutions, qu'une pierre riche en silicates (granite...). Dans ce cas, le milieu poreux (apprécié par la détermination de certaines caractéristiques pétrophysiques) ne joue qu'un rôle secondaire ;
- dans le cas des mécanismes d'altération physico-chimiques liés à la concentration de sels (générant encroûtements, plaques et désagrégration sableuse), ce n'est plus la composition minéralogique de la pierre qui va contrôler directement l'intensité et la morphologie des altérations, mais l'importance et la nature du milieu poreux, appréciées par la mesure de certaines caractéristiques pétrophysiques et mécaniques de la pierre.

2.2.2. Facteurs externes

Outre les caractéristiques intrinsèques de la pierre, les mécanismes d'altération sont commandés par des facteurs externes à la pierre : **conditions d'exposition et d'alimentation** (C. Samson-Gombert, 1993).

a) Conditions d'exposition

Le type de mécanisme d'altération est conditionné initialement par l'orientation et la situation de la pierre sur l'édifice.

En effet, l'exposition d'une pierre détermine sa possibilité de rester sèche ou au contraire d'être soumise à une imbibition (des eaux de pluie, par remontées capillaires) ou à un lessivage superficiel (pluies directes, ruissellement).

Pour exemples :

- l'altération chimique par dissolution est d'autant plus importante que la pierre est soumise à un fort lessivage (zones exposées aux pluies fouettantes) ;
- les encroûtements sont localisés dans les parties humides abritées des lessivages, où peuvent donc s'évaporer les solutions qui transitent dans la pierre ;
- l'altération en plaque est associée à des zones soumises à des pluies fouettantes et à des cycles répétés d'imbibition et de séchage (D. Jeannette, 1994) ;
- les désagréments sableux se développent sur des pierres humides (apport d'eau régulier) mais non lessivées.

b) Conditions d'alimentation

Les mécanismes d'altération de la pierre nécessitent la présence d'éléments externes divers, acheminés soit par **voie humide** (en présence d'eau : sels, acides...), soit par **voie sèche** (air, vent : poussières, suies...). L'eau constitue le principal facteur externe d'altération, en agissant :

- soit directement par son **changement de phase** (altération physique par gélifraction) ou par les **variations volumiques liées à sa présence dans la pierre** (altération physique par dilatation hydrique et/ou thermique de minéraux) ;
- soit indirectement par son rôle de **vecteur d'éléments dissous** comme les **acides** (altération chimique par dissolution) et les **sels** (altération physico-chimique en plaque et désagrégation sableuse). Dans le cas d'un mécanisme d'altération chimique par dissolution, les dissolutions sont d'autant plus intenses que les eaux sont plus acides (D. Jeannette, 1994). Dans le cas d'un mécanisme d'altération chimique lié à la concentration de sels, ces derniers ont des origines diverses : ions lessivés des pierres, sols et autres matériaux de construction (mortiers), composantes de l'atmosphère naturelle et polluée, production d'organismes (A. Arnold, 1994).

3. Pierres sélectionnées

18 échantillons de pierres mises en œuvre d'origine sur monuments historiques ou utilisées en restauration de ces édifices et constituant des cas réels de durabilité et compatibilité variables, ont été sélectionnés et échantillonnés sur monuments ou en carrières.

Sélection et échantillonnage des pierres ont été réalisés conjointement par le BRGM et le Laboratoire de Recherches des Monuments Historiques (LRMH – 29 rue de Paris – 77420 Champs sur Marne) dépendant du *ministère de la Culture et de la Communication*.

3.1. CRITÈRES DE SELECTION

3.1.1. Étude de cas réels

La présente étude reposant sur des « cas réels », la sélection d'une pierre donnée est conditionnée par le fait qu'il existe des exemples de monuments illustrant sa compatibilité ou son incompatibilité avec un autre faciès (également à sélectionner).

3.1.2. Valorisation des résultats

L'étude porte sur des pierres dont l'extension géographique de zone de mise en œuvre sur monuments et immeubles bâtis est régionale voire nationale. Par ailleurs, la prédominance des roches sédimentaires dans les pierres en œuvre sur le patrimoine bâti en France a conduit à sélectionner des faciès calcaires. Chaque pierre sélectionnée est ainsi une pierre calcaire, largement représentée en terme de quantité de pierre d'origine mise en œuvre sur un nombre conséquent d'édifices, et/ou en terme de quantité de pierre utilisée en restauration de ces ouvrages. Les pierres d'exploitation et de mise en œuvre très locales sont éliminées de la sélection. Les données obtenues dans le cadre de cette étude pourront ainsi servir au plus grand nombre, tant en enrichissant la connaissance scientifique et technique (alimentation des bases de données existantes par exemple), qu'en renseignant les professionnels de la restauration (exploitants de carrières, architectes, restaurateurs...) sur ces pierres.

3.1.3. Volume disponible d'échantillon suffisant

La caractérisation complète de chaque type de pierre nécessite de disposer d'un volume important d'échantillon. L'échantillonnage par carottage s'avère donc insuffisant et seul la récupération d'un bloc de pierre est adaptée. S'il est aisé de récupérer un bloc du volume suffisant auprès des exploitants de carrières, l'échantillonnage des pierres de monuments est lui conditionné par la réalisation d'un chantier de restauration, durant lequel des blocs anciens sont démontés et récupérables.

Dénomination du faciès	Époque/Étage géologique	Lieu d'extraction	Références	Lieu d'échantillonnage	Référence de l'échantillon
<i>Banc Franc de Paris</i>	Éocène/Lutétien (45 Ma)	Sous-sols de Paris et de ses environs (75)	Notre-Dame de Paris, soubassement de l'hôtel des Invalides, nombreux édifices et immeubles bâtis parisiens	Notre-Dame de Paris (parement façade ouest)	M-BAF-1 M-BAF-2
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	Éocène/Lutétien (45 Ma)	Commune de Saint-Pierre-Aigle (02)	Restaurations de Notre-Dame de Paris, du pont Royal et du pont Neuf	Carrière de Saint-Pierre-Aigle, dans les bancs « roche dure éveillée » et « roche dure coquillée ».	C-SFA-1 C-SPA-2
<i>Pierre de Richemont</i>	Crétacé/Turonien (90 Ma)	Commune d'Avy (17)	Hôtel des Postes à Angoulême, restauration de monuments en « Tuffeau de Touraine » dont parties du château de Chambord et de la cathédrale de Nantes	Carrière ROCAMAT à Avy, dans les bancs « jaune » et « blanc ».	C-RIC-J C-RIC-B
<i>Tuffeau de Touraine</i>	Crétacé/Turonien (90 Ma)	Terminaison sud-ouest du Bassin parisien	Château de Chambord, cathédrale de Nantes, abbaye de Fontevraud	Château des Ducs de Bretagne (façade du Grand Gouvernement) ; blocs des XV ^e et XVII ^e siècles ; carrières Maquignon à Usseau (86) et Lucet à Saint-Cyr-en-Bourg (49)	M-TUF-1 M-TUF-2 C-TUF-U C-TUF-C
<i>Pierre de Jaumont</i>	Jurassique/Bajocien (170 Ma)	Commune de Malancourt-la-Montagne (57)	Cathédrale et bâtis traditionnels de Metz, château du Halberg à Sarrebruck, restauration de la collégiale Saint-Thiébaud de Thann	Carrière VAGLIO à Malancourt-La-Montagne.	C-JAU
<i>Pierre de Rouffach</i>	Oligocène (28 Ma)	Commune de Westhalten (68)	Collégiale Saint-Thiébaud de Thann, église Notre-Dame de Rouffach, bâti traditionnel de Colmar	Carrière SCHERBERICH « du strangenberg » à Westhalten.	C-ROU
<i>Pierre de Saint-Leu</i>	Éocène/Lutétien (45 Ma)	Communes de Saint-Leu-d'Esserent, Saint-Vaast-lès-Mello, Saint-Maximin (60)	Château de Versailles, hôtel des Invalides, Palais Royal	Carrière ROCAMAT de Saint-Leu. Château de Versailles (façade ouest du corps central)	C-SLE M-SLE
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	Éocène/Lutétien (45 Ma)	Commune de Saint-Maximin (60)	Quai de la Seine, restauration du château de Senlis et de la chapelle de Chantilly, mairie et musée d'Orléans, Assemblée nationale	Carrière DEGAN à Saint-Maximin dans les bancs « construction » et « douce ».	C-MAX-C C-MAX-D
<i>Pierre de Savonnières</i>	Jurassique/Portlandien (130 Ma)	Commune de Savonnières-en-Perthois (55)	Ancien opéra de Francfort, préfecture de Nancy, gare de Reims, église Notre-Dame et cathédrale à Saint-Dizier, restauration de la cathédrale et de l'église Saint-Étienne-de-Beauvais	Carrière ROCAMAT « la couleuvre » à Savonnières-en-Perthois.	C-SAV
<i>Pierre de Migné</i>	Jurassique/Callovien (155 Ma)	Commune de Migné-Auxances (86)	Palais de Justice à Bruxelles, restauration de la cathédrale et de l'église Saint-Étienne de Beauvais - Notre-Dame-la-Grande à Poitiers	Carrière de Belle-Roche à Migné, dans le banc « marbrier ».	C-MIG-1 C-MIG-2
<i>Craie de Picardie</i>	Crétacé/Cognacien (87 Ma)	Commune de Saint-Martin-Le-Nœud (60)	Cathédrale de Beauvais, Eglise Saint-Étienne de Beauvais	Eglise Saint-Étienne de Beauvais.	M-CPI

Tabl. 1 – Informations sur les pierres échantillonnées.

Les échantillons précédés de la lettre M proviennent de monuments et ceux précédés de la lettre C proviennent de carrières. Afin de distinguer les 5 groupes de pierres « d'origine/de remplacement » les uns des autres, les lignes correspondantes sont figurées successivement en grisé ou en blanc.

3.2. PIERRES ÉCHANTILLONNÉES

Au total, 18 échantillons de pierres calcaires mises en œuvre d'origine sur monuments historiques ou utilisées en restauration de ces édifices et constituant des cas réels de durabilité et compatibilité variables, ont été sélectionnés et échantillonnés sur monuments ou en carrières. Une illustration photographique de chacun des 18 échantillons est présentée en annexe 1.

Les informations sur ces pierres sont synthétisées dans le tableau 1.

3.2.1. « Banc Franc » de Paris et pierre de Saint-Pierre-Aigle

Le « **Banc Franc** » de Paris est une pierre calcaire d'âge lutétien, extraite dans le sous-sol parisien. De nombreux édifices et bâtiments parisiens en sont constitués dont la cathédrale Notre-Dame de Paris, le pont Neuf et le pont Royal. C'est la principale pierre constitutive des soubassements du bâti parisien (hôtel des Invalides par exemple).

Échantillonnage : deux blocs de parement référencés **M-BAF-1** et **M-BAF-2** ont été prélevés sur la façade ouest de Notre-Dame de Paris.

Les carrières fournissant à l'origine le « Banc franc » sont aujourd'hui épuisées ou plus exploitables (sous-sol de Paris) et les restaurations d'édifices construits en « Banc Franc » sont réalisées avec la **pierre de Saint-Pierre-Aigle** (cas de Notre-Dame de Paris). Il s'agit d'un calcaire lutétien extrait depuis 1945 environ sur la commune de Saint-Pierre-Aigle dans l'Aisne (02).

Échantillonnage : un premier échantillon référencé **C-SPA-1** a été prélevé dans le banc d'appellation « Roche Dure Eveillée ». Un second échantillon référencé **C-SPA-2** a été prélevé dans le banc « Roche Dure Coquillée ».

Les professionnels de la restauration (Architectes en Chef des Monuments Historiques, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques...) s'accordent pour dire que la pierre de Saint-Pierre-Aigle et le « Banc Franc » de Paris s'accordent bien esthétiquement et prennent dans le temps des patines comparables.

3.2.2. Pierre de Saint-Leu et pierre de Saint-Maximin

La **pierre de Saint-Leu** (ou « pierre de Montanier ») est un calcaire d'âge lutétien extrait essentiellement en carrières souterraines dans plusieurs communes de l'Oise (60) dont Saint-Leu-d'Esserent, Saint-Vaast-lès-Mello et Saint-Maximin. Elle constitue de nombreux édifices parisiens dont le château de Versailles.

Échantillonnage : un premier bloc référencé **M-SLE** a été prélevé sur la façade ouest du corps central du château de Versailles. Un second bloc référencé **C-SLE** provenant de la carrière ROCAMAT de Saint-Vaast-lès-Mello a été récupéré sur le chantier de restauration du château de Versailles.

Comme la majorité des pierres de construction du nord du Bassin parisien, la **Pierre de Saint-Maximin** est un calcaire lutétien. Elle est extraite sur la commune de Saint-Maximin (Oise), dans un niveau sus-jacent à la pierre de Saint-Leu.

Échantillonnage : un premier échantillon référencé **C-MAX-C** a été prélevé dans le banc d'appellation « Roche Construction ». Un second échantillon référencé **C-MAX-D** a été prélevé dans le banc « Roche Douce ». Les deux échantillons proviennent de la carrière DEGAN à Saint-Maximin.

Constitutive de nombreux édifices et immeubles parisiens, la pierre de Saint-Maximin a également souvent été mise en substitution de la pierre de Saint-Leu avec « peu de réussite », d'après les ACMH et le LRMH. En effet, ces deux faciès prennent des patines très différentes en vieillissant (à dominante grise pour le Saint-Maximin et jaune rosé pour le Saint-Leu).

3.2.3. Pierre de Jaumont et pierre de Rouffach

La **Pierre de Jaumont** est un calcaire d'âge bajocien, exploité sur la commune de Malancourt-la-Montagne en Moselle (57). Constitutive de nombreux édifices de l'Est de la France dont la cathédrale de Metz, elle est actuellement utilisée pour la restauration de la collégiale Saint-Thiébaud à Thann.

Échantillonnage : un bloc de pierre de Jaumont référencé **C-JAU** a été prélevé dans les carrières de Jaumont (S.A. Vaglio).

La **Pierre de Rouffach** est un calcaire siliceux d'époque oligocène, exploité sur la commune de Westhalten dans le Haut-Rhin (68). Elle est constitutive d'édifices comme la collégiale Saint-Thiébaud à Thann, l'église de Rouffach ou le bâti ancien de Colmar.

Échantillonnage : un bloc de pierre de Rouffach référencé **C-ROU** a été prélevé dans la carrière Scherberich « du Strangenberg » à Westhalten.

D'après les ACMH et le LRMH, les pierres de Jaumont et de Rouffach s'accordent bien esthétiquement et prennent dans le temps des patines comparables.

3.2.4. Tuffeau de Touraine et pierre de Richemont

Le **tuffeau de Touraine** est une pierre calcaire d'âge turonien. Il s'agit de la principale pierre de taille mise en œuvre dans le patrimoine architectural du val de Loire (châteaux de la Loire, abbaye de Fontevraud...). Il répond aux appellations locales de tuffeau de Saumur, tuffeau de Bourré, tuffeau de Touraine, tuffeau Blanc. Actuellement, une poignée de carrières approvisionnent la construction traditionnelle et les chantiers de restauration des monuments historiques dont essentiellement les carrières LUCET à Saint-Cyr-en-Bourg (49) et MAQUIGNON à Usseau (86).

Échantillonnage : deux blocs de tuffeau mis en œuvre au XV^e et XVII^e siècles et référencés **M-TUF-1** et **M-TUF-2** ont été prélevés sur la façade du Grand Gouvernement du château des Ducs de Bretagne à Nantes.

La **Pierre de Richemont** (ou pierre de Pons) est un calcaire d'âge turonien, exploité actuellement sur la commune d'Avy (17).

Cette pierre constitutive de la tour donjon de Pons, de l'hôtel des Postes à Angoulême, est parfois utilisée en substitution du tuffeau de Touraine (cas de certaines parties du château de Chambord, de la cathédrale de Nantes).

Échantillonnage : un premier échantillon référencé **C-RIC-B** a été prélevé dans le banc d'appellation « Richemont Blanc » et un second échantillon référencé **C-RIC-J** a été prélevé dans le banc « Richemont Jaune » de la carrière ROCAMAT d'Avy.

D'après les ACMH et le LRMH, aucune pierre disponible ne s'accorde parfaitement avec le tuffeau. La substitution en pierre de Richemont est un compromis entre une compatibilité esthétique moyenne, mais un gain de durabilité. Le remplacement de tuffeau par du tuffeau de carrière est possible mais n'est pas toujours aisé, compte tenu de la palette de couleurs de cette roche (blanc tirant vers le vert dans la région de Saumur, blanc tirant vers le crème dans la région de Châtellerauld, blanc plus pâle dans la région de Villentrois) posant des problèmes de compatibilité esthétique, pour une durabilité en général médiocre.

3.2.5. Craie de Picardie, pierre de Migné et pierre de Savonnières

La **craie de Picardie** est une pierre d'âge cognacien, exploitée dans la région de Beauvais, sur la commune de Saint-Martin-Le-Nœud. Elle constitue de nombreux édifices de Picardie dont la cathédrale et l'église Saint-Étienne à Beauvais et n'est plus exploitée actuellement.

Échantillonnage : un bloc de craie de Picardie référencé **M-CPI** a été prélevé sur l'église Saint-Étienne à Beauvais.

La **Pierre de Migné** est un calcaire d'âge callovien, exploité en carrières souterraines sur la commune de Migné-Auxances (86). Elle est présente sur Notre-Dame-la-Grande à Poitiers et est actuellement utilisée en substitution de la craie de Picardie dans les chantiers de restauration de la cathédrale et de l'église Saint-Étienne à Beauvais.

Échantillonnage : un premier échantillon référencé **C-MIG-1** a été prélevé dans le niveau d'appellation « Banc Marbrier 5 » et un second échantillon référencé **C-MIG-2** a été prélevé dans le « Banc Marbrier 7 », dans la carrière de Belle Roche (Société des Carrières de Brétigny) à Migné-Auxances.

La **Pierre de Savonnières** est un calcaire d'âge portlandien, exploité sur la commune de Savonnières-en-Perthois (55). Elle constitue de nombreux édifices dont la préfecture de Nancy, l'église Notre-Dame et la cathédrale de Saint-Dizier. Elle a été utilisée en substitution de la craie de Picardie sur la cathédrale et l'église Saint-Étienne à Beauvais, avant que ne soit utilisée la pierre de Migné.

Échantillonnage : un bloc de pierre de Savonnières référencé **C-SAV** a été prélevé dans la carrière « La Couleuvre » (société ROCAMAT) à Savonnières-en-Perthois.

D'après les ACMH et le LRMH, la craie de Picardie et la pierre de Migné s'accordent bien esthétiquement. À l'inverse, craie de Picardie et Savonnières prennent des patines très différentes dans le temps.

4. Étude des pierres en laboratoire

L'eau représentant le principal facteur externe de développement des altérations, l'étude des pierres s'appuie sur des méthodes de caractérisation en laboratoire susceptibles d'une part de qualifier et de quantifier leur milieu poreux, en tant que lieu de stockage et de transfert des fluides, d'autre part de fournir des éléments prédictifs du comportement des pierres en présence d'eau.

Dans ce chapitre, nous détaillons la méthodologie d'étude des pierres des monuments, qui comprend :

- l'étude classique de la minéralogie et de la pétrographie ;
- la caractérisation du milieu poreux ;
- l'étude des propriétés de stockage d'eau ;
- l'étude des propriétés de transfert d'eau et d'air ;
- la détermination de la résistance mécanique ;
- l'étude du comportement en présence d'eau.

Cette méthodologie d'étude des pierres des monuments est ensuite appliquée aux 18 échantillons de pierres sélectionnées. L'ensemble des résultats obtenus est discuté puis fait l'objet d'un traitement statistique par analyse en composantes principales (ACP).

4.1. ÉTUDE MINÉRALOGIQUE ET PÉTROGRAPHIQUE

4.1.1. Détermination des minéraux constitutifs

L'identification et l'estimation semi-quantitative des minéraux constitutifs de chaque pierre sont effectuées par diffractométrie des rayons X sur roche, suivant le mode opératoire BRGM MO 101 « Identification des minéraux isolés, des roches et des phases argileuses par diffractométrie des rayons X et micro-diffraction Debye-Scherrer ».

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

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

4.1.2. Description pétrographique

La description pétrographique de chaque pierre est basée sur :

- un examen macroscopique direct et sous loupe binoculaire (grossissement x 10) ;
- une étude sur lames minces au moyen d'un microscope optique polarisant OLYMPUS BH2 (grossissement x 100 à x 400) couplé à une caméra CCD SONY et système d'acquisition d'image OLYMPUS Pégase ;
- une étude sur cassures naturelles au moyen d'un microscope électronique à balayage (MEB) JEOL JSM 6100 couplé à un dispositif de microanalyse chimique KEVEX Quantum.

La **définition pétrographique** de chaque pierre est ensuite effectuée en utilisant les classifications usuelles des roches sédimentaires (R.J. Dunham, 1962 et G. Scolari et R. Lille, 1973).

4.1.3. Résultats

L'identification et l'estimation semi-quantitative des minéraux constitutifs des 18 pierres échantillonnées sont synthétisées dans le tableau 2.

D'un point de vue minéralogique, le constituant principal des 18 échantillons est la calcite. Pour 15 échantillons, cette proportion en calcite dépasse 90 % classant les 9 faciès correspondants parmi les **calcaires** sensu stricto. Il s'agit des faciès : Banc Franc de Paris, Saint-Pierre-Aigle, Richemont, Jaumont, Saint-Leu, Saint-Maximin, Savonnières, Migné et craie de Picardie.

Deux faciès se distinguent des autres par la présence de silice en quantité significative. Il s'agit du faciès Rouffach contenant environ 6 % de silice sous forme de quartz, et du faciès tuffeau de Touraine contenant environ 35 % de silice sous deux formes : opale CT (~30 %) et quartz (2 à 5 %). Ces 2 derniers faciès correspondent donc à des **calcaires siliceux**.

La majorité des échantillons contient des argiles sous une ou plusieurs formes minéralogiques, en quantité variant de traces (< 1 %) à quelques %. Il s'agit d'argile micacée (illite/micas) dans 17 échantillons, de smectite dans 14 échantillons et de kaolinite dans 2 échantillons.

Parmi les minéraux accessoires identifiés dans les 18 échantillons, citons la sépiolite, le microcline, le plagioclase, la goethite et la clinoptilolite. Ce dernier minéral a été décelé dans le tuffeau de Touraine et dans la pierre de Saint-Pierre-Aigle.

A signaler que d'autres minéraux en très faibles teneurs sont susceptibles d'être rencontrés dans les faciès étudiés, mais non décelés car absents des prises d'échantillons soumises aux analyses en laboratoire ou en teneur inférieure aux limites de détection.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	Identification et estimation semi-quantitative des minéraux constitutifs
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1 M-BAF-2	Calcite 92% - Quartz 3% - Illite/Mica T Calcite 93% - Quartz 1% - Smectite 2% - Illite/Mica 1% Microcline T
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1 C-SPA-2	Calcite 98% - Clinoptilolite 1% - Quartz 1% - Microcline T Calcite 94% - Clinoptilolite 2% - Quartz 1% - Illite/Mica 1% Microcline T - Plagioclase T
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B C-RIC-J	Calcite 96% - Smectite 3% - Illite/Mica 1% - Quartz T Calcite 97% - Smectite 2% - Illite/Mica 1% - Quartz T
<i>Tuffeau De Touraine</i>	M-TUF-1 M-TUF-2	Calcite 44% - Opale CT 30% - Quartz 5% - Smectite 7% Illite/Mica 3% - Clinoptilolite T Calcite 60% - Opale CT 30% - Quartz 2% - Smectite 5% Illite/Mica 1% - Clinoptilolite T
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	Calcite 97% - Quartz 1% - Illite/Mica T - Smectite T
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	Calcite 82% - Quartz 6% - Kaolinite 5% - Illite/Mica 2% Microcline/Orthose 2% - Goethite T
<i>Pierre de Saint-Leu</i>	C-SLE M-SLE	Calcite 90% - Quartz 2% - Illite/Mica 4% - Smectite T Microcline T Calcite 92% - Quartz 2% - Smectite 3% - Illite/Mica 3%
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C C-MAX-D	Calcite 95% - Quartz 1% - Illite/Mica 3% - Microcline T Calcite 95% - Quartz 1% - Smectite 2% - Illite/Mica 1% Microcline T - Kaolinite T
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	Calcite 99% - Smectite 1% - Illite/Mica 1% - Quartz T
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1 C-MIG-2	Calcite 98% - Illite/Mica 1% - Smectite T - Quartz T Calcite 99% - Illite/Mica 1% - Smectite T - Quartz T Microcline T
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	Calcite 96% - Smectite 3% - Illite/Mica 1% - Quartz T Microcline T

Tabl. 2 – Composition minéralogique des pierres étudiées (T = Traces).

La description pétrographique de chacune des 18 pierres échantillonnées est présentée dans le tableau 3.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	Description pétrographique
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1 M-BAF-2	CALCAIRE : Biocalcarénite à pellets, à cerithes et milioles, à ciment micritique, et présence de quartz détritique
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1 C-SPA-2	CALCAIRE : Biocalcarénite à pellets, à cerithes et milioles, et à ciment micritique
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B C-RIC-J	CALCAIRE : Micrite à texture pelletoidale
<i>Tuffeau de Touraine</i>	M-TUF-1 M-TUF-2	CALCAIRE SILICEUX : Calcarénite à quartz et glauconie, et à ciment micritique siliceux
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	CALCAIRE : Biocalcarénite à pellet, et à ciment spathique
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	CALCAIRE SILICEUX : Calcarénite à pellets, à ciment micritique et à quartz détritique
<i>Pierre de Saint-Leu</i>	C-SLE M-SLE	CALCAIRE : Pelcalcarénite à milioles, nummulites et ditrupa, à ciment micritique, et présence de quartz détritique
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C C-MAX-D	CALCAIRE : Biocalcarénite à milioles, à ciment micritique, et présence de quartz détritique
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	CALCAIRE : Oocalcarénite à ciment spathique
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1 C-MIG-2	CALCAIRE : Micrite à texture pelletoidale
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	CALCAIRE : Micrite à empreintes rhomboédriques de calcite

Tabl. 3 – Pétrographie des pierres étudiées.

Des illustrations photographiques des 18 pierres, réalisées au microscope optique polarisant sont présentées en annexe 2.

4.2. CARACTÉRISATION DU MILIEU POREUX

Le milieu poreux d'une pierre correspond à l'ensemble de ses espaces vides, limités par ses éléments minéraux constitutifs. La caractérisation du milieu poreux est effectuée au moyen de diverses méthodes qualitatives et quantitatives, directes et indirectes, complémentaires (R. Monicard, 1975, Y. Guéguen et V. Palciauskas, 1992).

4.2.1. Mesure de la porosité totale

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

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

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

Il s'agit d'un paramètre global ne fournissant pas d'information qualitative, mais permettant d'apprécier rapidement le remplissage maximum, c'est-à-dire l'**importance quantitative du milieu poreux** d'une pierre donnée.

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

4.2.2. Porosimétrie au mercure et spectre de porosité

La **porosimétrie au mercure** fournit le **spectre de porosité de la pierre** et rend compte de la distribution volumique des pores en fonction de leur dimension (rayon d'accès). Cet essai vient compléter la mesure de la porosité totale en quantifiant de manière continue le milieu poreux d'une pierre.

L'essai porosimétrique (N.C. Wardlaw et M. McKellar, 1981, 1988) repose sur l'injection progressive de mercure dans la porosité d'un échantillon initialement placé dans une enceinte sous vide. Le mercure étant un liquide non mouillant, toute augmentation de la quantité de mercure liquide dans les pores de l'échantillon nécessite l'application d'une pression plus élevée. La quantité de mercure injectée dépend, à une pression donnée, de la taille des pores et plus précisément de leur accès.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.2.3. Résultats

La porosité totale ainsi que les paramètres tirés de la porosimétrie au mercure de chacune des 18 pierres échantillonnées sont présentés dans le tableau 4. Ces données décrivent de manière quantitative le milieu poreux de chaque échantillon et permettent d'en apprécier l'importance relative entre échantillons.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	N _t (%)	N _{Hg} (%)	N _M (%)	N _μ (%)	R _{Hg} (μm)	S _{Hg} (m ² /g)
Banc Franc de Paris	M-BAF-1	17,3 ± 1,1	14,7 ± 0,4	0,9 ± 0,1	13,8 ± 0,5	0,14 ± 0,02	1,5 ± 0,1
	M-BAF-2	21,6 ± 0,4	19,6 ± 3,3	2,1 ± 0,6	17,5 ± 3,1	0,07 ± 0,01	2,3 ± 0,5
Pierre de Saint-Pierre-Aigle	C-SPA-1	24,1 ± 2,5	18,4 ± 1,1	1,5 ± 0,5	16,9 ± 1,2	1,53 ± 0,29	1,5 ± 0,1
	C-SPA-2	15,1 ± 1,2	7,9 ± 1,5	1,1 ± 0,2	6,9 ± 1,4	0,05 ± 0,01	1,9 ± 0,3
Pierre de Richemont	C-RIC-B	33,8 ± 0,5	31,9 ± 0,8	2,6 ± 0,8	29,3 ± 0,3	4,11 ± 2,37	0,9 ± 0,1
	C-RIC-J	30,5 ± 0,7	28,3 ± 1,3	1,3 ± 0,1	27,0 ± 1,3	2,77 ± 0,74	1,0 ± 0,1
Tuffeau de Touraine	M-TUF-1	49,7 ± 0,4	43,9 ± 1,5	2,6 ± 0,8	41,3 ± 2,0	4,43 ± 0,81	22,2 ± 1,5
	M-TUF-2	46,5 ± 0,5	43,7 ± 0,7	1,5 ± 0,1	42,2 ± 0,7	3,23 ± 1,30	14,6 ± 0,6
Pierre de Jaumont	C-JAU	22,3 ± 0,5	21,2 ± 0,7	2,7 ± 0,7	18,5 ± 0,3	2,58 ± 1,44	1,0 ± 0,2
Pierre de Rouffach	C-ROU	17,0 ± 0,4	16,5 ± 0,8	4,8 ± 1,1	11,8 ± 1,1	10,92 ± 3,66	1,0 ± 0,1
Calcaire de Saint-Leu	C-SLE	30,7 ± 0,6	31,1 ± 0,9	2,5 ± 0,4	28,6 ± 1,0	3,60 ± 1,21	1,8 ± 0,3
	M-SLE	29,1 ± 1,2	24,6 ± 1,8	3,4 ± 0,7	21,2 ± 1,6	3,44 ± 0,66	1,6 ± 0,1
Pierre de Saint-Maximin	C-MAX-C	40,3 ± 1,2	34,4 ± 1,0	17,2 ± 3,1	17,2 ± 2,2	18,24 ± 8,74	1,1 ± 0,2
	C-MAX-D	30,9 ± 2,3	27,9 ± 1,9	2,0 ± 0,8	25,9 ± 1,4	3,53 ± 0,99	1,1 ± 0,2
Pierre de Savonnières	C-SAV	39,6 ± 0,8	32,6 ± 2,0	9,6 ± 4,0	23,0 ± 5,8	17,51 ± 3,34	1,3 ± 0,5
Pierre de Migné	C-MIG-1	24,6 ± 0,5	25,6 ± 5,2	0,9 ± 0,2	24,8 ± 5,4	0,54 ± 0,11	0,8 ± 0,2
	C-MIG-2	29,3 ± 1,9	31,6 ± 2,8	0,9 ± 0,2	30,7 ± 2,9	0,76 ± 0,31	1,5 ± 0,5
Craie de Picardie	M-CPI	34,9 ± 0,8	32,3 ± 4,1	1,1 ± 0,2	31,2 ± 4,3	0,43 ± 0,02	1,4 ± 0,4

Tabl. 4 – Paramètres quantitatifs décrivant le milieu poreux des pierres étudiées.

La porosité totale (N_t) des 18 échantillons est comprise entre 15,1 % pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) et 49,7 % pour le tuffeau de Touraine (échantillon M-TUF-1) :

- 3 échantillons ont une porosité totale inférieure à 20 % ;
- 6 échantillons ont une porosité totale comprise entre 20 et 30 % ;
- 6 échantillons ont une porosité totale comprise entre 30 et 40 % ;
- 3 échantillons ont une porosité totale supérieure à 40 %.

A l'exception de l'échantillon C-MAX-C, qui présente une microporosité (N_μ) voisine de sa macroporosité (N_M), les faciès étudiés sont nettement microporeux (N_μ >> N_M).

En terme de rayon moyen d'accès de pore (R_{Hg}), les 2 échantillons C-MAX-C et C-SAV sont les plus grossiers avec un rayon moyen d'accès de pore d'environ 18 μm. A l'inverse, les échantillons M-BAF-2 et C-SPA-2 sont les plus fins avec un rayon moyen d'accès de pore d'environ 0,05 μm, soit 360 fois moins.

La surface spécifique déduite de l'essai de porosimétrie mercure (S_{Hg}) de 16 des 18 échantillons n'est pas très discriminante et comprise entre 0,8 et 2,3 m²/g. Seuls les 2 échantillons de tuffeau de Touraine présentent une surface spécifique élevée (14,6 et 22,2 m²/g), essentiellement liée à la présence de smectites (D. Dessandier, 1995).

4.3. PROPRIÉTÉS DE STOCKAGE DES FLUIDES

4.3.1. Mesure de la porosité à 48 h et du coefficient d'absorption d'eau

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

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

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

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

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

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

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

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

$$S_{48} = (N_{48} / N_t)$$

Le coefficient d'absorption d'eau d'une roche à la pression atmosphérique, donne une bonne estimation de la saturation maximale atteinte en milieu naturel, que les apports hydriques soient d'origine pluviale, ou proviennent de ruissellement ou de remontées capillaires (M. Mamillan, 1984).

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

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

4.3.2. Résultats

Les paramètres liés aux propriétés de stockage des fluides (porosité à 48 h N_{48} et coefficient d'absorption d'eau S_{48}) de chacune des 18 pierres échantillonnées sont présentés dans le tableau 5.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	N_{48} (%)	S_{48}
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1	10,9 ± 0,8	0,63 ± 0,05
	M-BAF-2	12,4 ± 0,8	0,57 ± 0,05
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1	13,4 ± 2,1	0,53 ± 0,03
	C-SPA-2	7,5 ± 0,6	0,50 ± 0,01
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B	24,6 ± 1,4	0,73 ± 0,05
	C-RIC-J	23,7 ± 0,6	0,78 ± 0,01
<i>Tuffeau de Touraine</i>	M-TUF-1	42,6 ± 0,6	0,86 ± 0,01
	M-TUF-2	40,4 ± 0,4	0,87 ± 0,01
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	12,5 ± 0,4	0,56 ± 0,01
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	10,5 ± 0,3	0,62 ± 0,01
<i>Calcaire de Saint-Leu</i>	C-SLE	21,9 ± 0,6	0,71 ± 0,01
	M-SLE	17,6 ± 1,4	0,61 ± 0,03
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C	30,4 ± 1,4	0,76 ± 0,01
	C-MAX-D	21,2 ± 1,9	0,74 ± 0,01
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	15,7 ± 0,4	0,40 ± 0,02
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1	22,2 ± 0,2	0,90 ± 0,01
	C-MIG-2	26,1 ± 2,6	0,90 ± 0,01
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	26,3 ± 0,8	0,75 ± 0,01

Tabl. 5 – Paramètres liés aux propriétés de stockage des fluides des pierres étudiées.

La **porosité à 48 h** (N_{48}) (qui correspond au volume poreux maximum accessible à l'eau à pression atmosphérique) des 18 échantillons est comprise entre 7,5 % pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) et 42,6 % pour le tuffeau de Touraine (échantillon M-TUF-1) :

- 3 échantillons ont une porosité à 48 h inférieure à 20 % ;
- 6 échantillons ont une porosité à 48 h comprise entre 20 et 30 % ;
- 6 échantillons ont une porosité à 48 h comprise entre 30 et 40 % ;
- 3 échantillons ont une porosité à 48 h supérieure à 40 %.

Le **coefficient d'absorption d'eau** (S_{48}) (qui témoigne de la fraction de pores accessible à l'eau à pression atmosphérique) des 18 échantillons est compris entre 0,40 (pierre de Savonnières) et 0,90 (pierre de Migné) :

- 1 échantillon présente un coefficient d'absorption d'eau S_{48} inférieur à 0,50 ;
- 7 échantillons ont un coefficient d'absorption d'eau S_{48} compris entre 0,50 et 0,65 ;
- 6 échantillons ont un coefficient d'absorption d'eau S_{48} compris entre 0,65 et 0,80 ;
- 4 échantillons (correspondant aux 2 faciès tuffeau de Touraine et pierre de Migné) ont un coefficient d'absorption d'eau S_{48} supérieur à 0,80.

4.4. PROPRIÉTÉS DE TRANSFERT DES FLUIDES

Les propriétés de transfert d'eau des pierres sont appréciées en mesurant leur **cinétique d'imbibition capillaire**, et les propriétés de transfert d'air, par la mesure de leur **cinétique d'évaporation** (J. D. Mertz, 1989).

4.4.1. Mesure de la cinétique d'imbibition capillaire

La vitesse de saturation d'une pierre soumise à une alimentation capillaire en eau est d'une *importance primordiale* puisqu'elle représente un indicateur potentiel du degré d'échange et de réaction entre la phase liquide absorbée et la phase minérale constitutive de la pierre.

D'un point de vue expérimental, la **mesure de cinétique d'imbibition capillaire** consiste à suivre le **degré de saturation** (volume d'eau remplissant les espace poreux) en fonction du temps, d'une pierre maintenue dans une atmosphère à humidité relative contrôlée.

Les résultats se présentent alors sous forme d'une courbe de prise d'eau en masse par unité de surface dW/S (en g/cm^2) en fonction de la racine carrée du temps \sqrt{t} (en mn), sensiblement linéaire et de la forme $dW/S = C\sqrt{t}$, en début d'expérience.

Ce segment correspond à l'imbibition capillaire proprement dite (D. Jeannette, 1994). C est le **coefficient de capillarité**, représentatif de la prise d'eau en masse ($g/cm^2.mn^{1/2}$), déterminé par la pente de ce segment.

La valeur expérimentale du coefficient de capillarité C est influencée par différentes caractéristiques intrinsèques de la pierre dont la taille des pores, la taille des interconnexions de pores, les états de surface des minéraux (rugosité...).

Outre la détermination du coefficient de capillarité d'une pierre, la connaissance des courbes d'imbibition capillaire permet :

- d'apprécier l'homogénéité du milieu poreux par l'analyse de la morphologie des courbes cinétiques ;
- d'estimer l'homogénéité des transferts entre une pierre et un mortier d'appareillage, ou entre deux pierres voisines (cas d'une substitution) ;
- d'évaluer l'efficacité et la durabilité de produits de traitement superficiel (hydrofugation).

En pratique, la mesure de cinétique d'imbibition capillaire de chaque pierre est réalisée suivant la norme NF B 10-502 « Produits de carrières - Pierres calcaires - Mesure de l'absorption d'eau par capillarité » d'août 1973 et ce, parallèlement (coefficient de capillarité noté C_1) et perpendiculairement au lit de la roche (coefficient de capillarité noté C_2).

4.4.2. Mesure de la cinétique d'évaporation

L'évaporation correspond au passage de molécules d'eau de la phase liquide à la phase vapeur. Ce phénomène est fonction de paramètres externes (température, humidité relative, agitation de l'air), mais aussi dans une pierre, de certaines propriétés internes de la roche, qui contrôlent le déplacement de l'eau liquide dans son milieu poreux.

D'un point de vue expérimental, la **mesure de cinétique d'évaporation** consiste à suivre la **perte de masse en fonction du temps** (C. Hammecker, 1993) d'une pierre partiellement ou totalement saturée en eau et maintenue dans une atmosphère à humidité relative contrôlée.

Les résultats se présentent alors sous forme d'une courbe de perte de masse (d'eau) par unité de surface dW/S (g/cm^2) et/ou d'une courbe degré de saturation en eau S (%) en fonction du temps t (h). Le degré de saturation en eau d'une pierre est défini comme :

$$S(\%) = (V_w / V_{\text{pore}}) \times 100$$

avec : V_w : volume d'eau contenu dans l'échantillon
 V_{pore} : volume total de pore.

Une courbe expérimentale d'évaporation se décompose généralement en deux parties correspondant à **deux régimes d'évaporation** successifs :

- dans une première période, le flux d'évaporation est important et constant en fonction du temps. Il correspond à une évaporation de l'eau à la surface de la pierre, le transfert de l'eau liquide vers la surface étant assuré tant que l'alimentation capillaire de la surface compense la perte par évaporation. Il y a donc continuité hydraulique entre la surface mouillée et l'intérieur de l'échantillon. La désaturation est essentiellement gouvernée par les conditions externes (humidité relative ambiante, température, vitesse du vent...);
- à partir d'un certain stade de désaturation (correspondant à la saturation critique de la pierre S_c), on observe une diminution progressive dans le temps du flux d'évaporation témoignant d'un changement de régime. La continuité hydraulique dans le milieu poreux de la roche est rompue et le transfert d'eau par capillarité n'est plus assuré. La surface extérieure de la roche est sèche, et l'évaporation s'effectue dans le milieu poreux, par diffusion de la vapeur d'eau (J. F. Pearse et *al.*, 1949, *in* C. Hammecker, 1993). Au cours de cette seconde période, le flux de vapeur d'eau faible est en grande partie contrôlé par la structure de la pierre (D. Jeannette, 1994) : le réseau poreux constitue un milieu presque confiné, avec un gradient d'humidité faible ; la tortuosité du réseau augmente les cheminements ; les rétrécissements qui assurent les interconnexions, limitent les échanges.

Deux principaux paramètres sont habituellement extraits de la courbe d'évaporation :

- le flux d'évaporation q_{cl} (exprimé en $g/cm^2.h$) défini comme la valeur absolue de la pente du segment de la phase 1, caractérise la cinétique d'évaporation superficielle par transfert capillaire ;

- la saturation hydrique critique S_c caractérise la qualité de la désaturation par transfert capillaire. Pour une roche donnée, une saturation critique S_c faible, témoigne d'une forte évaporation superficielle et inversement.

La détermination de ces paramètres est très importante en particulier si l'eau qui s'évapore est chargée en sels, car ils permettent de prédire les sites potentiels (en surface ou en profondeur) de cristallisations salines.

En pratique, deux séries de mesures de cinétique d'évaporation sont réalisées en parallèle sur des échantillons de pierres présentant des degrés de saturation initiale différents :

- saturation initiale totale (obtenue par imbibition d'eau sous vide : $S_{initial} = 100\%$) ;
- saturation initiale partielle (obtenue par imbibition d'eau sous pression atmosphérique : $S_{initial} = S_{48}$).

4.4.3. Résultats

Les paramètres liés aux propriétés de transfert des fluides (cinétique d'imbibition capillaire et cinétique d'évaporation) de chacune des 18 pierres échantillonnées sont présentés dans le tableau 6.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	C_1 (g/cm ² .mn ^{1/2})	C_2 (g/cm ² .mn ^{1/2})	Q_{csat} (g/cm ² .h) x10 ⁻³	S_{csat} (%)	Q_{c48} (g/cm ² .h) x10 ⁻³	S_{c48} (%)
Banc Franc de Paris	M-BAF-1	1,3 ± 0,2	1,2 ± 0,3	1,91 ± 0,04	45,0 ± 5,0	1,43 ± 0,02	38,4 ± 2,5
	M-BAF-2	1,5 ± 0,5	0,9 ± 0,3	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Pierre de Sains Pierre Aigle	C-SPA-1	2,4 ± 0,9	2,3 ± 0,5	1,88 ± 0,15	31,1 ± 2,1	1,74 ± 0,03	29,7 ± 0,7
	C-SPA-2	0,7 ± 0,1	0,6 ± 0,4	1,71 ± 0,60	45,0 ± 8,2	1,06 ± 0,16	37,3 ± 1,1
Pierre de Richemont	C-RIC-B	13,9 ± 2,8	11,6 ± 1,1	2,10 ± 0,20	15,3 ± 0,5	1,88 ± 0,06	17,3 ± 2,0
	C-RIC-J	13,1 ± 1,2	11,0 ± 1,9	1,65 ± 0,10	15,9 ± 1,2	1,49 ± 0,05	18,4 ± 0,9
Tuffeau de Touraine	M-TUF-1	42,7 ± 2,4	29,6 ± 5,0	2,02 ± 0,03	24,6 ± 1,0	1,87 ± 0,01	23,2 ± 0,8
	M-TUF-2	21,7 ± 1,6	19,6 ± 2,6	1,75 ± 0,19	23,8 ± 1,4	1,86 ± 0,01	25,3 ± 2,1
Pierre de Jaumont	C-JAU	2,6 ± 0,2	1,9 ± 0,2	1,37 ± 0,07	29,2 ± 1,6	1,39 ± 0,11	30,0 ± 1,1
Pierre de Rouffach	C-ROU	2,9 ± 0,4	2,8 ± 0,3	1,49 ± 0,08	33,4 ± 0,9	1,20 ± 0,05	39,1 ± 1,3
Calcaire de Saint-Leu	C-SLE	11,3 ± 0,4	11,0 ± 0,9	2,28 ± 0,24	20,7 ± 0,7	2,16 ± 0,21	21,9 ± 0,5
	M-SLE	6,2 ± 1,6	2,6 ± 0,4	1,53 ± 0,06	35,9 ± 0,3	1,62 ± 0,01	31,2 ± 0,1
Pierre de Saint-Maximin	C-MAX-C	56,2 ± 6,9	30,9 ± 5,0	1,88 ± 0,13	12,6 ± 0,5	1,76 ± 0,06	11,7 ± 1,0
	C-MAX-D	10,5 ± 2,3	9,9 ± 0,8	2,08 ± 0,06	17,3 ± 0,6	1,89 ± 0,15	19,0 ± 1,6
Pierre de Savonnières	C-SAV	6,4 ± 0,6	2,8 ± 0,3	1,98 ± 0,19	16,2 ± 0,8	1,47 ± 0,13	14,1 ± 3,9
Pierre de Migné	C-MIG-1	16,2 ± 2,0	14,6 ± 1,8	1,54 ± 0,11	28,8 ± 0,2	1,49 ± 0,11	30,1 ± 2,2
	C-MIG-2	22,7 ± 4,3	25,3 ± 1,8	1,77 ± 0,15	21,4 ± 0,3	1,90 ± 0,22	21,2 ± 3,6
Craie de Picardie	M-CPI	15,4 ± 0,5	6,4 ± 0,4	0,98 ± 0,03	36,2 ± 0,5	0,66 ± 0,04	35,3 ± 1,2

Tabl. 6 – Paramètres liés aux propriétés de transfert des fluides des pierres étudiées (n.d. = non déterminable).

Le **coefficient de capillarité mesuré suivant le lit de la roche** (C_1) des 18 échantillons est compris entre $0,7 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$ pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) et $56,2 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$ pour la pierre de Saint-Maximin (échantillon C-MAX-C) :

- 8 échantillons ont un coefficient (C_1) inférieur à $10 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$;
- 6 échantillons ont un coefficient (C_1) compris entre 10 et $20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$;
- 4 échantillons ont un coefficient (C_1) supérieur à $20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$.

Le **coefficient de capillarité mesuré perpendiculairement au lit de la roche** (C_2) des 18 échantillons est compris entre $0,6 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$ pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) et $30,9 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$ pour la pierre de Saint-Maximin (échantillon C-MAX-C) :

- 10 échantillons ont un coefficient (C_1) inférieur à $10 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$;
- 5 échantillons ont un coefficient (C_1) compris entre 10 et $20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$;
- 3 échantillons ont un coefficient (C_1) supérieur à $20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{mn}^{1/2}$.

Sur les 18 échantillons, les types M-BAF-2, M-SLE, C-MAX-C, C-SAV et M-CPI sont les plus anisotropes du point de vue de la cinétique d'imbibition capillaire, avec un coefficient de capillarité (C_2) au moins 50 % plus faible que (C_1).

De manière générale, les coefficients capillaires (C_1) et (C_2) sont très discriminants, pour la série de 18 échantillons caractérisés.

Concernant les **paramètres déduits des mesures de cinétique d'évaporation**, les flux d'évaporation sur échantillons saturés (Q_{csat}) sont compris entre $0,98 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ pour la craie de Picardie (échantillon M-CPI) et $2,28 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ pour la pierre de Saint-Leu (échantillon C-SLE). Ils sont supérieurs ou voisins des flux d'évaporation sur échantillons imbibés 48 h (Q_{ct48}), compris entre $0,66 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ pour la craie de Picardie (échantillon M-CPI) et $2,16 \cdot 10^{-3} \text{ g/cm}^2 \cdot \text{h}$ pour la pierre de Saint-Leu (échantillon C-SLE).

Les degrés de saturation (en fin de phase d'évaporation par transfert capillaire) sur échantillons saturés (S_{csat}) sont compris entre 12,6 % pour la pierre de Saint-Maximin (échantillon C-MAX-C) et 45 % pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2). Ils sont très voisins des degrés de saturation sur échantillons imbibés 48 h (S_{c48}), compris entre 11,7 % pour la pierre de Saint-Maximin (échantillon C-MAX-C) et 37 % pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2).

4.5. RÉSISTANCE MÉCANIQUE

4.5.1. Mesure de la résistance à la compression uniaxiale

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

- **la nature de ses minéraux constitutifs** (minéraux argileux en particulier) et à leurs caractéristiques mécaniques spécifiques. Cette influence n'est pas toujours quantifiable à l'échelle de l'échantillon de laboratoire car aux caractéristiques des minéraux, viennent se superposer leur texture d'agrégat et leurs discontinuités (pores, fissures...);
- **la texture d'agrégat**, c'est-à-dire les dimensions absolues et relatives de ses minéraux, leur mode d'arrangement et leur énergie de liaison (importance et qualité des joints intergranulaires qui représente un lieu de concentration des forces), ainsi : l'augmentation de la taille moyenne des minéraux fait diminuer la résistance à la compression (M. Chaye d'Albissin et C. Tourencq, 1976), en particulier dans les roches calcaires ; plus le degré de cimentation d'une roche est élevé, plus sa résistance mécanique est importante, sous réserve que les caractéristiques mécaniques du ciment (granularité, forme et degré d'assemblage des grains) soient du même ordre de grandeur que celles des grains ;
- **la fréquence et le type des discontinuités** (pores et/ou fissures) : ces paramètres influent fortement sur l'énergie de liaison des minéraux et donc sur les caractéristiques physiques et mécaniques de l'agrégat. Dans les roches calcaires carbonatées, la diminution de la porosité, consécutive à un processus de cimentation tend à favoriser une meilleure continuité du ciment de la roche, par augmentation de la surface de contact entre constituants, améliorant la résistance mécanique ;
- **le degré de saturation** : les mesures sont généralement réalisées sur éprouvettes sèches, mais peuvent également être effectuées sur éprouvettes partiellement ou totalement saturées. La présence d'eau dans les discontinuités (fissures et/ou pores) de la roche, conduit à une réduction de la résistance mécanique, expliquée essentiellement par : une diminution de l'énergie de liaison des grains constitutifs et une modification des liens intergranulaires par une mise en pression de l'eau dans les pores non drainés. Cette réduction est également liée à la composition minéralogique de la roche, en particulier si celle-ci contient des minéraux argileux.

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

En pratique, la mesure de résistance à la compression de chaque pierre est réalisée suivant la norme NF B 10-509 « Produits de carrières - Pierres calcaires - Essai de compression » d'août 1973. Une première série de mesures est réalisée sur échantillons secs (résistance notée R_c) et une seconde série sur éprouvettes saturées par immersion 48 h (résistance notée R_{c48}), afin de s'approcher des conditions naturelles de saturation maximum.

4.5.2. Résultats

Les valeurs de résistance à la compression uniaxiale (sur échantillon sec R_c et sur échantillon imbibé à pression atmosphérique R_{c48}) de chacune des 18 pierres échantillonnées sont présentées dans le tableau 7.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	R _c (Mpa)	R _{c48} (Mpa)
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1	40,0 ± 6,1	31,1 ± 5,1
	M-BAF-2	19,6 ± 1,2	12,9 ± 0,3
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1	26,8 ± 1,7	22,2 ± 4,9
	C-SPA-2	52,6 ± 6,6	40,3 ± 7,5
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B	13,5 ± 2,6	10,4 ± 1,3
	C-RIC-J	14,9 ± 0,9	13,5 ± 4,2
<i>Tuffeau de Touraine</i>	M-TUF-1	9,7 ± 0,8	5,9 ± 0,7
	M-TUF-2	10,7 ± 0,9	5,7 ± 1,0
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	22,1 ± 1,8	16,7 ± 2,3
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	32,2 ± 4,5	25,7 ± 1,2
<i>Calcaire de Saint-Leu</i>	C-SLE	17,2 ± 2,9	11,0 ± 1,3
	M-SLE	12,4 ± 1,8	12,3 ± 1,5
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C	5,1 ± 0,5	3,9 ± 0,2
	C-MAX-D	17,2 ± 5,6	12,7 ± 0,4
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	8,7 ± 1,4	7,5 ± 1,5
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1	20,6 ± 3,1	13,6 ± 2,6
	C-MIG-2	15,4 ± 2,5	11,2 ± 1,4
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	7,7 ± 0,8	4,5 ± 0,3

Tabl. 7 – Résistance à la compression uniaxiale des pierres étudiées.

La résistance à la compression uniaxiale (R_c) des 18 échantillons est comprise entre 52,6 MPa pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) et 5,1 pour la pierre de Saint-Maximin (échantillon C-MAX-C) :

- 4 échantillons ont une résistance mécanique (R_c) inférieure à 10 Mpa ;
- 10 échantillons ont une résistance mécanique (R_c) comprise entre 10 et 25 Mpa ;
- 4 échantillons ont une résistance mécanique (R_c) supérieure à 25 Mpa.

La résistance à la compression uniaxiale sur échantillons imbibés à 48 h (R_{c48}) est comprise entre 40,3 MPa pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) et 3,9 pour la pierre de Saint-Maximin (échantillon C-MAX-C) :

- 5 échantillons ont une résistance mécanique (R_{c48}) inférieure à 10 Mpa ;
- 10 échantillons ont une résistance mécanique (R_{c48}) comprise entre 10 et 25 Mpa ;
- 3 échantillons ont une résistance mécanique (R_{c48}) supérieure à 25 Mpa.

La perte de résistance mécanique entre échantillons secs et échantillons saturés à 48 h est en moyenne de 30 %, et avoisine même 50 % dans le cas du tuffeau de Touraine.

Ces valeurs de résistances mécaniques à la compression classent la majorité des 18 échantillons dans les pierres très tendres à tendres (cf. tabl. 8).

R_c (MPa)	Roche
< 1	extrêmement tendre (sol)
1 - 5	très tendre
5 - 25	tendre
25 - 50	moyennement résistante
50 - 100	résistante
100 - 250	très résistante
< 250	extrêmement résistante

Tabl. 8 – Classification I.S.R.M. des roches basée sur la résistance à la compression uniaxiale (L. Dobereiner et M.H. De Freitas, 1986).

D'un point de vue général, les roches tendres sont caractérisées par une déformabilité plus élevée que celle des roches compactes, et une forte variation de la résistance avec le degré de saturation.

4.6. COMPORTEMENT EN PRÉSENCE D'EAU

4.6.1. Mesure de la capacité d'adsorption au bleu de méthylène

Le comportement d'une pierre en présence d'eau peut être appréhendé en mesurant sa capacité d'adsorption de bleu de méthylène, qui témoigne de l'activité des argiles contenues.

En pratique, la mesure est réalisée suivant la norme NF P 94-068 sur environ 50 g de roche broyée et homogénéisée, en utilisant une solution de bleu de méthylène à 3,74 g/l, et permet de déterminer une valeur de bleu (V_{bleu}) exprimée en mg de bleu de méthylène adsorbé par gramme d'échantillon (mg/g).

4.6.2. Résultats

La capacité d'adsorption de bleu de méthylène (valeur de bleu V_{bleu}) de chacune des 18 pierres échantillonnées est présentée dans le tableau 9.

La **valeur de bleu de méthylène** (V_{bleu}) des 18 échantillons est comprise entre 0,4 mg/g pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) et 20,5 pour le tuffeau de Touraine (échantillon M-TUF-2). A l'exception du tuffeau, les valeurs sont relativement faibles (11 échantillons ont une valeur de bleu inférieure à 2 mg/g) et peu discriminantes.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	V _{bleu} (mg/g)
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1	2,2 ± 0,0
	M-BAF-2	3,5 ± 0,2
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1	0,7 ± 0,1
	C-SPA-2	0,4 ± 0,1
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B	1,0 ± 0,1
	C-RIC-J	1,8 ± 0,0
<i>Tuffeau de Touraine</i>	M-TUF-1	20,5 ± 1,1
	M-TUF-2	17,4 ± 1,8
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	1,6 ± 0,0
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	2,1 ± 0,1
<i>Calcaire de Saint-Leu</i>	C-SLE	1,5 ± 0,2
	M-SLE	2,4 ± 0,5
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C	0,5 ± 0,0
	C-MAX-D	0,5 ± 0,1
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	1,4 ± 0,1
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1	0,5 ± 0,1
	C-MIG-2	0,7 ± 0,1
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	2,5 ± 0,1

Tabl. 9 – Capacité d'adsorption de bleu de méthylène des pierres étudiées.

4.7. ANALYSE STATISTIQUE DES RÉSULTATS

Nous nous proposons de compléter l'étude des pierres en laboratoire, par une synthèse des résultats expérimentaux obtenus sur les 18 échantillons, fondée sur l'Analyse factorielle en Composantes Principales (ACP), méthode statistique classique de tri de variables.

4.7.1. Principe de l'ACP

L'Analyse factorielle en Composantes Principales (ACP) permet de réduire le nombre de variables (= paramètres mesurés) nécessaires à la description des observations (= échantillons), en minimisant la perte d'information, c'est-à-dire en conservant une représentativité acceptable (L. Lebart et *al.*, 1979).

Dans certains cas favorables, la méthode est assez discriminante pour permettre un classement des observations (échantillons).

4.7.2. Règles d'interprétation

Les variables sont positionnées sur une hypersphère de rayon unité, centrée sur le barycentre des observations, de dimension (n) égale au nombre de grandeurs prises en compte.

Leurs coordonnées sont telles que la valeur du produit scalaire des vecteurs joignant l'origine à deux points-variables est le coefficient de corrélation entre ces variables.

L'interprétation des positions des projections de variables entre elles ou par rapport aux axes factoriels se fait en terme de dépendance (corrélation), dans des disques diamètres relatifs à des plans factoriels donnés (généralement les plus explicatifs) selon les règles suivantes (cf. fig. 1) :

- dans un plan factoriel donné, une variable est d'autant mieux expliquée que sa représentation est proche du cercle (A), d'autant moins bien expliquée qu'elle est proche du centre (B) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations sont proches l'une de l'autre sont en relation normale (A et C) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations se déduisent l'une de l'autre par une symétrie par rapport à l'origine sont en relation inverse (A et D) ;
- deux variables bien expliquées dont les représentations se déduisent l'une de l'autre par une rotation de 90° sont indépendantes (A et E) ;
- l'analyse de la position des groupes de variables par rapport aux axes factoriels permet d'attribuer un sens physique aux facteurs.

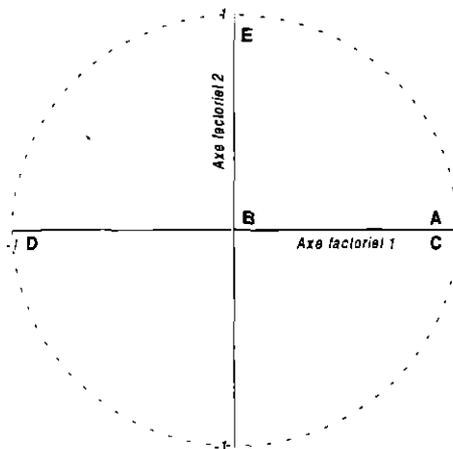


Fig. 1 – Positions remarquables des points représentatifs des variables dans un disque de corrélation.

Lorsque le sens physique des axes factoriels peut être déterminé, il est possible de caractériser la position des observations. Deux observations occupent alors des positions d'autant plus proches qu'elles se ressemblent.

4.7.3. Application de l'ACP aux 18 échantillons

a) Paramètres expérimentaux traités

L'analyse statistique (détermination de la matrice des corrélations et analyse en composantes principales) a été réalisée au moyen du logiciel GDM® (Gestion des Données Minières), sur la totalité des 21 paramètres expérimentaux présentés dans le tableau 10.

	Paramètres expérimentaux	Symbole	Unité
1	Proportion de calcite	CAL	%
2	Proportion de quartz	QTZ	%
3	Proportion d'argiles micacées	MIC	%
4	Proportion de smectites	SME	%
5	Porosité totale	N _t	%
6	Valeur de bleu de méthylène	V _{bleu}	mg/g
7	Porosité accessible au mercure	N _{Hg}	%
8	Macroporosité	N _M	%
9	Microporosité	N _μ	%
10	Surface spécifique déduite de l'essai porosimétrique	S _{Hg}	m ² /g
11	Rayon moyen d'accès de pore déduit de l'essai porosimétrique	R _{Hg}	μm
12	Porosité à 48 heures	N ₄₈	%
13	Coefficient d'absorption d'eau	S ₄₈	%
14	Coefficient de capillarité // au lit de la roche	C ₁	g/cm ² .√mn
15	Coefficient de capillarité ⊥ au lit de la roche	C ₂	g/cm ² .√mn
16	Résistance à la compression uniaxiale sur échantillon sec	R _c	MPa
17	Résistance à la compression uniaxiale sur échantillon imbibé à 48 heures	R _{c48}	MPa
18	Flux d'évaporation par transfert capillaire sur échantillon saturé	Q _{ct}	g/cm ² .h
19	Flux d'évaporation par transfert capillaire sur échantillon imbibé à 48 heures	Q _{ct48}	g/cm ² .h
20	Degré de saturation hydrique critique sur échantillon saturé	S _c	%
21	Degré de saturation hydrique critique sur échantillon imbibé à 48 heures	S _{c48}	%

Tabl. 10 – Paramètres expérimentaux traités.

b) Matrice des corrélations

La matrice des corrélations entre paramètres expérimentaux est présentée dans la figure 2.

CAL	1.00																				
Vbleu	-0.93	1.00																			
Nt	-0.54	0.63	1.00																		
N48	-0.63	0.70	0.87	1.00																	
S48	-0.35	0.38	0.44	0.75	1.00																
NHg	-0.50	0.60	0.93	0.91	0.60	1.00															
SHg	-0.93	0.95	0.64	0.70	0.39	0.59	1.00														
C1	-0.40	0.40	0.71	0.78	0.61	0.69	0.46	1.00													
C2	-0.44	0.45	0.68	0.83	0.76	0.73	0.51	0.91	1.00												
NM	0.08	-0.13	0.33	0.11	-0.17	0.22	-0.11	0.54	0.32	1.00											
Nμ	-0.54	0.66	0.80	0.86	0.68	0.88	0.64	0.47	0.60	-0.19	1.00										
RHg	-0.01	-0.05	0.37	0.10	-0.22	0.27	-0.04	0.41	0.24	0.89	-0.11	1.00									
Rc	0.15	-0.27	-0.79	-0.68	-0.41	-0.83	-0.24	-0.57	-0.53	-0.36	-0.68	-0.36	1.00								
Rc48	0.20	-0.32	-0.80	-0.72	-0.46	-0.86	-0.29	-0.59	-0.57	-0.32	-0.73	-0.31	0.96	1.00							
Qct	-0.16	0.09	0.31	0.23	0.10	0.27	0.18	0.25	0.34	0.18	0.19	0.28	-0.03	-0.01	1.00						
Qct48	-0.24	0.21	0.43	0.45	0.37	0.48	0.27	0.38	0.53	0.11	0.43	0.15	-0.31	-0.31	0.81	1.00					
Sc	-0.01	-0.04	-0.61	-0.50	-0.32	-0.65	-0.06	-0.51	-0.56	-0.44	-0.47	-0.50	0.70	0.69	-0.43	-0.58	1.00				
Sc48	-0.03	-0.01	-0.62	-0.44	-0.19	-0.61	-0.04	-0.51	-0.51	-0.56	-0.37	-0.58	0.70	0.65	-0.42	-0.61	0.22	1.00			
SME	-0.74	0.81	0.70	0.70	0.37	0.66	0.79	0.35	0.36	-0.17	0.73	-0.11	-0.42	-0.50	0.01	0.13	-0.16	-0.12	1.00		
QTZ	-0.67	0.48	-0.02	0.06	0.01	-0.03	0.48	0.07	0.05	0.01	-0.04	0.13	0.23	0.22	0.11	0.06	0.29	0.26	0.24	1.00	
MIC	-0.35	0.22	0.37	0.36	0.22	0.37	0.26	0.48	0.42	0.38	0.21	0.35	-0.35	-0.35	0.22	0.36	-0.25	-0.40	0.22	0.32	1.00
	CAL	Vbleu	Nt	N48	S48	NHg	SHg	C1	C2	NM	Nμ	RHg	Rc	Rc48	Qct	Qct48	Sc	Sc48	SME	QTZ	MIC

Fig. 2 – Matrice des corrélations entre les 21 paramètres expérimentaux mesurés sur les 18 échantillons de pierres (les coefficients de corrélations dont la valeur absolue est supérieure à 0,75 sont notés en caractères gras)

c) Résultats de l'ACP

Les 2 principaux axes factoriels (axes 1 et 2) expliquent respectivement 47 et 19 % de la variance totale du système.

La projection des 21 paramètres expérimentaux, dans le plan factoriel défini par les axes 1 et 2 (cf. fig. 3) met en évidence :

- les corrélations entre les paramètres expérimentaux (expression graphique de la matrice des corrélations) ;
- la contribution de chaque variable à l'explication des deux axes factoriels principaux.

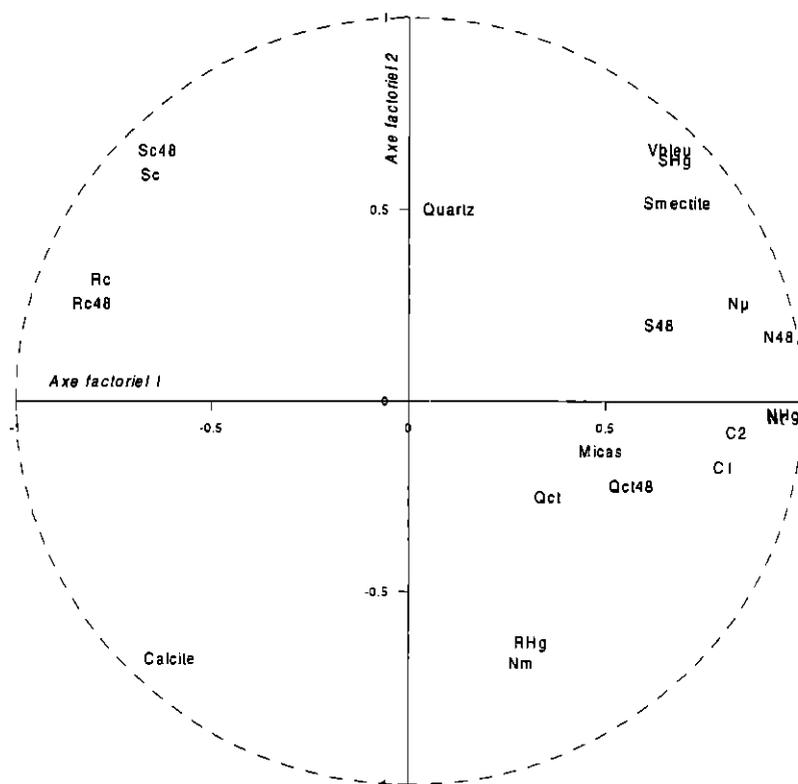


Fig. 3 – Projection des 25 paramètres expérimentaux mesurés sur les 18 échantillons, selon les 2 premiers axes factoriels.

• Interprétation de l'axe 1

Ce premier axe traduit très largement le couple résistance mécanique/porosité :

- à son extrémité est, il porte principalement la porosité (totale N_t , au mercure N_{Hg} et à 48 h N_{48}), et dans une mesure moindre, la capillarité (C1 et C2) ;
- à son extrémité ouest, il regroupe les paramètres anticorrélés à la porosité, c'est-à-dire principalement les résistances à la compression uniaxiale R_c et R_{c48} .

• Interprétation de l'axe 2

Contrairement à l'axe 1, il est plus difficile de donner un sens physique à l'axe 2 :

- à son extrémité nord, il porte les paramètres fortement liés à la présence d'argiles (valeur de bleu V_{bleu} , proportion de smectites, surface spécifique S_{Hg}) ainsi que les degrés de saturation critique S_c et S_{c48} ;
- à son extrémité sud, il regroupe la macroporosité N_M , ainsi que le rayon moyen d'accès de pore R_{Hg} .

Enfin, dans le plan factoriel défini par ces 2 principaux axes, on note le poids plutôt négligeable des proportions minéralogiques sur les autres paramètres.

La projection des 18 échantillons dans le plan factoriel défini par les axes 1 et 2 permet de séparer les échantillons en plusieurs sous-groupes (cf. fig. 4).

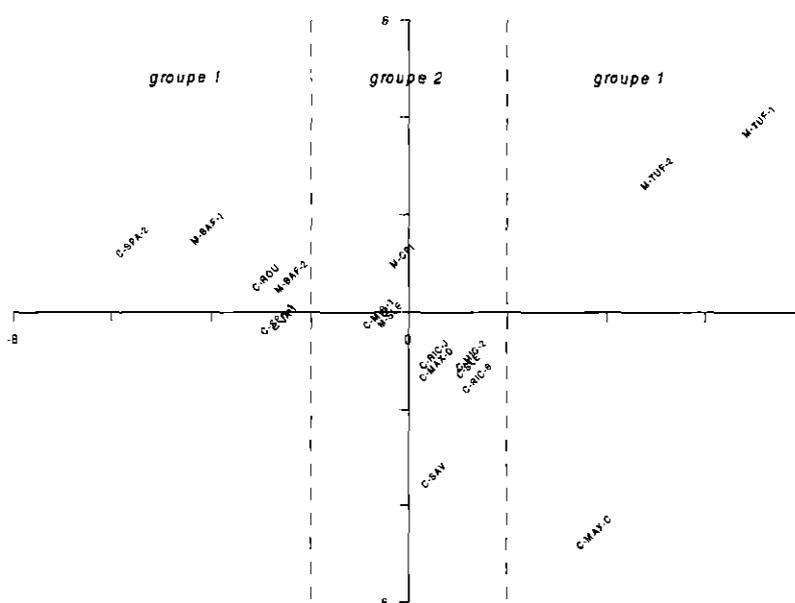


Fig. 4 – Projection des 18 échantillons selon les 2 premiers axes factoriels.

Deux populations d'échantillons (notées groupe 1 et 2) se répartissent le long de l'axe factoriel 1 (E-W) :

- les échantillons appartenant au groupe 1 sont dominés par une anti-corrélation résistance/porosité marquée :
 - . échantillons résistants mécaniquement, à faible porosité tels que M-BAF-1 et 2, C-SPA-1 et 2, C-ROU et C-JAU,
 - . échantillons à faible résistance mécanique, très poreux tels que C-MAC-C, M-TUF-1 et 2 ;

- les échantillons appartenant au groupe 2 ont une résistance variable, mais qui n'est pas une fonction triviale de la seule porosité (9 échantillons restants).

D'une façon moins marquée, certains échantillons se répartissent le long de l'axe factoriel 2 (N-S) :

- les échantillons M-TUF-1 et 2 se différencient nettement des autres et sont dominés par les paramètres témoignant directement ou indirectement de la présence d'argiles (valeur de bleu V_{bleu} , proportion de smectites et surface spécifique S_{Hg} , élevées) ;
- les échantillons C-MAX-C et C-SAV se distinguent également des autres et sont dominés par une macroporosité N_{M} et un rayon moyen d'accès de pore R_{Hg} , élevés, ainsi que par des degrés de saturation critique S_c et S_{c48} faibles.

5. Formulation de la durabilité et de la compatibilité des pierres

A partir de la connaissance des mécanismes d'altérations (cf. chap. 2), nous nous proposons dans ce chapitre, d'appréhender les notions de durabilité et de compatibilité par l'étude de certaines caractéristiques intrinsèques des pierres déterminées en laboratoire (cf. chap. 4) et leur comparaison.

5.1. DÉFINITIONS

5.1.1. Durabilité

La durabilité a pour objet de prédire ou quantifier le comportement dans le temps (à l'échelle historique) d'une pierre extraite de son milieu naturel (pierre de construction) et soumise à divers facteurs d'altération (E.M. Winkler, 1994).

5.1.2. Compatibilité

La compatibilité a pour objet de prédire ou quantifier l'interaction dans le temps (à l'échelle historique) de deux pierres juxtaposées sur un édifice (dont l'une est d'origine et l'autre de substitution) et soumises à divers facteurs d'altération. On parlera d'une compatibilité correcte, lorsque aucune altération différentielle ne se manifeste dans le temps entre les deux pierres.

La compatibilité est donc une notion venant se superposer à la durabilité, et qui peut être définie comme une différence de durabilité, soit l'expression générale :

$$\boxed{\text{Compatibilité}(A, B) = \Delta \text{Durabilité}(A, B)} \quad (1)$$

avec : A, B : Pierres juxtaposées de types A et B

5.2. APPROCHE THÉORIQUE DE LA DURABILITÉ

5.2.1. Intégration des facteurs d'altération

Les mécanismes d'altération sont contrôlés par des facteurs internes (FI) et externes (FE) d'altérations (cf. chap. 1). La durabilité d'une pierre peut donc être exprimée d'un

point de vue théorique par l'expression générale suivante :

$$\text{Durabilité} = \text{Fonction}[FI, FE] \quad (2)$$

avec : FI : facteurs internes d'altération
FE : facteurs externes d'altération

Les facteurs internes (FI) d'altération d'une pierre correspondent à ses propriétés intrinsèques (PI) et les facteurs externes (FE) d'altération à ses conditions d'exposition et d'alimentation.

Ces facteurs externes d'altération peuvent être négligés dans le cas d'une expression de la durabilité de pierres soumises aux mêmes conditions d'exposition et d'alimentation.

L'expression générale (2) de la durabilité d'une pierre devient donc :

$$\boxed{\text{Durabilité} = \text{Fonction}[PI]} \quad (3)$$

avec : PI : Propriétés intrinsèques

5.2.2. Identification des propriétés intrinsèques influentes

L'étude générale des mécanismes d'altération des pierres (cf. chap. 1) met en évidence quatre principaux types de propriétés intrinsèques, intervenant à des degrés divers dans le développement des altérations :

a) Comportement des minéraux en présence d'eau

La composition minéralogique d'une pierre donnée va intervenir dans le développement des altérations à travers le comportement de ses minéraux constitutifs en présence d'eau : activité des argiles, en particulier.

b) Propriétés de stockage des fluides

La connaissance du volume poreux total d'une pierre et de son volume poreux accessible à pression atmosphérique permettent d'approcher son degré de saturation maximum en conditions naturelles. On en déduit le volume de pores mobilisable en cas de changement de volume d'un élément (cristallisation de sels, gélifraction...) dans le milieu poreux (rôle de « vase d'expansion »).

c) Propriétés de transfert des fluides

La détermination des vitesses et des modes de saturation en eau (imbibition) et de séchage (évaporation) d'une pierre permettent d'appréhender sa propension à se fatiguer (par une répétition des cycles imbibition/évaporation) et à voir se développer des cristallisations des sels en surface ou en profondeur.

d) Résistance mécanique

La qualité des joints de grains intervient directement dans la réponse d'une pierre aux sollicitations mécaniques générées par les cristallisations de sels et la gélifraction.

L'expression générale (3) de la durabilité théorique d'une pierre devient donc :

$$\boxed{\text{Durabilité} = \text{Fonction}[\text{CM}, \text{SF}, \text{TF}, \text{RM}]}$$
 (4)

avec : CM : Comportement des Minéraux en présence d'eau
 SF : Propriétés de Stockage des Fluides
 TF : Propriétés de Transfert des Fluides
 RM : Résistance Mécanique

5.3. FORMULATION PRATIQUE DE LA DURABILITÉ

L'expression théorique de la durabilité (4) fait état des types de propriétés intrinsèques influant sur la durabilité, mais ne précise pas les paramètres expérimentaux correspondants.

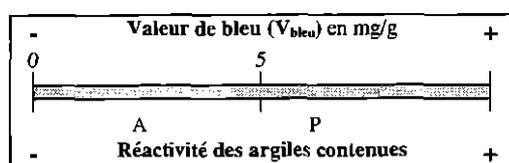
A partir des résultats de l'étude des 18 échantillons de pierres (cf. chap. 3), nous nous proposons maintenant de sélectionner les paramètres expérimentaux (illustrant chaque type de propriété) à prendre en compte, et d'en estimer le poids relatif en leur attribuant des « points de durabilité ».

5.3.1. Intégration des paramètres expérimentaux

a) Comportement des minéraux en présence d'eau

Le comportement des minéraux en présence d'eau, le plus dommageable pour une pierre est le gonflement des argiles. Nous avons vu dans le chapitre 3, que ce comportement pouvait être appréhendé en mesurant la capacité d'adsorption de bleu de méthylène (V_{bleu}), qui témoigne de l'activité des argiles contenue dans la pierre.

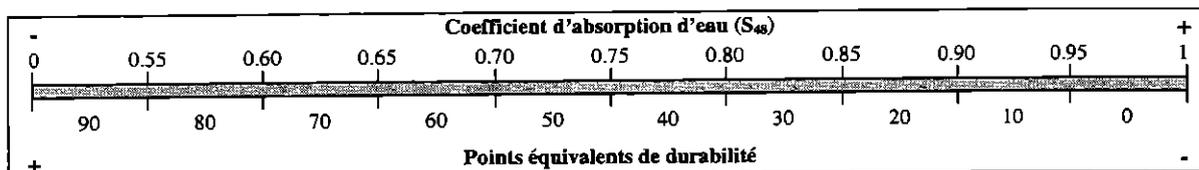
A l'exception des 2 échantillons de tuffeau (M-TUF-1 et M-TUF-2), les valeurs de bleu (V_{bleu}) des 16 autres échantillons sont relativement faibles et peu discriminantes. En terme d'impact sur la durabilité, nous proposons donc d'utiliser l'échelle simplifiée de valeurs de bleu (V_{bleu}) suivante :



A = Absence d'argiles réactives dans la pierre
 P = Présence d'argiles réactives dans la pierre

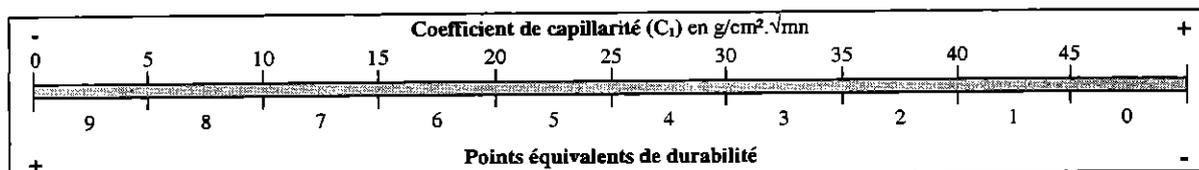
b) Propriétés de stockage des fluides

Le volume de pores mobilisable en cas de changement de volume d'un élément (cristallisation de sels, gélifraction...) dans le milieu poreux (rôle de « vase d'expansion ») peut être apprécié par le coefficient d'absorption d'eau (S_{48}), pour lequel nous proposons l'échelle de valeurs suivante :



c) Propriétés de transfert des fluides

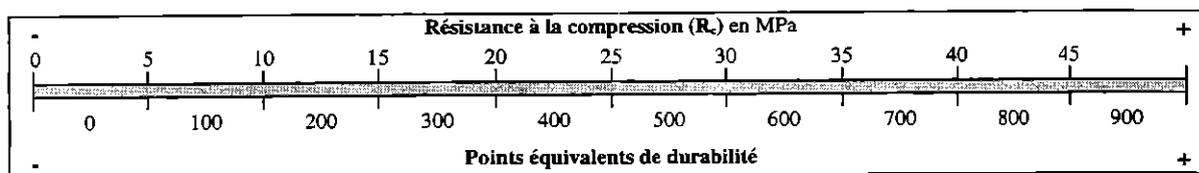
Nous nous proposons d'apprécier les propriétés de transfert des fluides en utilisant le coefficient de capillarité (C_1) et l'échelle de valeurs correspondantes suivante :



d) Résistance mécanique

La qualité des joints de grains qui intervient directement dans la réponse d'une pierre aux sollicitations mécaniques générées par les cristallisations de sels et la gélifraction, peut être appréciée par la résistance à la compression uniaxiale (R_c) :

Nous nous proposons d'utiliser l'échelle de valeurs de résistance mécanique (R_c) suivante :



5.3.2. Fiche pratique d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité des pierres

Dans le paragraphe 5.3.1, nous avons sélectionné les principaux paramètres expérimentaux intervenant dans la durabilité d'une pierre, à savoir :

- valeur de bleu de méthylène (V_{bleu}) ;
- coefficient d'absorption d'eau (S_{48}) ;

- coefficient de capillarité (C_1) ;
- résistance à la compression (R_c).

Parallèlement, nous avons associé à trois d'entre eux, une échelle de valeurs exprimées en « points équivalents de durabilité », témoignant de leur poids relatif dans l'explication de la durabilité globale d'une pierre :

- 0 à 900 points suivant la valeur de résistance à la compression (R_c) ;
- 0 à 90 points suivant la valeur de coefficient d'absorption d'eau (S_{48})
- 0 à 9 points suivant la valeur de coefficient de capillarité (C_1).

Suivant la valeur de bleu de méthylène, les pierres ont été classées en deux catégories :

- A = Absence d'argiles réactives dans la pierre ;
- P = Présence d'argiles réactives dans la pierre.

La fiche d'évaluation suivante (fig. 5) se propose d'assembler sous forme synthétique, l'ensemble de ces éléments d'appréciation de la durabilité afin d'obtenir pour chaque pierre, un indice de la durabilité et de la compatibilité (IDC).

Cet indice de durabilité et de compatibilité (IDC) est obtenu par la conjugaison d'un **nombre** correspondant à la somme des points de durabilité des trois paramètres (R_c), (S_{48}) et (C_1), suivi d'une **lettre** (A ou P).

Il permet un classement complet des pierres les unes par rapport aux autres, depuis **IDC = 000 P** pour les pierres les moins durables et **IDC = 999 A** pour les pierres les plus durables.

Afin d'illustrer son utilisation, la fiche d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité a été appliquée à l'un des 18 échantillons étudiés, à savoir l'échantillon **C-SAV de pierre de Savonnières**. L'indice de durabilité et de compatibilité obtenu est de **198 A** (cf. page suivante).

Inversement, la connaissance de l'indice de durabilité et de compatibilité d'une pierre donnée permet d'en apprécier directement les caractéristiques.

Par exemple **IDC = 857 A** témoigne d'une pierre de résistance à la compression élevée, de coefficient d'absorption d'eau moyen, de coefficient de capillarité assez faible et ne renfermant pas d'argiles réactives.

De même, l'appréciation de la compatibilité entre deux pierres est rendue très aisée par une simple comparaison de leur IDC respectif.

A noter que les valeurs d'IDC ne doivent être interprétées que de manière comparative, car IDC n'est qu'un indice relatif et pas un indice absolu.

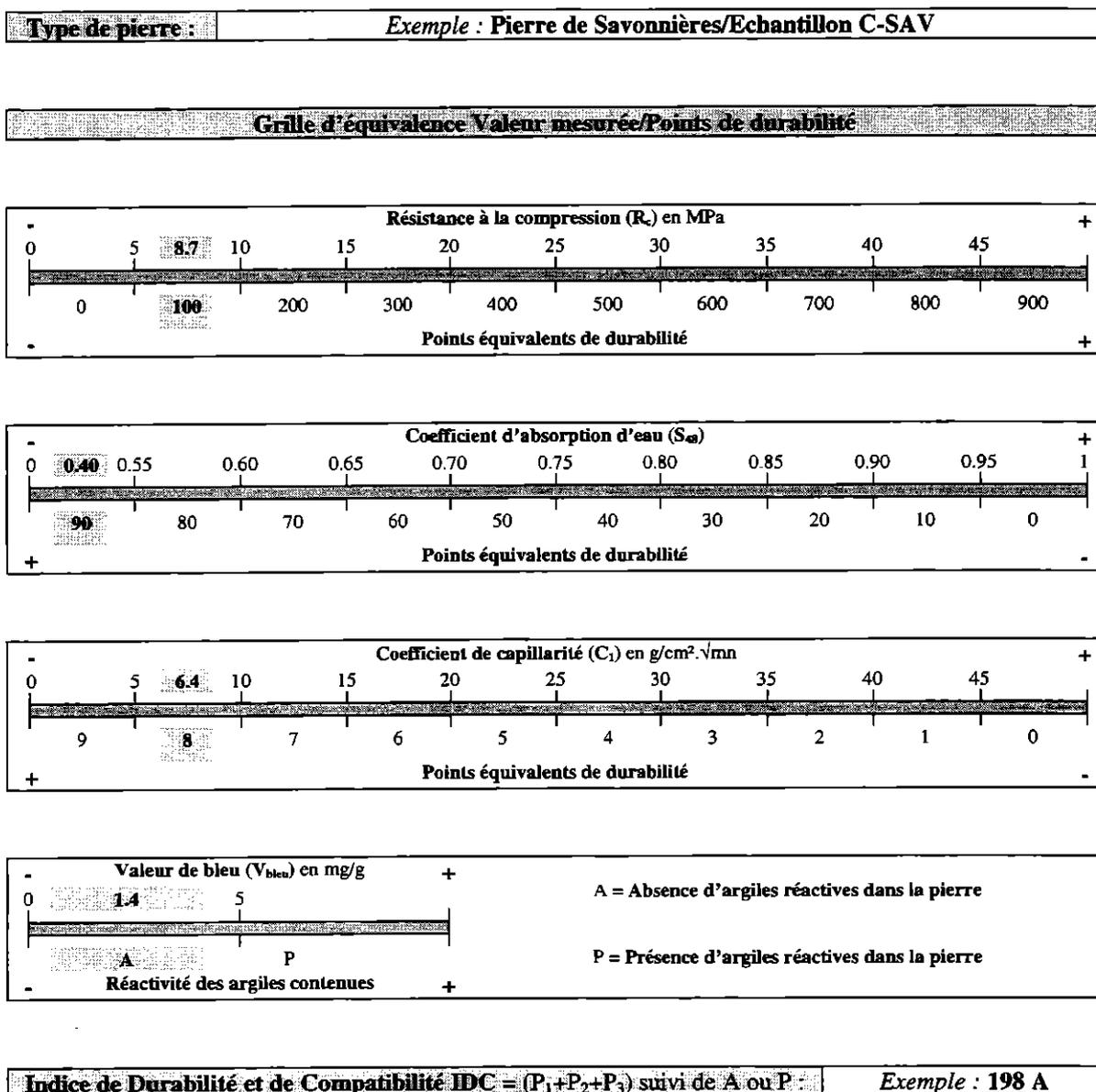


Fig. 5 – Fiche pratique d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité d'une pierre (exemple de l'échantillon C-SAV).

5.4. APPLICATION AUX PIERRES SÉLECTIONNÉES

5.4.1. Calcul de l'indice de durabilité et de compatibilité

Le tableau 11 présente les Indices de Durabilité et Compatibilité (IDC) des 18 échantillons de pierres sélectionnées et étudiées ainsi que leur classement relatif selon cet indice.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	IDC	Classement relatif
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1	879 A	2
	M-BAF-2	389 A	7
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1	599 A	4
	C-SPA-2	999 A	1
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B	257 A	12
	C-RIC-J	247 A	13
<i>Tuffeau de Touraine</i>	M-TUF-1	221 P	15
	M-TUF-2	225 P	14
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	489 A	5
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	679 A	3
<i>Calcaire de Saint Leu</i>	C-SLE	357 A	8
	M-SLE	278 A	11
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C	140 A	18
	C-MAX-D	355 A	9
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	198 A	16
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1	416 A	6
	C-MIG-2	315 A	10
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	146 A	17

Tabl. 11 – Indices de Durabilité et Compatibilité IDC et classement relatif des pierres étudiées.

Les Indices de Durabilité et de Compatibilité (IDC) des 18 échantillons sont compris entre 140A pour la pierre de Saint-Maximin (échantillon C-MAX-C) et 999A pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (échantillon C-SPA-2) :

- 2 échantillons présentent un indice IDC supérieur à 750 ;
- 2 échantillons présentent un indice IDC compris entre 500 et 750 ;
- 8 échantillons présentent un indice IDC compris entre 250 et 500 ;
- 6 échantillons présentent un indice IDC inférieur à 250.

Parmi les 18 échantillons, seuls les 2 échantillons de tuffeau renferment des argiles réactives en proportion suffisante, pour que leur indice de durabilité et de compatibilité IDC se termine par P.

5.4.2. Interprétation en terme de durabilité et compatibilité

a) « Banc Franc » de Paris et pierre de Saint-Pierre-Aigle

Les 4 échantillons correspondants à ces 2 faciès (M-BAF-1 et 2, et C-SPA-1 et 2) sont parmi ceux qui présentent les indices IDC les plus élevés. En terme de durabilité, il s'agit de faciès calcaires de bonne qualité. On note toutefois entre échantillons de même faciès, des différences d'indice, illustrant bien l'hétérogénéité naturelle des pierres à l'échelle d'une formation.

En terme de compatibilité, les échantillons de monument (« Banc Franc ») et de restauration (Saint-Pierre-Aigle) présentent une compatibilité satisfaisante, illustrée par

des valeurs dans la « colonne des dizaines » (correspondant à S48) et dans la « colonne des unités » (correspondant à C1) très proches.

Cette interprétation d'IDC en terme de durabilité et compatibilité du « Banc Franc » de Paris et de la pierre de Saint-Pierre-Aigle, est concordante avec l'appréciation basée sur des observations in situ, des professionnels de la restauration.

L'association « **Banc Franc** » de Paris »/pierre de Saint-Pierre-Aigle est donc un cas de **bonne compatibilité entre pierres de bonne durabilité**.

b) Pierre de Saint-Leu et pierre de Saint-Maximin

Les 4 échantillons correspondants à ces faciès présentent un indice IDC moyen (cas de C-SLE, M-SLE et C-MAX-D) ou faible (cas de C-MAX-C). En terme de durabilité, il s'agit de faciès calcaires de qualité moyenne pour les trois premiers et médiocre pour le dernier échantillon. A rappeler que les échantillons C-MAX-C et C-MAX-D appartiennent à deux faciès de Saint-Maximin différents : « Roche Construction » et « Roche Douce ».

En terme de compatibilité, l'échantillon de monument (M-SLE) et les 2 échantillons de restauration (C-SLE et C-MAX-D) présentent une compatibilité satisfaisante, illustrée par des valeurs dans la « colonne des dizaines » (correspondant à S48) et dans la « colonne des unités » (correspondant à C1) très proches.

A l'inverse, l'échantillon de restauration (C-MAX-C) se différencie nettement des 3 autres, et présente une incompatibilité marquée avec l'échantillon de monument (M-SLE).

L'association **pierre de Saint-Leu (monument)/pierre de Saint-Leu (restauration)** est donc un cas de **bonne compatibilité entre pierres de durabilité moyenne**.

Sur les bases des IDC, l'association **pierre de Saint-Leu (monument)/pierre de Saint-Maximin « roche douce » (restauration)** est également un cas de **bonne compatibilité entre pierres de durabilité moyenne**.

Ce dernier résultat doit cependant être nuancé si l'on tient compte des observations in situ fournies par les professionnels, qui notent une différence de patines significative entre ces 2 pierres.

A l'inverse, l'association **pierre de Saint-Leu (monument)/pierre de Saint-Maximin « roche Construction » (restauration)** est à proscrire.

c) Pierre de Jaumont et pierre de Rouffach

Les 2 échantillons correspondants à ces 2 faciès (C-JAU et C-ROU) présentent des indices IDC relativement élevés. En terme de durabilité, il s'agit de faciès de bonne qualité. On note toutefois entre ces deux échantillons une différence d'indice, C-ROU

étant un peu plus résistant mécaniquement, mais ayant un coefficient d'absorption d'eau un peu plus élevé que C-JAU.

En terme de compatibilité, ces 2 faciès présentent une compatibilité satisfaisante, illustrée par des valeurs dans la « colonne des dizaines » (correspondant à S48) et dans la « colonne des unités » (correspondant à C1) très proches.

Cette interprétation d'IDC en terme de durabilité et compatibilité de la pierre de Rouffach et de la pierre de Jaumont est concordante avec l'appréciation basée sur des observations in situ, des professionnels de la restauration qui signalent eux la bonne compatibilité esthétique en terme de patine, de ces 2 pierres.

L'association **Pierre de Rouffach/pierre de Jaumont** est donc un cas de **bonne compatibilité entre pierres de bonne durabilité**.

d) Pierre de Richemont et tuffeau de Touraine

Les 4 échantillons correspondants à ces 2 faciès (C-RIC-B et J, et M-TUF-1 et 2) présentent un indice IDC assez faible. En terme de durabilité, il s'agit de faciès calcaires de qualité très moyenne. En outre et contrairement à la pierre de Richemont, le tuffeau est caractérisé par la présence d'argiles réactives.

En terme de compatibilité, les échantillons de monument (tuffeau de Touraine) et de restauration (pierre de Richemont) présentent une compatibilité assez moyenne, illustrée par des valeurs dans la « colonne des dizaines » (correspondant à S48) assez proche et des valeurs dans la « colonne des unités » (correspondant à C1) plutôt éloignée, le tuffeau étant beaucoup plus capillaire que la pierre de Richemont

L'association « **tuffeau de Touraine** »/**pierre de Richemont** est donc un cas de **compatibilité moyenne entre pierres de durabilité moyenne** (pour Richemont) à **très moyenne** (pour le tuffeau du fait de la présence d'argiles réactives).

Cette interprétation d'IDC en terme de durabilité et compatibilité est concordante avec l'appréciation basée sur des observations in situ, des professionnels de la restauration, qui parle de compromis Tuffeau/Richemont, notant l'absence de pierres de substitution au tuffeau, mais permettant un gain de durabilité avec le Richemont.

e) Craie de Picardie, pierre de Migné et pierre de Savonnières

Les 4 échantillons correspondants à ces 3 faciès présentent des indices IDC moyens (C-MIG-1 et 2) à faibles (M-CPI et C-SAV). En terme de durabilité, il s'agit de faciès calcaires de qualité moyenne (cas de C-MIG-1 et 2) à faible (cas de C-SAV et surtout de M-CPI).

En terme de compatibilité, l'échantillon de monument (« Craie de Picardie ») présente une compatibilité médiocre avec les échantillons de restauration, qu'il s'agisse de pierre

de Savonnières, qui est de même résistance mais de coefficient d'absorption d'eau bien plus faible, ou de pierre de Migné, un peu plus résistante et de coefficient d'absorption d'eau plus élevé.

L'association « **Craie de Picardie** »/pierre de Savonnières est donc un cas de **mauvaise compatibilité entre pierres de durabilité médiocre**, doublée d'une incompatibilité esthétique constatée in situ par les professionnels de la restauration.

L'association « **Craie de Picardie** »/pierre de Migné apparaît quant à elle comme un compromis alliant une **compatibilité moyenne à un gain de durabilité**.

5.4.3. Validation de l'indice de durabilité et de compatibilité

Dans le paragraphe 5.4.2., nous avons obtenu une première validation de l'indice de durabilité et de compatibilité (IDC), en confrontant les valeurs obtenues pour les 18 pierres étudiées, et les observations in situ correspondantes.

Nous nous proposons maintenant de confronter ces valeurs d'IDC, aux résultats d'un essai de vieillissement accéléré appliqué aux 18 pierres étudiées.

a) Protocole de l'essai de vieillissement appliqué

Un essai de vieillissement accéléré doit être aussi simple que possible tout en incluant les facteurs d'altération les plus importants, et permettre d'approcher au mieux d'une formulation générale du comportement d'une roche à l'altération (C.A. Price, 1978, K. Niesel, 1981, C.H.B. Sperling et U. Cooke, 1985).

Afin de simuler les mécanismes d'altération sollicitant mécaniquement la structure des pierres par changement volumique d'une phase (eau dans les cycles gel/dégel, solution saline dans les cycles cristallisation/hydratation), nous avons opté pour un essai de cristallisation de sel (J.M. Rémy, 1993).

Le protocole d'essai par cristallisation de sel appliqué aux échantillons de pierre est dérivé de l'essai RILEM n° V.1a « Cristallisation par immersion totale (pour pierre non traitée) ».

Les échantillons de pierres soumis à l'essai sont des cubes de 30 à 35 mm de côtés (8 cubes par type de pierre).

L'essai proprement dit consiste en une succession de 5 cycles de 96 h, comprenant chacun 3 séquences successives, réalisées éventuellement de façon indépendante.

Séquence 1 (durée = 24 h) :

- Pesée initiale (M1)
- Immersion totale dans une solution à 10 % de Na₂SO₄ pendant 2 h
- Séchage dans un four préchauffé à 60 °C pendant 19 h
- Refroidissement à 20 °C pendant 3 h
- Pesée intermédiaire (M2)

Mesure de la prise de masse de sel : (M2-M1)

Séquence 2 (durée = 24 h) :

- Immersion totale pendant 24 h minimum dans de l'eau du robinet pour dilution des sels cristallisés

Séquence 3 (durée = 48 h) :

- Séchage dans un four préchauffé à 60 °C pendant 45 h
- Refroidissement à 20 °C pendant 3 h
- Pesée finale (M3)

Mesure de la perte de masse de pierre : (M3-M1)

Les résultats s'expriment par le pourcentage de masse résiduelle (dénommé Indice de Résistance au sel IR_{sel}) de chaque échantillon, à l'issue des 5 cycles de vieillissement :

$$IR_{sel} = 100 - \left(\frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \right)$$

avec : M_i : Masse initiale (avant essai) de l'échantillon
M_f : Masse finale (après 5 cycles) de l'échantillon.

La valeur d'IR_{sel} varie (en théorie) de 100 % pour les échantillons insensibles à l'essai de vieillissement accéléré, à 0 % pour des échantillons complètement détruits à l'issue des 5 cycles.

Le système sel/hydrate utilisé présente l'avantage d'être relativement simple, avec :

- un hydrate stable, la mirabilite (Na₂SO₄10H₂O) ;
- un hydrate métastable (Na₂SO₄7H₂O) ;
- un sel anhydre, la thénardite (Na₂SO₄).

L'effet destructeur du sulfate de sodium est lié à l'augmentation de volume occasionnée par la cristallisation de la thénardite (volume molaire : 53,3 cm³/mol) en solution, en mirabilite (volume molaire : 217,7 cm³/mol) à la température de 32,4 °C.

b) Résultats de l'essai de vieillissement accéléré

Les résultats (indice IR_{sel}) de l'essai de vieillissement accéléré appliqué aux 18 pierres étudiées sont présentés dans le tableau 12. Des illustrations photographiques du vieillissement accéléré des échantillons sont présentées en annexe 3.

Dénomination du faciès	Référence de l'échantillon	IR _{sel}	Classement relatif	IDC	Classement relatif
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1	98,4	5	879 A	2
	M-BAF-2	95,3	10	389 A	7
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1	99,9	2	599 A	4
	C-SPA-2	100	1	999 A	1
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B	93,6	12	257 A	12
	C-RIC-J	94,1	11	247 A	13
<i>Tuffeau de Touraine</i>	M-TUF-1	90,5	15	221 P	15
	M-TUF-2	84,2	16	225 P	14
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	98,8	3	489 A	5
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	98,6	4	679 A	3
<i>Calcaire de Saint-Leu</i>	C-SLE	91,4	14	357 A	8
	M-SLE	91,5	13	278 A	11
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C	83,4	17	140 A	18
	C-MAX-D	95,7	9	355 A	9
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	97,3	6	198 A	16
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1	95,8	7	416 A	6
	C-MIG-2	95,6	8	315 A	10
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	59,2	18	146 A	17

Tabl. 12 – Indices de résistance au sel IR_{sel} et classement relatif des pierres étudiées ; confrontation avec l'indice IDC.

L'indice de résistance au sel (IR_{sel}) des 18 échantillons est compris entre 59,2 % pour la craie de Picardie (échantillon M-CPI) et 100 % pour la pierre de Saint-Pierre-Aigle (C-SPA-2) :

- 10 échantillons ont un indice (IR_{sel}) supérieur à 95 % ;
- 5 échantillons ont un indice (IR_{sel}) compris entre 90 et 95 % ;
- 2 échantillons ont un indice (IR_{sel}) compris entre 80 et 85 % ;
- 1 échantillon a un indice (IR_{sel}) inférieur à 60 %.

c) Confrontation des indices IDC et IR_{sel}

Les indices de durabilité et compatibilité (IDC), et de résistance au sel (IR_{sel}) sont confrontés dans le tableau 12.

La tendance générale est une corrélation $(IDC)/(IR_{sel})$ correcte pour une grande majorité des échantillons, ainsi :

- les 5 pierres les plus résistantes à l'essai de vieillissement au sel (C-SPA-1 & 2, M-BAF-1, C-JAU, C-ROU) sont les faciès présentant les indices (IDC) les plus élevés ;
- à l'inverse, les 4 pierres les moins bien conservées à l'issue de l'essai (M-CPI, C-MAX-C, M-TUF-1 et 2) sont celles présentant les indices (IDC) les plus faibles.

Toutefois, le classement relatif des échantillons les uns par rapport aux autres présente des différences significatives suivant les deux indices (IR_{sel}) et (IDC), et indique bien que la résistance mécanique n'est pas suffisante pour expliquer la durabilité et comparer les échantillons entre eux.

Les autres paramètres comme les coefficients d'absorption d'eau et de capillarité ont un réel impact sur la durabilité d'un échantillon donné, le cas le plus démonstratif est celui du faciès C-SAV : il apparaît bien résistant au sel, malgré un indice (IDC) plutôt faible (198 A). Ceci s'explique par un coefficient d'absorption d'eau particulièrement faible (= 0,40) lui permettant une atténuation importante des pressions de cristallisation de sel, et ce, malgré une résistance mécanique plutôt modeste.

L'utilisation d'IDC dans la prédiction du comportement d'un échantillon donné, doit donc avant tout être effectuée dans un but comparatif d'appréciation de la compatibilité. On ne doit pas l'utiliser comme indice de classement absolu, mais plutôt comme un indicateur semi-quantitatif de la durabilité, utilisant des qualificatifs tels que « très », « moyennement », « peu » durable.

6. Conclusion

Comme tout matériau naturel, les pierres des monuments subissent au fil du temps des mécanismes physico-chimiques générant des altérations, dommageables pour l'esthétique de l'édifice et à terme pour sa stabilité.

Plus de la moitié des dépenses liées à la restauration des monuments historiques est consacrée à ces problèmes, qu'il s'agisse de la substitution des moellons altérés de l'édifice par de la pierre fraîchement extraite de carrière, ou du traitement conservatoire (par décapage et/ou application de produits hydrofuges/consolidants) des pierres en œuvre d'origine. Pour un monument donné, la maîtrise du coût « restauration de la pierre » apparaît donc étroitement liée à la fréquence des travaux de restauration, elle-même conditionnée par le choix des pierres et leur « durée de vie ».

Cette phase de sélection des matériaux pierreux est fondamentale et ne peut être réussie qu'en ayant mené une étude préalable des pierres d'origine et de substitution, basée sur les notions de durabilité et de compatibilité. Afin d'appréhender ces deux notions, 18 échantillons de pierres calcaires mises en œuvre d'origine sur monuments historiques ou utilisées en restauration de ces édifices et représentant des cas réels de durabilité et compatibilité variables, ont été sélectionnés et échantillonnés sur monuments ou en carrières.

L'eau représentant le principal facteur externe de développement des altérations, chaque échantillon a fait l'objet d'une méthodologie d'étude spécifique en laboratoire s'appuyant sur des méthodes de caractérisation susceptibles de qualifier et de quantifier leur milieu poreux, en tant que lieu de stockage et de transfert des fluides.

Parallèlement, l'étude des mécanismes d'altération des pierres a permis d'identifier les facteurs internes d'altération (caractéristiques intrinsèques) et d'obtenir une formulation générale de la durabilité et de la compatibilité des pierres. Elle a ensuite conduit à la mise au point d'une fiche pratique d'évaluation de la durabilité et de la compatibilité, attribuant un indice de durabilité et de compatibilité (IDC) à chaque pierre.

Enfin, les indices obtenus pour les 18 échantillons de pierres calcaires étudiées ont été confrontés aux observations in situ d'une part, et aux résultats d'un essai de vieillissement accéléré par cristallisation et hydratation de sel d'autre part. Cette confrontation a permis d'aboutir à une validation correcte pour les pierres calcaires, de l'indice de durabilité et de compatibilité formulé.

Cet indice (IDC) s'avère d'usage simple et obtenu à moindre coût. Basé sur la mesure de quatre paramètres obtenus selon des procédures normalisées, son utilisation systématique doit réellement guider les professionnels de la restauration des monuments (architectes, exploitants de carrières, restaurateurs), dans leur choix des pierres les mieux adaptées en terme de durabilité et de compatibilité, et limiter à terme les dommages liés à l'emploi de pierres non adéquates.

Validé pour les roches sédimentaires de type calcaire, l'utilisation de l'indice IDC doit maintenant être généralisée après ajustement éventuel et nouvelle validation, aux autres types de pierres mises en œuvre dans le patrimoine bâti : roches sédimentaires détritiques telles que les grès et roches ignées telles que les granites, les basaltes, ..., essentiellement.

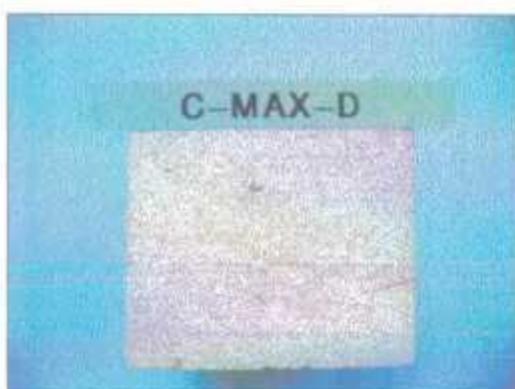
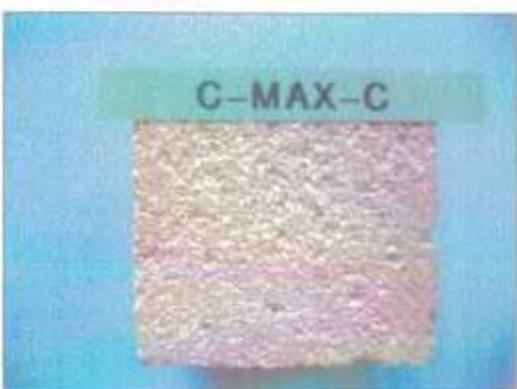
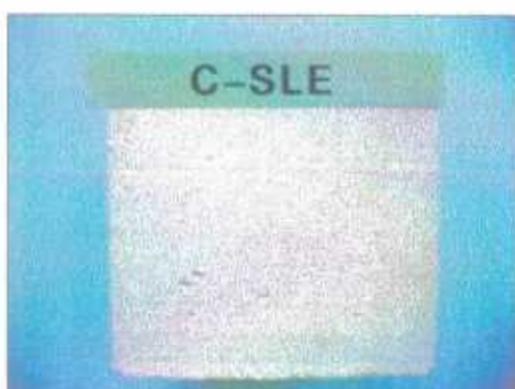
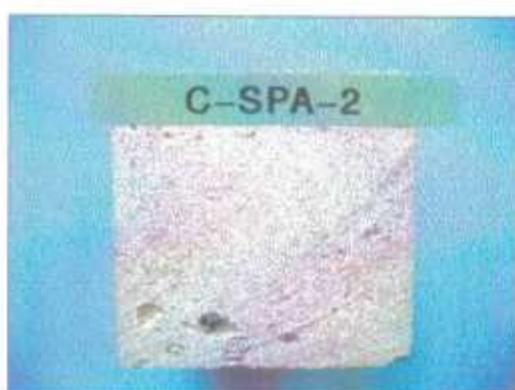
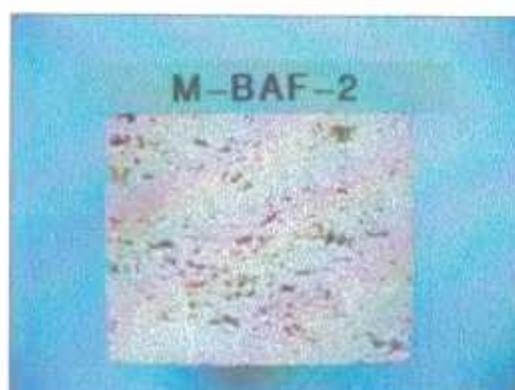
Bibliographie

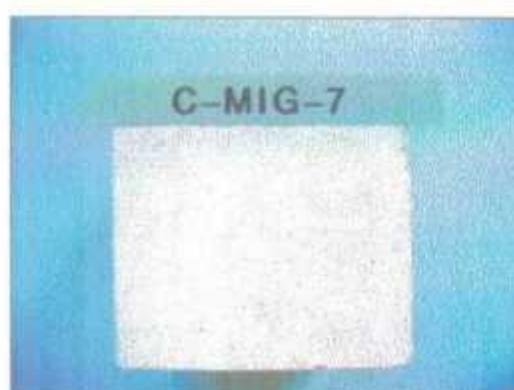
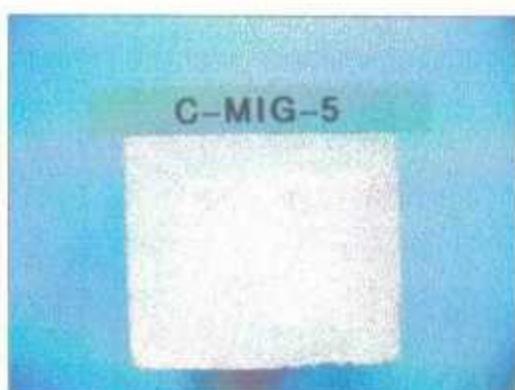
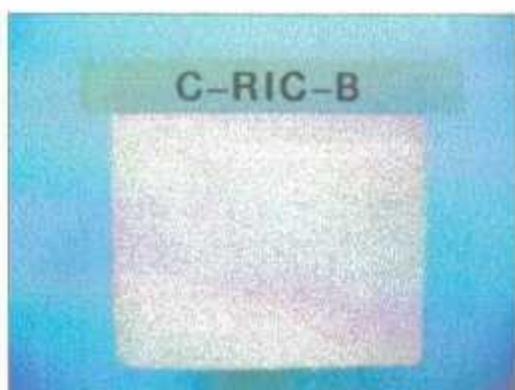
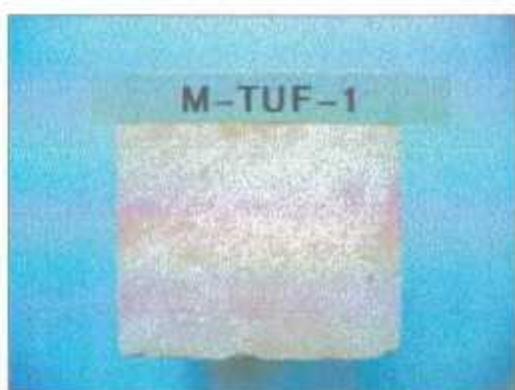
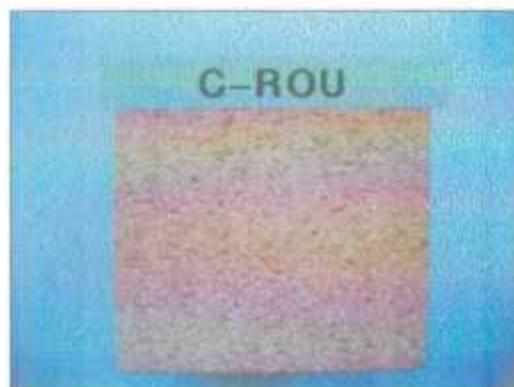
- Alonso F.J. (1986) – Caracterization petrofisica y alterabilidad de calizas y dolomias. Thèse Universidad de Oviedo, 291 p.
- Arnold A. (1994) - Évolution des sels solubles dans l'altération et la conservation des monuments. La pierre des monuments dans son environnement physique et culturel. Cours Doctoral Europeen, Ravello/Florence.
- Chaye d'Albissin M., Tourencq C. (1976) – L'analyse des microstructures. *Revue de Géogr. Physique et de Géol. Dynamique.*, vol. XVIII, Fasc. 1, pp. 93-126, Paris.
- Dessandier D. (1995) – Étude du milieu poreux et des propriétés de transfert des fluides du tuffeau blanc de Touraine – Application à la durabilité des pierres en œuvre – Thèse de l'université de Tours, 279 p.
- Dobereiner L., De Freitas M.H. (1986) – Geotechnical properties of weak sandstones. *Geotechnique* 36, pp. 79-94.
- Dunham R.J. (1962) – Classification of carbonates rocks adding to depositional texture. *In W.E. Ham Ed., Classification of carbonate rocks.* A.A.P.G., Tulsa, pp. 108-121.
- Gueguen Y., Palciauskas V. (1992) – Introduction à la physique des roches. Editions Hermann, 299 p.
- Hammecker C. (1993) – Importance des transferts d'eau dans la dégradation des pierres en œuvre. Thèse de l'université de Strasbourg, 253 p.
- Jeannette D. (1994) – Transferts capillaires dans les roches. La pierre des monuments dans son environnement physique et culturel. Cours Doctoral Européen. Ravello/ Florence.
- Lebart L., Morineau A., Fenelon J.P. (1979) – Traitement des données statistiques. Dunod.
- Mamillan M. (1984) – Durabilité des pierres tendres. CEBTP, rapport n°102, 69 p.
- Mertz J.D. (1989) – Structures de porosité et propriétés de transport dans les grés. Thèse université de Strasbourg, 147 p.
- Monicard R. (1975) – Caractéristiques des roches réservoirs. Analyse des carottes. Institut Français du Pétrole, Ed. Technip, Paris, 203 p.
- NF B 10-502 (1980) – Pierres calcaires : mesure de l'absorption d'eau par capillarité.

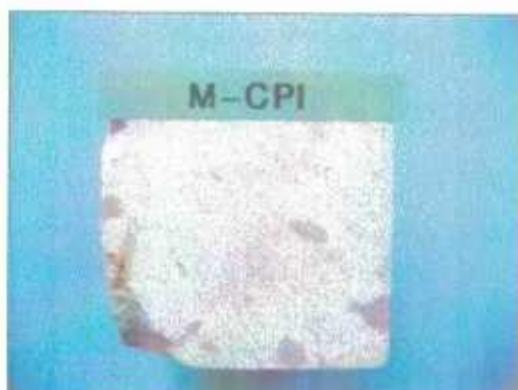
- NF B 10-503 (1973) – Pierres calcaires : mesure de la porosité, de la masse volumique réelle et de la masse volumique apparente.
- NF B 10-504 (1973) – Pierres calcaires : mesure du coefficient d'absorption d'eau.
- NF B 10-509 (1973) – Pierres calcaires : essai de compression.
- NF ISO 10693 (1995) – Qualité du sol – Détermination de la teneur en carbonate – Méthode volumétrique.
- Niesel K. (1981) – Critères pour le comportement à l'altération de pierres en œuvre, compte tenu d'une sélection de valeurs caractéristiques. *GP News Letter* 2, Septembre 1981, pp. 6-14.
- Philippon J., Lefèvre R.A., Jeannette D. (1991) – La conservation de la pierre en France. Presses du C.N.R.S., 267 p.
- Price C.A. (1978) – The use of the sodium sulphate crystallisation test for determining the weathering resistance of untreated stone. *Coll. intern. Altérat. Protect. Monuments en pierre*, Paris, 9 p.
- Rémy J.M. (1993) – Influence de la structure du milieu poreux carbonaté sur les transferts d'eau et les changements de phase eau-glace. Application à la durabilité au gel de riches calcaires de Lorraine. Thèse INP de Lorraine, 355 p.
- Samson-Gombert C. (1993) – Influences d'un environnement urbain et maritime sur les altérations d'un calcaire en œuvre : la pierre de Caen. Thèse université de Caen, 320 p.
- Scolari G., Lille R. (1973) – Nomenclature et classification des roches sédimentaires. *Bull. BRGM* n° 2, IV, 125 p.
- Sperling C.H.B., Cooke U. (1985) – Laboratory simulation of rock weathering by salt crystallization and hydration processes in hot, arid environments. *Earth Surface Processes and Transforms*, vol. 10, pp. 541-555.
- Wardlaw N.C., McKellar M. (1981) – Mercury porosimetry and interpretation of pore geometry in sedimentary rocks and artificial models. *Powder Technology*, n° 29, pp. 127-143.
- Wardlaw N.C., McKellar M., Li Y. (1988) – Pore and throat size distribution determined by mercury porosity and by direct observation. *Carbonates and evaporites*, n° 3, pp. 1-15.
- Winkler E.M. (1994) – Stone in architecture, Properties, Durability. Springer-Verlag, 313 p.

ANNEXE 1

Illustrations photographiques des pierres sélectionnées





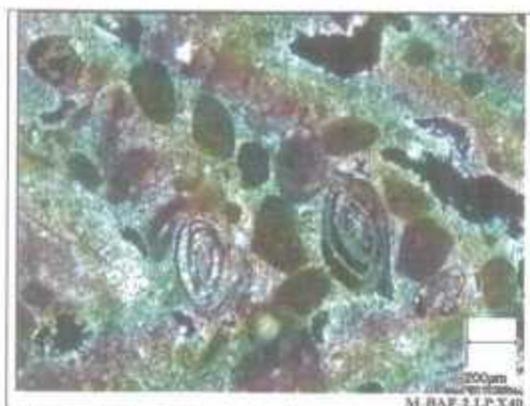


ANNEXE 2

Observations au microscope optique polarisant des pierres sélectionnées

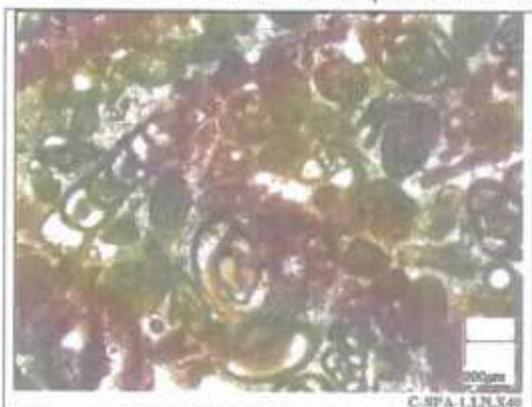


M.BAF.1.LP.X100

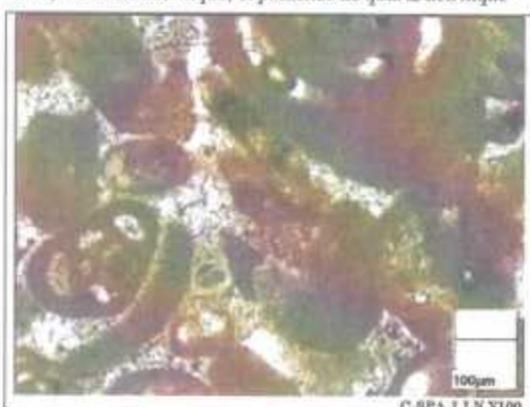


M.BAF.3.LP.X40

Banc Franc de Paris : *Biocalcarénite à pellets, à cerithes et miliolae, à ciment micritique, et présence de quartz détritique*



C.SPA.1.LN.X40

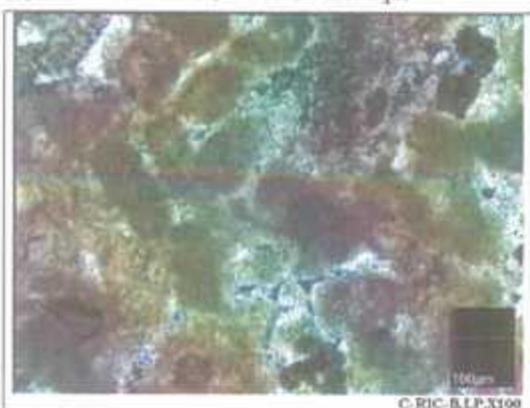


C.SPA.1.LN.X100

Pierre de Saint-Pierre-Aigle : *Biocalcarénite à pellets, à cerithes et miliolae, et à ciment micritique*



C.RIC.1.LP.X40

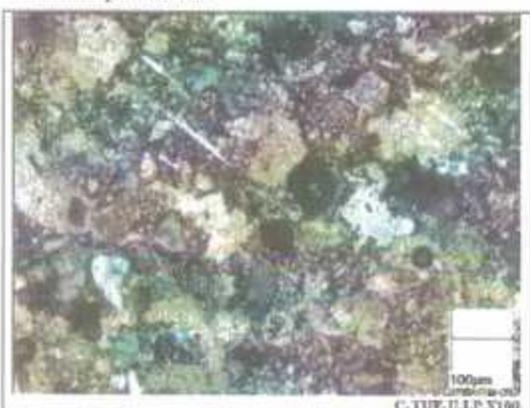


C.RIC.1.LP.X100

Pierre de Richemont : *Micrite à texture pelletoidale*

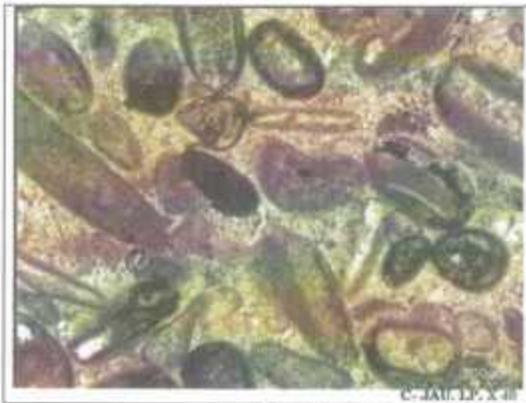


C.TUF.C.LN.X100

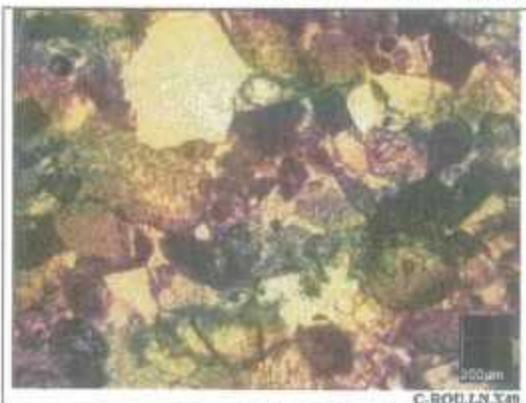


C.TUF.U.LP.X100

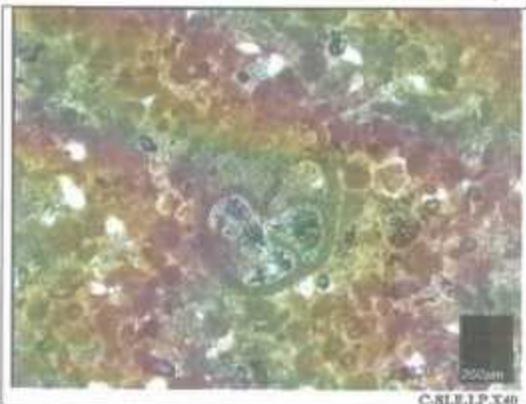
Tuffeau de Touraine : *Calcarénite à quartz et glauconie, et à ciment micritique siliceux*



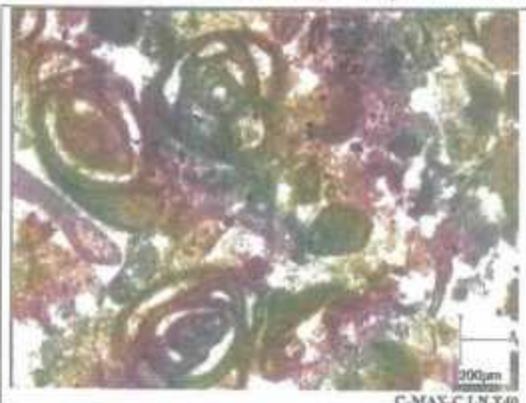
Pierre de Jaumont : Biocalcarénite à pellets, et à ciment spathique



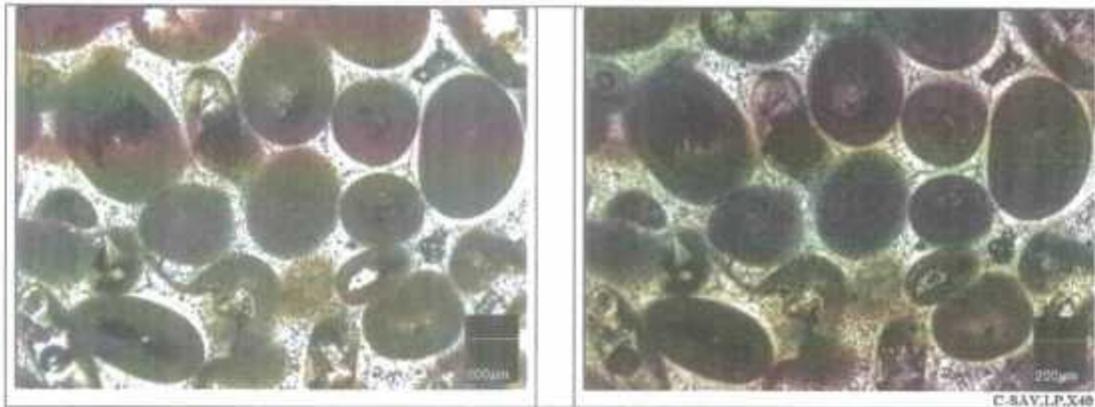
Pierre de Rouffach : Calcarénite à pellets, à ciment micritique et à quartz détritique



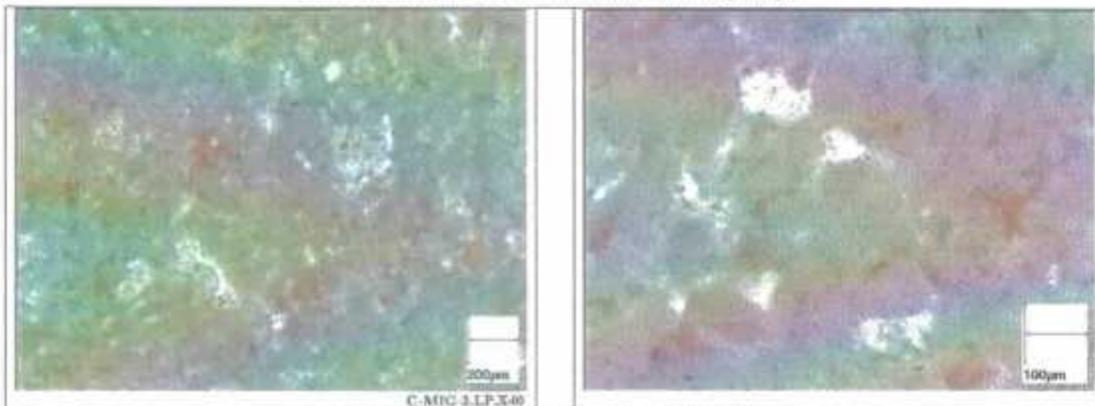
Pierre de Saint Leu : Pelcalcarénite à ditrupa, milioles et nummulites, à ciment micritique, et présence de quartz détritique



Pierre de Saint-Maximin : Biocalcarénite à milioles, à ciment micritique, et présence de quartz détritique



Pierre de Savonnières : Oocarcarenite à ciment spathique



Pierre de Migné : Micrite à texture pelletolaie



Craie de Picardie : Micrite à empreintes rhomboédriques de calcite

ANNEXE 3

Illustrations photographiques des pierres sélectionnées, soumises à un essai de vieillissement accéléré



Après 1 cycle de vieillissement



Après 5 cycles de vieillissement



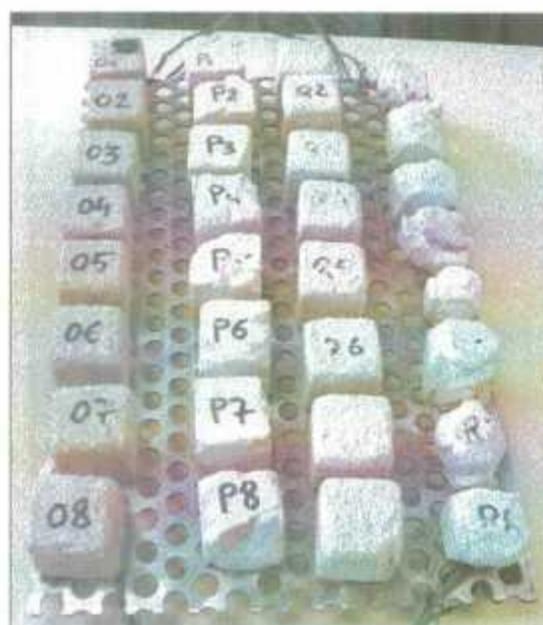
Après 1 cycle de vieillissement



Après 5 cycles de vieillissement



Après 1 cycle de vieillissement



Après 5 cycles de vieillissement

Dénomination du faciès	Correspondance des références d'échantillon	
<i>Banc Franc de Paris</i>	M-BAF-1	A
	M-BAF-2	B
<i>Pierre de Saint-Pierre-Aigle</i>	C-SPA-1	C
	C-SPA-2	D
<i>Pierre de Richemont</i>	C-RIC-B	E
	C-RIC-J	F
<i>Tuffeau de Touraine</i>	M-TUF-1	G
	M-TUF-2	H
<i>Pierre de Jaumont</i>	C-JAU	I
<i>Pierre de Rouffach</i>	C-ROU	J
<i>Pierre de Saint Leu</i>	C-SLE	K
	M-SLE	L
<i>Pierre de Saint-Maximin</i>	C-MAX-C	M
	C-MAX-D	N
<i>Pierre de Savonnières</i>	C-SAV	O
<i>Pierre de Migné</i>	C-MIG-1	P
	C-MIG-2	Q
<i>Craie de Picardie</i>	M-CPI	R

Tableau de correspondance des références d'échantillon

