

Méthodes de diagnostic des enrochements de berges de la vallée du Rhône

Jacques PERRIER
Jean-Louis MATHURIN

Laboratoire d'Essais Mesures Contrôles
Compagnie nationale du Rhône

Henri LACROIX
CARMATEC SARL

Philippe GRANDJEAN
Laboratoire Dynamique de la Lithosphère,
Université Claude Bernard Lyon 1 (CNRS UMR 5570)

RÉSUMÉ

La Compagnie nationale du Rhône a engagé entre 1995 et 2000, sur les berges revêtues d'enrochements des retenues du Rhône entre Lyon et la Méditerranée, des études-diagnostic, qui ont conduit à définir un plan pluriannuel d'entretien des berges.

Une partie des études a eu pour but d'identifier et de quantifier les désordres rencontrés, et de définir des moyens permettant de sélectionner les matériaux rocheux de remplacement.

Une des causes des dégradations est la nature géologique évolutive des roches. Une série d'essais *in situ* et en laboratoire a été réalisée et les corrélations entre résultats ont été étudiées.

Les méthodes d'investigation les plus intéressantes sont obtenues à partir :

- d'essais sur site (à l'échelle 1) : indice de continuité, essais de chute, pétrographie de terrain ;
- d'essais de laboratoire sur échantillons de taille importante (gélivité) ou sur la microstructure (porosité, lames minces).

Un essai de vieillissement accéléré des roches a été mis au point et des spécifications d'essais mécaniques sur enrochements ont été améliorées.

DOMAINE : *Géotechnique et risques naturels.*

ABSTRACT

DIAGNOSTIC METHODS FOR USE OF RIPRAP ON RHONE RIVER VALLEY BANKS

The National Rhone Company commissioned over the period 1995 - 2000, for the riprap-lined banks of the Rhone River between Lyon and the Mediterranean Sea, a series of diagnostic studies, which then led to establishing a several-year plan for maintaining these banks.

A segment of the studies was intended to identify and quantify the range of disorders encountered and then to set forth the means by which the rocky replacement material could be selected.

One cause of degradation is the highly-evolutionary geological nature of the rocks present. A series of tests, both in situ and in the laboratory, were conducted and the correlations between results were examined.

The most effective investigative methods have been obtained by virtue of:

- on-site (full-scale) testing: continuity index, rockfall tests, ground petrography analysis;*

- laboratory tests on either large-sized samples (frost-resistant) or the microstructure (porosity, thin blades).*

An accelerated aging test for rocks has been developed and a set of mechanical testing specifications for the use of riprap has been improved.

FIELD: *Geotechnical engineering and natural hazards.*

INTRODUCTION

Créée en 1933, la Compagnie nationale du Rhône (CNR) s'est vue confier par l'État, sous forme de concession, trois missions liées à l'aménagement du fleuve : la production d'électricité, la navigation et la création de ports fluviaux ainsi que le développement agricole par la création de canaux d'irrigation et de drainage.

Réalisés entre 1948 et 1986, les 19 aménagements de la CNR (Fig. 1) comportent tous (sauf le palier d'Arles à l'extrémité sud, dédié exclusivement à la navigation) un barrage et une centrale hydroélectrique. La capacité de production d'électricité, de 16 milliards de kWh, représente près d'un quart de la production hydroélectrique française.



■ Fig. 1
Les aménagements du Rhône.

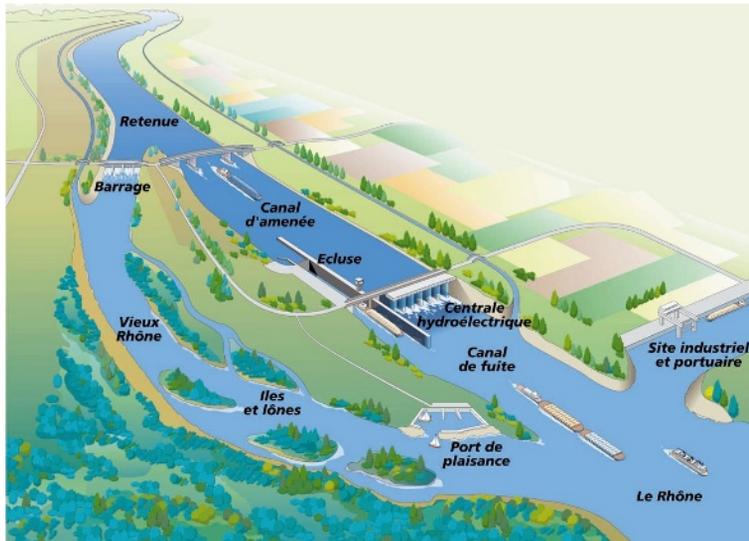
Une voie navigable de 330 km, comportant 14 écluses de 195 m × 12 m, est aménagée pour des convois de gabarit européen entre Lyon et la mer Méditerranée. En 2002, le trafic fluvial atteignait 751 millions de tonnes × kilomètres.

Si l'on excepte la chute de Génissiat (64,5 m), le Rhône concédé à la CNR consiste en une série de 17 aménagements dont la longueur moyenne est de 23,4 km et la chute moyenne de 11,4 m. Chaque aménagement se compose typiquement de quatre tronçons, comme indiqué sur le schéma directeur de l'aménagement type (Fig. 2) : une retenue limitée par des digues en terre d'une longueur moyenne de 11,6 km, un canal d'amenée d'une longueur moyenne de 6 km, un canal de fuite d'une longueur moyenne de 6,6 km et le Vieux Rhône, où ne subsiste pendant la majorité de l'année que le débit réservé car les eaux sont dérivées vers l'usine hydroélectrique.

Le Rhône est le plus puissant des fleuves français. À Beaucaire, à l'extrémité aval du fleuve, son débit moyen est de 1 650 m³ par seconde et la crue millénale est estimée à 14 000 m³ par seconde.

ENJEUX DE L'ENTRETIEN DES PROTECTIONS DES BERGES ET OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Pour assurer la tenue des berges des retenues endiguées vis-à-vis des agressions du courant du fleuve (atteignant jusqu'à 6 m/s pour les crues de période de retour comprises entre 100 et 1 000 ans) et des vagues provoquées par le passage des bateaux, celles-ci ont été en général revêtues, lors de la



■ Fig. 2
Aménagement type.

construction des ouvrages, d'enrochements dont la blocométrie était typiquement de 10/100 kg (zones normalement exposées) et 100/400 kg (zones très exposées).

Lors de la construction des aménagements du Rhône, la blocométrie des protections des berges des retenues a été en général déterminée pour résister à la sollicitation la plus contraignante : le courant du fleuve en crue millénale. Cette sollicitation est maximale en pied de berge ; la partie haute du revêtement, soumise aux vagues de batillage et à celles soulevées par le vent, était donc initialement surdimensionnée dans beaucoup de secteurs.

Ce surdimensionnement, qui allait dans le sens de la sécurité, était tout à fait justifié dans le contexte de la construction des aménagements du Rhône. En effet, compte tenu des moyens disponibles alors pour la réalisation des ouvrages, le surcoût entraîné a été très limité tout en simplifiant beaucoup la réalisation. Il n'en est plus de même dans la phase actuelle d'exploitation des ouvrages où une opération de renforcement des berges nécessite une coûteuse amenée de matériel et l'approvisionnement en enrochements à partir de carrières éloignées du site.

À partir du début des années 1990, les protections des berges du Rhône ont commencé à nécessiter des travaux d'entretien importants, du fait des dégradations provoquées par le passage des bateaux, les crues du fleuve et de l'éclatement progressif des blocs d'enrochements dans la partie émergée de certains tronçons de berges.

Compte tenu de l'enjeu financier (environ 0,5 millions d'euros par an, représentant 2,5 % du budget annuel d'entretien pour le génie civil), les services de la CNR chargés de l'entretien des aménagements ont lancé une série d'études-diagnostic concernant toutes les retenues des aménagements à l'aval de Lyon (soit une longueur totale de 142 km), dans le but d'établir un plan pluriannuel d'entretien, destiné à mettre en évidence les secteurs nécessitant des renforcements et de hiérarchiser les priorités.

Il était donc nécessaire d'examiner, avec des méthodes homogènes d'évaluation et de dimensionnement, l'état des revêtements qui ont été conçus et réalisés, sur une période totale de 30 ans, avec des matériaux de qualités diverses (l'usage des matériaux des carrières proches du fleuve ayant été privilégié pour diminuer les coûts).

MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

L'étude a comporté deux parties :

- ① une partie consacrée à l'évaluation de l'état actuel des enrochements en place sur les rives des retenues et des risques d'évolution défavorable. C'est ce volet, avec son prolongement sur la qualité des enrochements fournis en carrière, qui sera développé par la suite ;
- ② une seconde partie consacrée au « rétro-dimensionnement hydraulique » des protections de berges sur le Rhône de façon à localiser les secteurs les plus exposés à des risques de déstabilisation sous l'effet des vagues et du courant. Le lecteur intéressé par cet aspect pourra se reporter à la com-

munication présentée au congrès de l'AIPCN de Sydney de septembre 2002 « Réalisation d'un schéma directeur d'entretien des protections des berges du Rhône aménagé » [1].

Il a été montré en particulier que la taille des enrochements, en place depuis 20 à 50 ans, avait évolué de façon défavorable sur 94 km et était susceptible d'être insuffisante eu égard aux sollicitations hydrauliques et de batillage.

Sur 35 km, la sollicitation déterminante est la vitesse du courant en crue millénale. La blocométrie alors nécessaire peut atteindre la catégorie 100/400 kg dans les secteurs les plus exposés (zones étroites et courbes prononcées du fleuve).

Sur 45 km, les ondes secondaires de batillage sont déterminantes. Il s'agit de parties du fleuve plus larges, où la vitesse du courant ne dépasse pas 3 m/s. La blocométrie nécessaire ne dépasse pas la catégorie 10/100 kilogrammes.

Sur 14 km, dans les retenues qui sont particulièrement larges et exposées, les vagues soulevées par le vent sont les plus défavorables.

La CNR dispose, après cette étude, de méthodes de dimensionnement hydraulique homogènes répondant à l'ensemble des sollicitations et des caractéristiques du site. Ces méthodes sont fiables car elles ont été validées pour la plupart par des essais sur modèles physiques, et parce qu'elles ont été vérifiées en les appliquant au cas de berges existantes stables.

Le croisement des résultats de ces deux parties d'étude a abouti à l'établissement du plan pluriannuel d'entretien sur chaque aménagement. Les études ont été réalisées sur une période de cinq ans, entre 1995 et 2000.

DIAGNOSTIC MATÉRIAUX

Diagnostic de l'état des revêtements en place

Ce diagnostic s'est déroulé en deux phases :

- ① sur ouvrages, une phase d'identification des problèmes sur la base d'observations de terrain en vue de recenser les désordres a porté sur la totalité des longueurs de berges de retenue protégées en enrochements, soit 244 km (142 km × 2 rives, moins 15 % environ de revêtements de berges de nature différente : perrés maçonnés, enrobés, etc.). Ces observations, qui ont concerné la partie émergée des revêtements constitués d'enrochements, ont été effectuées au moyen de méthodes classiques : relevés visuels avec reports cartographiques synthétiques et rapports photographiques ;
- ② sur les matériaux, une phase d'analyses et d'essais, aboutissant au diagnostic proprement dit, a été menée uniquement sur les secteurs sensibles identifiés lors de l'état des lieux, soit 94 kilomètres.

La phase d'identification sur ouvrages a permis de localiser les portions de berges où la blocométrie des revêtements initiaux avait évolué de façon défavorable (arrachement ou éclatement de blocs). Les analyses complémentaires, effectuées en deuxième phase, ont eu pour objectif d'estimer les risques de dégradation ultérieure des blocs d'enrochements, notamment en terme de blocométrie et d'évaluer le niveau de protection résiduel des digues et berges vis-à-vis des agressions du fleuve.

Les méthodes ont évolué en cours d'étude, en fonction de la pertinence de leurs résultats par rapport aux constats de terrain. Elles ont consisté en début d'étude à réaliser :

- des essais mécaniques en laboratoire sur des échantillons de taille réduite : masse volumique et porosité, Micro-Deval en présence d'eau et Los Angeles, compression simple en laboratoire, essais de gélivité fondés sur la perte d'indice de continuité après gel ;
- des essais sur site : indice de continuité, essais de chute de blocs, analyses blocométriques sur des échantillons de 5 à 20 tonnes.

En cours d'étude, le programme d'essais a été adapté :

- en rajoutant des analyses sur lames minces au microscope optique. Ces analyses se sont en effet avérées utiles pour affiner la détermination de la nature minéralogique, la micro-fissuration ou l'altération des roches en place ;
- en réduisant le nombre d'essais mécaniques sur petits échantillons au profit d'essais sur site.

En outre, à partir des observations de terrain (délitage, ou éclatement de certaines roches calcaires ou migmatites exposées à des variations brutales de température et d'hygrométrie), il a été décidé de mettre au point, en collaboration avec la société CARMATEC et le Laboratoire de Dynamique de la Lithosphère de l'université Claude Bernard (LYON 1), un essai de vieillissement accéléré par chocs thermiques.

Enfin, l'essai de gélivité a été rendu plus performant. Le principe de la mesure de l'indice de continuité a été conservé, mais la taille et le mode de préparation de l'échantillon ont été modifiés.

Au total, ce sont près de 400 mesures physiques, mécaniques ou pétrographiques qui ont été réalisées.

Essais sur enrochements en carrières

La remise en état des protections a également nécessité de définir un ensemble d'essais permettant de s'assurer que la fourniture des enrochements de remplacement préconisés, à partir des carrières situées le long de la vallée du Rhône, était de qualité satisfaisante.

Il a fallu à la fois utiliser les essais les plus pertinents et définir des seuils de spécifications bien adaptés pour :

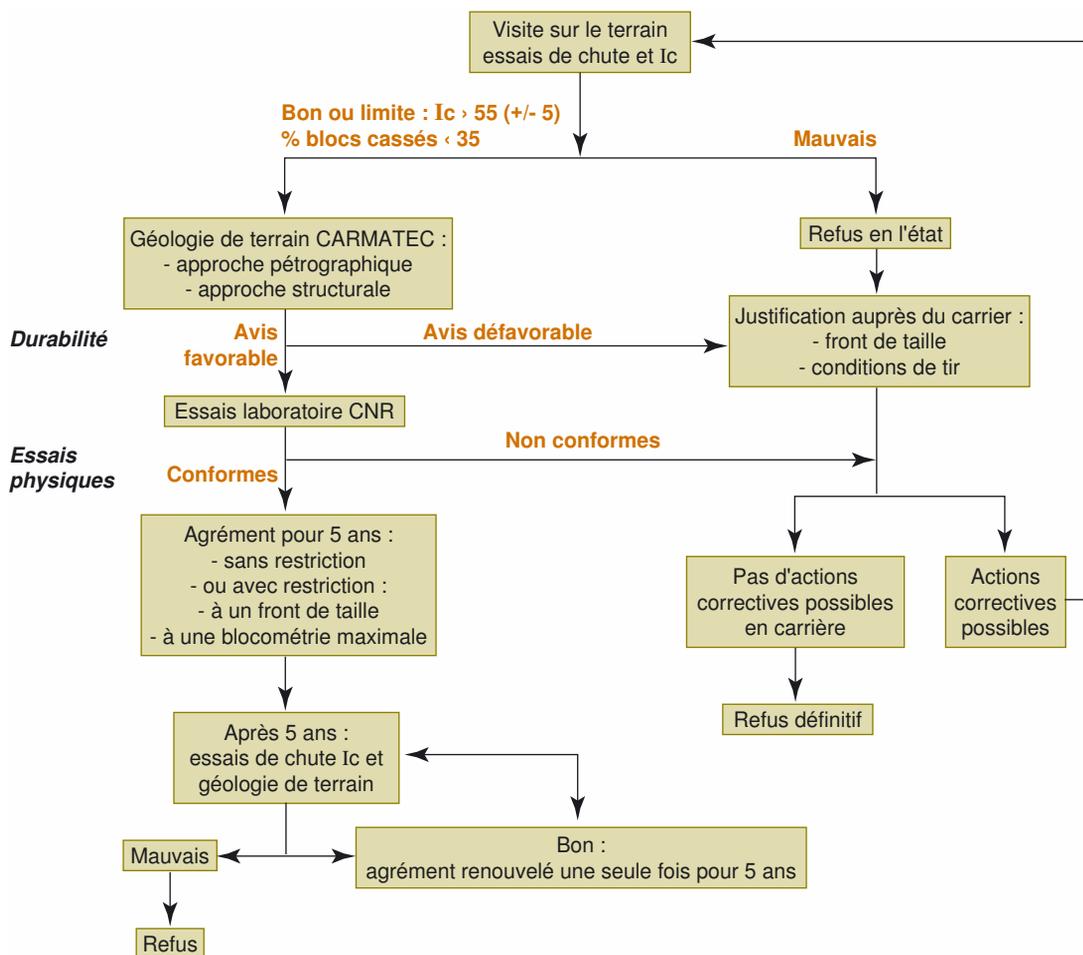
- rejeter les fournitures de trop faible qualité,
- continuer à disposer d'un minimum de carrières situées à une distance économiquement acceptable des ouvrages.

Dans cette démarche, les essais menés sur les enrochements de protection des berges en place ont été très utiles pour fixer de nouvelles prescriptions. Les principaux essais ont été conservés et utilisés suivant leur ordre d'importance et leur facilité d'interprétation.

Les essais de chute et d'indice de continuité sur enrochements, ainsi que la visite du géologue sur le front de taille des carrières, constituent la première étape avec une interprétation quasi immédiate. Ensuite, les essais de laboratoire sont réalisés à partir de blocs sélectionnés en fonction de leurs caractéristiques soniques représentatives de l'ensemble.

Les campagnes d'essais ont porté sur quinze carrières réparties le long de la vallée du Rhône. Au final, huit des quinze carrières examinées ont été agréées pour une durée limitée à cinq ans.

Le détail de la démarche en vue de l'agrément d'une carrière est indiqué sur la figure 3.



■ Fig. 3

Protocole d'essai CNR appliqué aux carrières d'enrochements.

MÉTHODES D'ESSAIS ET RÉSULTATS

Sur l'ensemble des roches présentes le long de la vallée du Rhône (calcaires, granites, basaltes, migmatites), tant en carrière que sur site (Fig. 4) après 20 à 50 ans de vieillissement naturel, on s'est intéressé aux paramètres suivants : porosité, masse volumique, résistance à la compression, Los Angeles, indice de continuité, essai de chute et gélivité. Ces paramètres correspondent en partie à ceux définis dans le guide LCPC « Les enrochements » [2] et à ceux déjà utilisés dans les prescriptions internes de la CNR. Le vieillissement par cycles thermiques en liaison avec la pétrographie des roches est un paramètre qui a été rajouté suite aux observations de terrain.

Méthodes d'essais

Essais normalisés

Les essais les plus courants ont été réalisés en appliquant les normes Afnor suivantes :

- porosité et masse volumique : NF B 10503 [3] ;
- résistance à la compression : NF B 10509 (éclatement égal à 1) [4] ;
- Los Angeles : P 18573 [5].

Les autres essais ont nécessité des adaptations de normes existantes ou ont été réalisés suivant des modes opératoires non normalisés. Il s'agit en particulier de l'indice de continuité sur site, de l'essai de chute et des essais de gélivité et de vieillissement par cycles thermiques.

Indice de continuité

Cet indice est mesuré avec un appareil PUNDIT, qui donne le temps de passage d'une onde ultrasonore dans le matériau. Il reflète à la fois des caractéristiques liées à la nature de la roche, à sa compacité, mais aussi à son degré de fissuration. Pour un calcaire, l'indice de continuité pourra ainsi varier de 30 pour un calcaire poreux et/ou fissuré à plus de 90 pour une roche très massive et compacte. La valeur d'indice de continuité retenue est la moyenne de 30 mesures sur blocs ; chaque valeur unitaire est également la moyenne de deux valeurs mesurées parallèlement et perpendiculairement aux plans de clivage.

La norme P 18556 [6] sur granulats définit des moyens de mesure et des échantillons de type laboratoire. Dans le cas de cette étude, les mesures de vitesses sont réalisées sur site sur des blocs de dimensions comprises entre quelques centimètres à environ 1 m, à l'aide de transducteurs à pointes exponentielles de fréquence 54 kHz sans préparation de surface (Fig. 5).

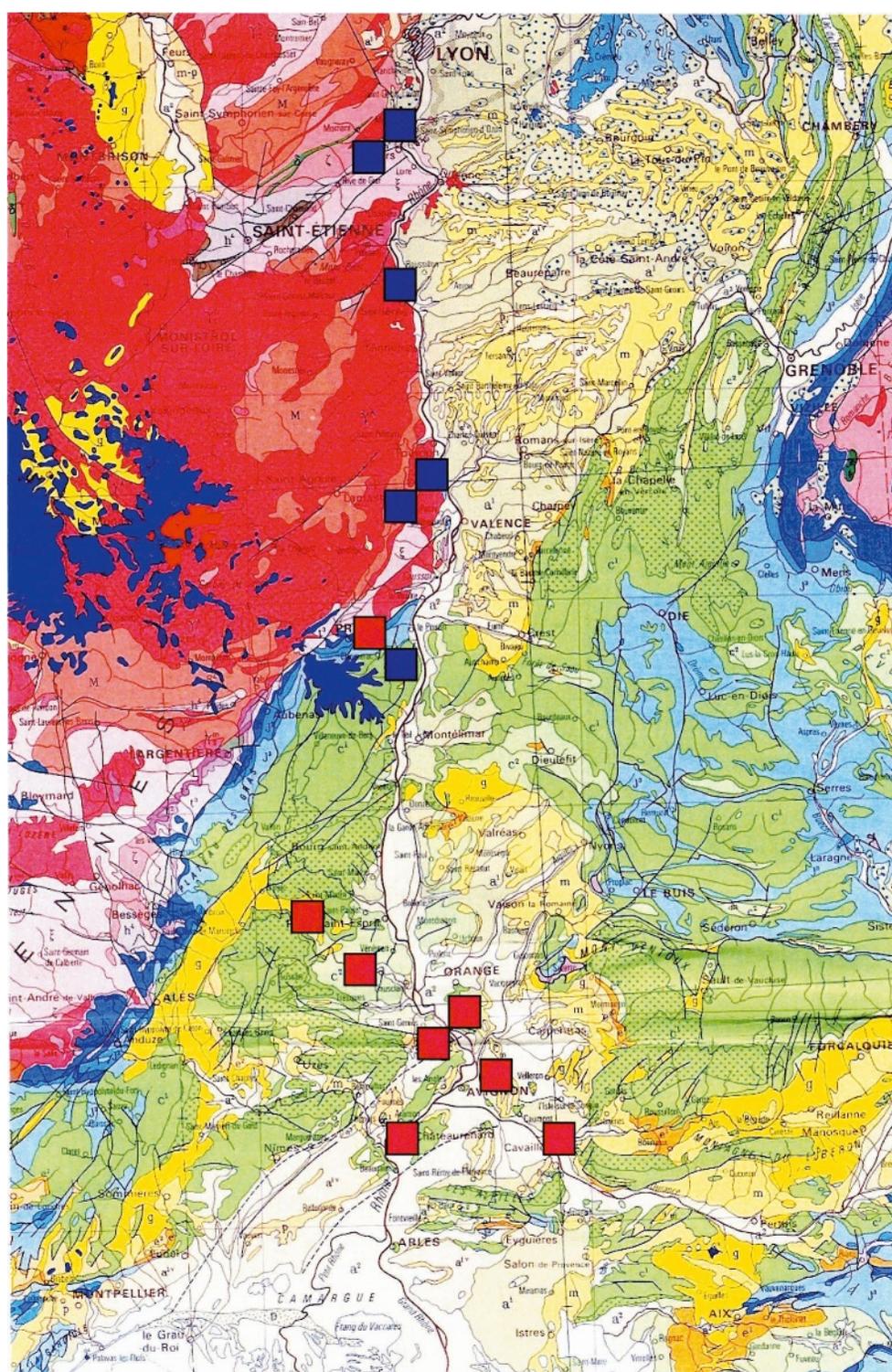
À titre d'information, la norme P 18556 donne les vitesses maximales sur roches suivant leur type pétrographique (Tableau I).

Essais de chute

Ils ont été réalisés suivant le principe développé dans le guide LCPC « Les enrochements » [2] et sur les 30 blocs ayant servi aux essais d'indice de continuité (Fig. 6). La surface de réception des blocs en carrière a été parfois adaptée ; elle est constituée d'un gros bloc et parfois par le carreau de la carrière, l'objectif étant d'obtenir une surface d'impact non déformable. On détermine visuellement le pourcentage de blocs cassés ou fissurés.

Essais de gélivité

Ceux-ci sont pratiqués sur cinq éléments rocheux d'au moins 15 cm de longueur. L'essai consiste à mesurer, sur les mêmes points et suivant trois directions, la perte d'indice de continuité après 25 cycles de gel. L'amplitude et la durée des cycles sont celles de la norme NF EN 1926 [7]. En complément à la norme, les échantillons sont saturés en eau au début des séquences hors gel des cycles ; l'eau est évacuée avant les séquences de gel. Le pourcentage de perte défini par le laboratoire de la CNR doit être inférieur à 15 % pour quatre des cinq blocs testés.



- carrière de roche calcaire
- carrière de granite ou migmatites ou basalte

Fig. 4
Extrait de la carte géologique de la France au 1/1 000 000 (BRGM 1968).



■ Fig. 5
Mesure de l'indice de continuité.



■ Fig. 6
Essai de chute en carrière.

TABLEAU I
Vitesse longitudinale maximale des ondes soniques suivant la nature des roches
(Extrait de la norme P 18556)

Roches	Vitesse maximale (m/s)
Amphibolites	6 500
Calcaire et calcaire cristallin	6 500
Diorites	6 500
Gabbros	7 000
Granites	6 000
Autres roches métamorphiques	6 000
Roches siliceuses	6 000

Essai (nouvellement mis au point) de chocs thermiques

L'échantillon, d'environ 20 × 10 × 10 cm, est mis en contrainte pour éviter tout mouvement de dilatation libre à la base du bloc. La partie supérieure est chauffée, un seul côté étant régulièrement humidifié.

L'échantillon est soumis à 160 cycles de 4 heures (3 heures de chauffe, 1 heure de refroidissement). Les températures extrêmes à cœur varient de 20 à 75 °C environ.

La mesure en continu (toutes les 10 min) de la dilatation verticale et horizontale et le relevé des températures de surface et à cœur permettent de visualiser l'évolution de l'amplitude de la dilatation, en liaison avec une modification de la structure de la roche.

En parallèle, et de manière à établir des corrélations avec les autres résultats, des essais d'indice de continuité et des lames minces sont pratiqués sur les parties arrosées ou sèches ainsi que celles n'ayant pas subi les cycles de température (zone inférieure de l'échantillon).

La durée de l'essai (30 jours) représente environ 20 ans de vieillissement naturel.

Plusieurs critères ont donc été retenus pour mettre en évidence la sensibilité de la roche aux cycles thermiques :

- critère de teinte de la roche calcaire,
- critère de dilatométrie,
- critère d'indice de continuité.

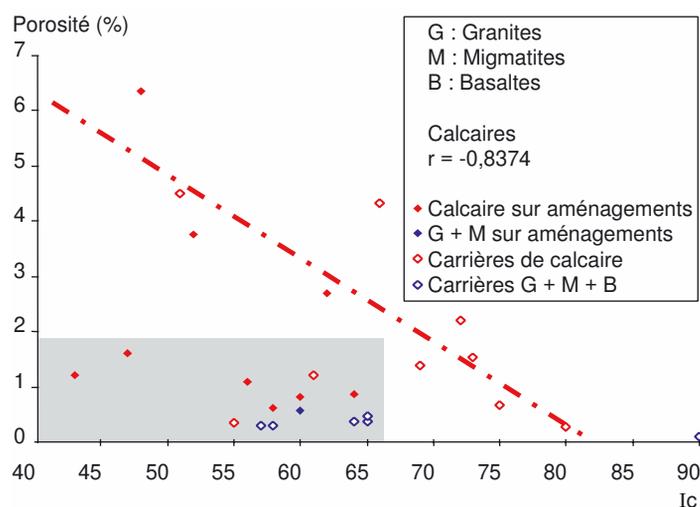
Corrélations

Pour rechercher des corrélations éventuelles, les résultats ont été regroupés par famille de roches identifiées, ce qui limite les corrélations à des groupes de 10 à 15 valeurs.

Porosité / Indice de continuité

L'indice de continuité, noté I_c , est mesuré ici sur des blocs représentatifs de la blocométrie en place et non sur de « petits » blocs retaillés au laboratoire, ces derniers n'étant en effet pas représentatifs des discontinuités réelles de la roche testée.

Dans la pratique, on a été amené à mesurer des blocs de tailles allant de 20 cm à plus d'un mètre d'épaisseur. La figure 7 présente les résultats obtenus.



■ Fig. 7

Porosité en fonction de l'indice de continuité.

On constate un fuseau d'ensemble pour les calcaires testés en place ou lors des essais en carrière. Le coefficient de corrélation linéaire trouvé, en excluant les roches clairement identifiées comme étant évolutives (lors des essais en carrières ou après les essais de vieillissement accéléré par cycles thermiques) ou comme ayant déjà évolué (cas des roches en place) est de $-0,8374$.

Il est par ailleurs bien connu que l'indice de continuité varie en fonction de la porosité et de la présence de discontinuités dans la matrice rocheuse (fissures). D'après [2], il est ainsi possible de calculer un degré de fissuration (noté D_f) en utilisant la relation : $D_f = 100 - 1,4 p - I_c$.

Si l'on applique cette relation aux valeurs dont nous disposons sur les calcaires, valeurs issues aussi bien des essais en carrière que des essais sur enrochements en place depuis une trentaine d'années, on constate que le degré de fissuration varie de 19 à 55 environ.

Il est intéressant de noter que les essais en carrière donnent majoritairement des valeurs faibles du degré de fissuration (inférieures à 35 pour les deux tiers des carrières) alors que les essais sur les matériaux en place correspondent à des valeurs nettement plus fortes de ce degré de fissuration (supérieures à 39 dans 80 % des cas).

Cette différence traduit, outre des caractéristiques intrinsèques aux roches, une évolution physico-chimique de la roche en place. On note donc l'existence d'un seuil se situant entre 35 et 40, correspondant à une évolution pathogène de la roche du fait de son vieillissement.

Masse volumique / Porosité

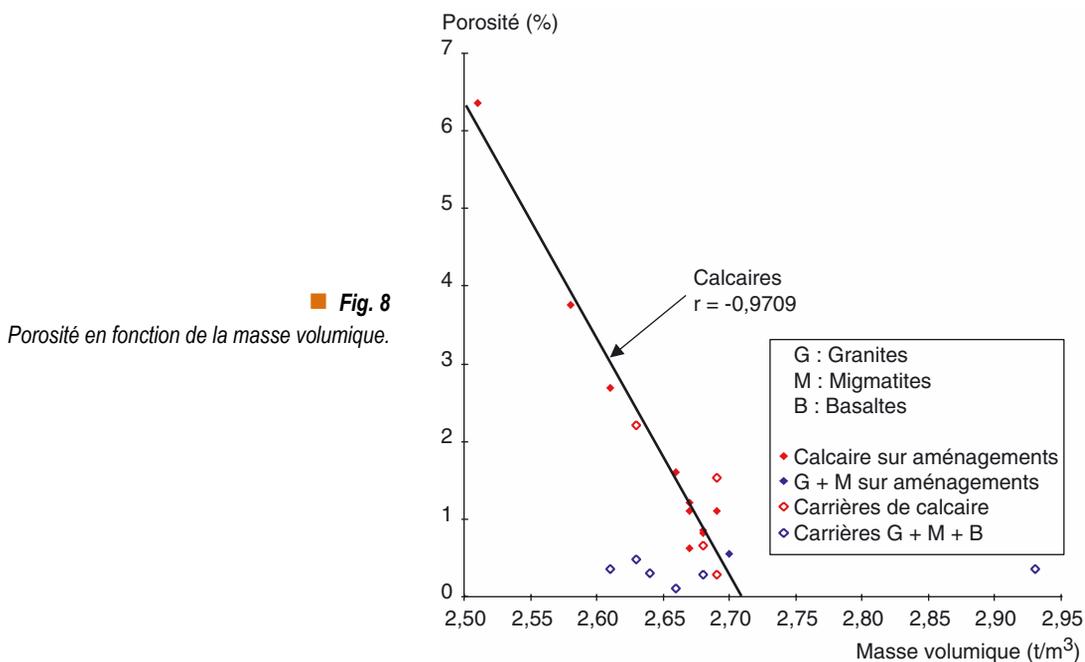
La nature pétrographique de la roche joue ici un rôle capital.

En effet, les roches magmatiques sont issues de la cristallisation lors du refroidissement d'un magma visqueux. Les cristaux occupant la totalité de l'espace disponible, les porosités associées sont faibles : de 0,06 à 1,8 %. La masse volumique varie en fonction de la composition chimique du magma originel : de 2 400 à 2 800 kg/m^3 pour les granites, de 2 800 à 3 000 kg/m^3 pour les basaltes.

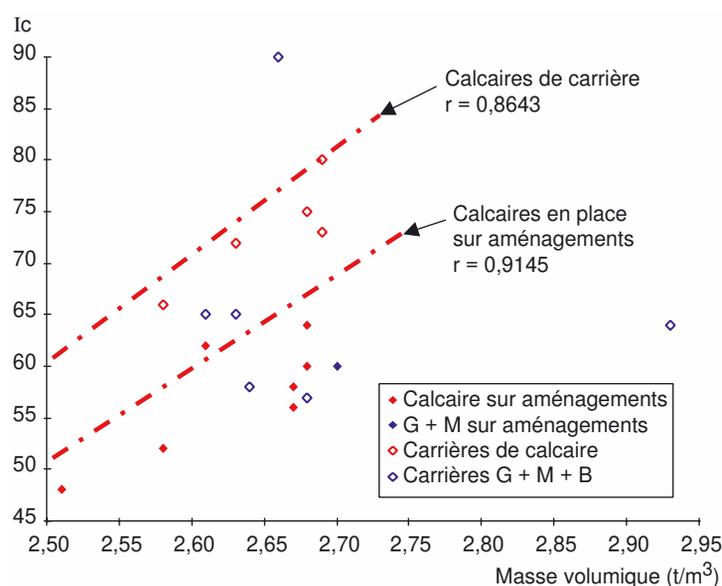
Les calcaires sont sujets à des variations bien plus marquées en fonction du mode de formation : la porosité des pierres calcaires s'échelonne ainsi de 0,3 à 48 %. La masse volumique reflète cette grande diversité puisqu'elle varie de 1 500 à 2 720 kg/m^3 (Pierres de carrières et produits manufacturés / éd. CATED 1991 [8]).

Les résultats obtenus à partir d'environ 60 essais confirment les remarques précédentes (Fig. 8).

Les données disponibles sur les calcaires (en carrière et sur aménagements) présentent une très bonne corrélation linéaire entre la masse volumique et la porosité, avec un coefficient de corrélation linéaire de $-0,9709$.



■ Fig. 10
Indice de continuité en fonction
de la masse volumique.



Il est à noter que les calcaires ayant vieilli sur site ont des indices de continuité plus faibles que ceux testés en carrière. On retrouve là le fait que, dans le cas d'une roche évolutive, un bloc en place depuis plusieurs années sur un aménagement voit un développement de sa microfissuration, ce qui entraîne une baisse de son indice de continuité.

En 30 ans de conditions réelles d'exposition, on aurait ainsi une baisse de l'indice de continuité d'environ 15 points, ce qui explique la nécessité de remplacer les blocs dégradés (rechargement en blocométrie) et d'optimiser ce remplacement par un choix de matériaux pérennes.

Essai Los Angeles / Essai de chute

Il était intéressant de mettre en relation ces deux essais puisque ceux-ci donnent une idée de la résistance au choc du matériau. Pour l'essai Los Angeles, on travaille à l'échelle centimétrique (taille du granulats) alors que, pour l'essai de chute, on travaille à l'échelle décimétrique ou métrique (taille du bloc). On change donc de facteur d'échelle (d'un facteur 10 à 100).

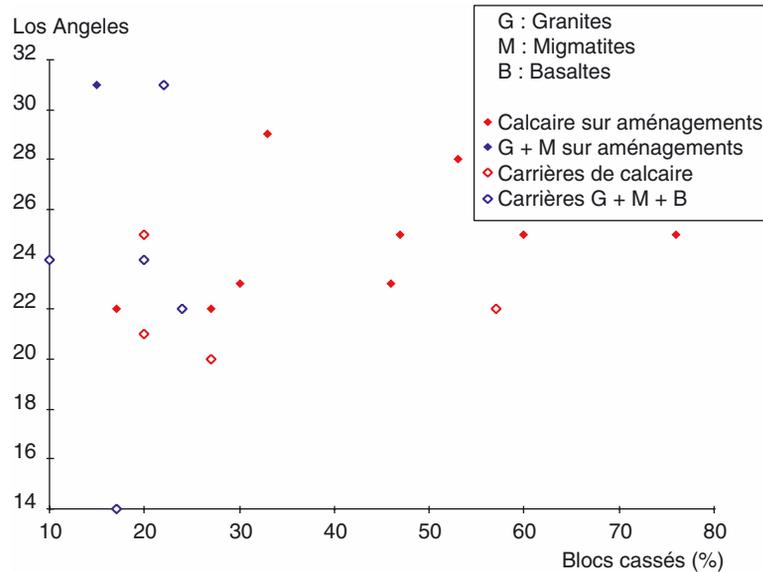
Compte tenu de l'effet d'échelle, il n'est pas possible de mettre en évidence une quelconque corrélation entre ces deux essais (Fig. 11). En effet, le changement d'échelle ne permet pas de tester la roche dans son ensemble lors de l'essai Los Angeles ; seule la nature cristalline est testée alors que le vécu de la roche (fissuration, etc.) est occulté.

En fait, on teste avec l'essai Los Angeles les petits morceaux de bonne qualité, découpés par la fissuration interne du bloc. Il est donc impératif de travailler à une échelle représentative du bloc dans ses conditions réelles de fonctionnement.

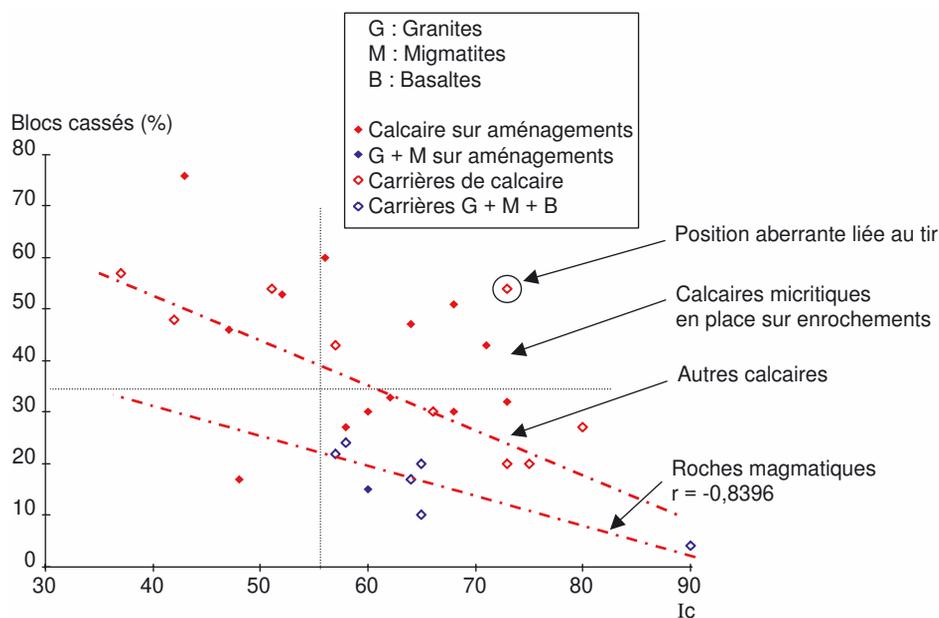
L'essai Los Angeles « gomme » des hétérogénéités de la roche prise à l'échelle du bloc, pouvant conduire à accepter un matériau intrinsèquement correct, mais vicié par l'histoire géologique ou les conditions de tir en carrière.

Pourcentage de blocs cassés / Indice de continuité

La corrélation globale entre ces deux paramètres est bonne pour les essais en carrière puisque le coefficient de corrélation linéaire trouvé est de $-0,838$, toutes pétrographies confondues (Fig. 12). Si l'on fait la distinction entre les roches calcaires d'une part et les roches magmatiques d'autre part, il est alors possible d'affiner ce résultat.



■ Fig. 11
Los Angeles en fonction du pourcentage de blocs cassés.



■ Fig. 12
Pourcentage de blocs cassés en fonction de l'indice de continuité.

Pour les roches calcaires, il faut distinguer schématiquement les trois cas suivants :

- ① une première famille correspond aux calcaires mi-critiques en place sur aménagement ;
- ② une seconde famille, sensiblement parallèle à la première, correspond à tous les autres calcaires, tant en place sur aménagement qu'en carrière ;
- ③ une position aberrante, identifiée lors d'essais en carrière, est liée aux conditions de tir.

Pour les roches magmatiques, on trouve une bonne corrélation linéaire avec un coefficient de $-0,8396$.

On peut également noter que pour les enrochements récemment extraits de carrière, la totalité des résultats de blocs cassés inférieurs à 35 % correspond à un indice de continuité supérieur à 55-60.

Cycles thermiques

Lors de cet essai, il faut rappeler que la partie inférieure du bloc est contrainte et que seule la partie supérieure peut se dilater lors des montées en température. La dilatation en partie supérieure du bloc testé a été enregistrée et qualifiée de *critère de dilatométrie*. Dans le même temps, l'évolution de l'indice de continuité a été mesuré avant et après réalisation des cycles. Enfin, il a été constaté que certaines roches présentaient une évolution de leur teinte après cycles.

Les principaux résultats et corrélations obtenus sont les suivants.

Critère de teinte de la roche calcaire

La roche réputée saine ne montre pas d'évolution de teinte. La roche réputée être en cours d'altération vire du gris-beige au gris-bleu.

Critère de dilatométrie

La roche réputée saine montre un palier dont l'étendue s'accroît avec le nombre de cycles. La roche réputée être en cours d'altération montre des hétérogénéités non corrélées avec les sautes de températures, probablement en liaison avec la dissipation brutale de contraintes correspondant vraisemblablement à l'ouverture de fissures.

Critère d'indice de continuité

Les valeurs d'indice de continuité chutent de 10 points dans le cas de la roche réputée être altérable, alors que les mesures restent similaires pour la roche réputée saine. Dans le cas de la roche réputée saine, la fissure semble inactive : l'indice de continuité reste constant. Dans le cas de la roche réputée être en cours d'altération, la fissure est active : l'indice de continuité perd 15 à 20 points. Cet essai s'est révélé particulièrement pertinent en ce qui concerne les roches calcaires.

Les résultats de ces essais ont été corrélés de manière satisfaisante avec des observations sur les roches en place. En particulier, les observations réalisées sur lames minces en microscopie optique, en lumière polarisée et analysée, ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- concernant les roches calcaires, et plus particulièrement les calcaires micritiques*, il s'avère que la présence de microcristaux de pyrite (sulfure de fer) dans la matrice de la roche est à l'origine d'un changement de teinte (calcaire initialement beige devenant gris-bleu) avec amorce d'une microfissuration au sein de la roche, parallèle aux bords testés ;
- concernant les roches granitiques et migmatitiques, les micas ferreux peuvent s'altérer, ce phénomène s'accompagnant également de l'apparition d'une teinte brunâtre dans la masse de l'échantillon.

Compte tenu de la mise en œuvre délicate de ce test de vieillissement accéléré par cycles thermiques et de sa durée assez longue (un mois), il s'avère au final plus simple, dans le cas d'agrément de carrières, de se contenter de réaliser des lames minces des roches à tester et de chercher la présence de pyrite dans le cas des calcaires et des traces d'amorce d'altération des micas dans le cas des roches granitiques.

Approche pétrographique

Il convient de distinguer les roches sédimentaires (calcaires) des roches cristallophylliennes (granites, migmatites, etc.).

Roches sédimentaires

Les calcaires rencontrés lors de cette étude se répartissent très schématiquement en deux grandes familles : les calcaires de type coquillier et les calcaires de type micritique.

Les calcaires coquilliers résultent de l'accumulation de débris d'organismes et montrent le plus souvent un aspect sacchararoidal net. En lames minces, il est possible de visualiser facilement ces débris d'organismes (foraminifères, etc.) répartis au sein d'une matrice de gros cristaux de calcite (sparite). Certains de ces calcaires coquilliers peuvent être quartzeux.

* *Micrite* : contraction de l'anglais *microcrystalline* et *calcite* ou boue de calcite en particules de 1 à 4 microns impliquant une formation en eau très calme. Extrait du dictionnaire de géologie, A. Foucault et J.-F. Raoult, 2^e édition de 1984.

Les calcaires micritiques résultent de la consolidation d'une boue et présentent donc une matrice constituée de très petits cristaux de calcite. Les calcaires micritiques observés, tant sur site qu'en carrière, sont tous azoïques (pas de fossiles visibles). On note la présence de petits grains de quartz. Très sporadiquement, quelques gros cristaux de calcite montrent des teintes de polarisation vives.

Certains des calcaires micritiques observés montrent une légère orientation préférentielle traduisant des déformations subies durant leur évolution géologique. Ces calcaires micritiques se répartissent assez facilement en deux sous-familles :

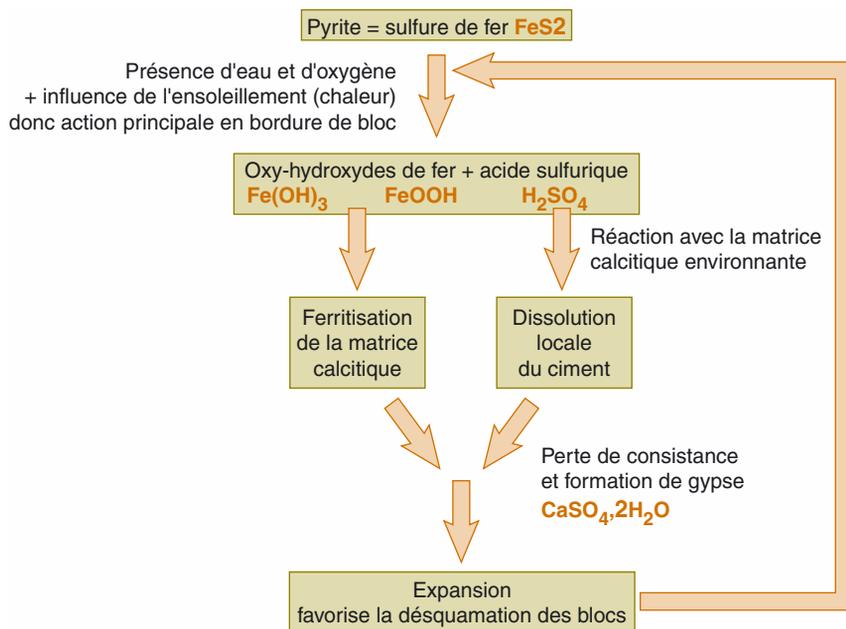
- des roches de teinte généralement à dominante beige (plus ou moins saturé), de qualité satisfaisante, tant en carrière que sur site, après plusieurs années d'exposition. Sur lames minces, les observations réalisées montrent une roche sans aucun signe d'altération ;
- des roches de teinte généralement à dominante gris-bleuté, montrant une évolution pathogène sur site : desquamation de surface, fissuration, mauvaise tenue lors des essais sur site. Sur lames minces, on constate de manière quasi systématique de nombreuses fissures orientées de manière parallèle aux bords du blocs, d'autant plus ouvertes que l'on se situe en bordure de bloc. La matrice micritique montre une ferritisation diffuse à partir de points bien localisés, correspondant à de petits cristaux anguleux, de teinte rouille en lumière naturelle. Lors de la préparation des lames minces, il a été également constaté que les calcaires micritiques de teinte gris-bleu dégageaient une odeur très particulière de type H₂S (odeur fétide).

Au final, on propose donc l'hypothèse suivante : les changements de teinte observés résultent de la dégradation de microcristaux de pyrite selon le schéma réactionnel décrit sur la figure 13.

Cette hypothèse de travail est en bon accord avec l'observation de terrain suivante : les blocs protégés par la végétation (donc recevant moins de précipitations directes et surtout protégés des variations importantes de température liées à l'ensoleillement) sont dans l'ensemble mieux conservés. Il en est de même pour les blocs enterrés.

Roches cristallophylliennes

Concernant les granites et les migmatites rencontrés lors des essais, on a constaté la concordance de résultats médiocres avec l'observation sur lames minces de micas en cours d'altération, libérant des oxydes de fer plus ou moins hydratés, à l'origine d'efforts de traction créant une microfissuration préjudiciable à la tenue du bloc dans le temps.



■ Fig. 13
Schéma réactionnel de l'oxydation des microcristaux de pyrite.

ENSEIGNEMENTS TIRÉS DES ESSAIS

Enseignements sur les méthodes d'essais et les spécifications

Les résultats ayant été obtenus sur une quantité importante d'échantillons, qui varie entre 35 et 80 suivant les essais, on peut en tirer un certain nombre d'enseignements.

Certains essais ne sont pas suffisamment discriminant, en particulier :

- *la masse volumique et la porosité* : en effet, les roches rencontrées le long de la vallée du Rhône ont, dans la grande majorité des cas, une masse volumique supérieure à $2\,500\text{ kg/m}^3$ et une porosité inférieure à 3 à 4 % pour les calcaires. Ce sont donc des roches peu poreuses et les critères de sélection par ces caractéristiques ne sont pas opérants ;
- *la résistance en compression moyenne sur carotte* : celle-ci est pratiquement toujours supérieure à 80 MPa. Ce critère, compte tenu du mode de fabrication des échantillons, n'intéresse que la matrice de la roche et fournit une information optimiste par rapport à la résistance en grand du bloc ;
- *l'essai Los Angeles* : cet essai de chocs, très utilisé dans le domaine des granulats, varie pour l'ensemble des matériaux testés dans une fourchette de 20 à 30. Cette faible variation ne permet pas de discerner des matériaux qui, à l'échelle du bloc, sont très différents. Cet essai n'est donc pas représentatif d'un comportement de la roche à l'échelle de l'enrochement.

Globalement, dans le cas de la vallée du Rhône, les prescriptions habituelles sur la masse volumique, la porosité, la résistance en compression ou l'essai Los Angeles n'interdisent que l'emploi de roches, du type calcaire tendre, utilisées par exemple en cimenterie.

D'autres essais, lorsque les spécifications sont bien « calées » sont intéressants :

- Les mesures d'indice de continuité sur site, qui représentent bien l'état réel des blocs testés. Des valeurs moyennes au dessus de 70 correspondent à des enrochements peu altérés et peu poreux. Les valeurs moyennes inférieures à 50 correspondent à des matériaux poreux ou altérés. Entre ces deux valeurs, l'analyse des autres paramètres permet de vérifier si la qualité des matériaux est suffisante.
- Les essais de chute, réalisés après les essais d'indice de continuité, qui permettent classiquement, en fonction du nombre de blocs cassés par tranche de valeurs d'indice de continuité, de définir un seuil minimal d'indice de continuité à retenir pour la roche testée [2]. Cet essai peut également être utilisé comme moyen de contrôle rapide de la qualité des blocs livrés. Pour les besoins de la CNR, il a été constaté que, pour un lot dont le pourcentage de blocs cassés est inférieur à 35, l'indice de continuité moyen de ce lot est supérieur à 60.
- Les résultats des essais de gélivité, qui dépendent fortement du choix, de la taille, de la forme et du mode de fabrication des échantillons. Le test de gélivité est plus sévère avec la méthode proposée par le laboratoire CNR, qu'avec les méthodes plus couramment utilisées sur granulats ou carottes. Il faut cependant noter que, dans le cadre d'agrément de matériaux de carrière, ce sont les essais initiaux sur site (indice de continuité et chute) qui écartent la majorité des gisements de qualité insuffisante. Dans ce cas, les tests de gélivité ne sont pas réalisés.
- L'essai de vieillissement accéléré par cycles thermiques, mis au point pour recréer et analyser les phénomènes de desquamation ou de fracturation rencontrés sur certains types de roches. Cet objectif a été atteint. Cependant, sa mise en œuvre étant délicate et sa durée assez longue, il s'est avéré que la recherche de pyrite dans les calcaires ou de micas altérés dans les roches granitiques au moyen de lames minces représentait une méthode plus simple pour identifier les roches à risques. La mise en œuvre de l'essai de vieillissement accéléré par chocs thermiques est à réserver aux cas d'études spécifiques.

Application aux protocoles d'essais sur berges et en carrières

Au début de l'étude, les méthodes retenues, surtout constituées d'essais physiques et mécaniques de laboratoire normalisés, en particulier les essais Los Angeles, Micro-Deval, compression, porosité ou gélivité ont conduit à des résultats peu représentatifs des constats de terrain.

Par exemple, pour les calcaires, les prélèvements, bien que réalisés à partir d'éléments d'enrochements dégradés, conduisaient paradoxalement à des résultats de bonne qualité.

L'adaptation a été faite en constatant que les méthodes de laboratoire utilisées sur des échantillons de quelques centimètres ne prenaient pas suffisamment en compte la macrostructure de l'enrochement (fissuration naturelle d'ordre décimétrique ou liée à des tirs) et les évolutions liées à la nature minéralogique visible sur la microstructure. Finalement, les critères retenus pour porter un jugement sur la qualité des enrochements furent :

- en premier lieu et sur berges uniquement, la masse moyenne des enrochements en place ;
- ensuite, la géologie de terrain, qui permet une approche pétrographique (en particulier pour identifier les minéraux évolutifs) et structurale (pour vérifier la capacité de la carrière à produire des blocs de taille suffisante) ;
- puis, également, la mesure de l'intégrité de l'enrochement, évaluée au moyen de l'indice de continuité et de l'essai de chute sur blocs entiers ;
- enfin, la durabilité de l'enrochement. Pour cela, on a procédé sur des échantillons de taille importante à des tests de gélivité et/ou de vieillissement accéléré par chocs thermiques et recherché des altérations minéralogiques sur lames minces.

Il est apparu finalement que ce sont les mesures sur échantillons à l'échelle la plus proche de l'unité (voire décimétrique) ou, à l'inverse, à une échelle microscopique qui se sont révélées les plus intéressantes. Les essais à l'échelle centimétrique ne sont pas pertinents.

Enseignements sur les corrélations entre essais

On a tenté d'établir des corrélations par couples d'essais.

On a constaté en particulier qu'on ne pouvait pas établir de lien entre la résistance en compression et la masse volumique, même pour des roches d'une même famille, en l'occurrence des calcaires.

De la même façon, aucune relation n'a été trouvée entre deux essais de chocs tels que l'essai Los Angeles sur granulats et l'essai de chute de blocs. L'échelle trop réduite des échantillons utilisés pour l'essai Los Angeles semble être une explication.

Pour les calcaires, il y a une assez bonne corrélation entre la porosité (ou la masse volumique) et l'indice de continuité, à condition de séparer les roches récemment extraites de carrière et les roches ayant subi un vieillissement météorologique. Ce décalage peut s'expliquer par une microfissuration plus forte du second groupe entraînant une baisse de l'indice de continuité. Il semblerait qu'une exposition supérieure à 20 ans pour des matériaux évolutifs se traduise par une diminution de l'ordre de 15 points de l'indice de continuité.

Les meilleures corrélations se situent au niveau du couple porosité/masse volumique, ce qui paraît logique, mais également au niveau du couple d'essais sur site pourcentage de blocs cassés / indice de continuité. Il faut cependant avoir préalablement regroupé les roches par familles.

CONCLUSION

Les aménagements à buts multiples (hydroélectricité, navigation, irrigation) du Rhône à l'aval de Lyon sont en service depuis 20 à 50 ans. Tout au long de cette période, les berges des retenues endiguées, en général protégées par des revêtements en enrochements, ont subi des agressions d'origine hydraulique (batillage, vitesse du courant) et météorologique (gel, ensoleillement, etc.) qui ont entraîné des travaux d'entretien croissants. Compte tenu de l'enjeu financier, les services de la CNR chargés de l'entretien des aménagements ont lancé une série d'études-diagnostic qui ont abouti à un plan pluriannuel d'entretien hiérarchisant les priorités. Un volet important de ces études a consisté à caractériser la qualité des enrochements en place. Il a été mis en évidence qu'une des causes principales de la dégradation de la qualité des protections des berges était la nature géologique évolutive des roches. Près de 400 mesures physiques, mécaniques ou pétrographiques ont été réalisées à cette occasion.

Les corrélations entre les résultats des différents essais ont été étudiées. Un protocole d'agrément de carrière et un essai de vieillissement accéléré des roches ont été mis au point. Les spécifications d'essais mécaniques sur enrochements ont été améliorées.

Les méthodes d'investigation les plus intéressantes sont obtenues à partir :

- d'essais sur site (indice de continuité, essais de chute, pétrographie de terrain) ;
- d'essais de laboratoire sur échantillons de taille importante (gélivité) ou sur la microstructure (porosité, lames minces).

L'exemple de l'étude-diagnostic de longue haleine menée par la CNR montre que l'exigence d'optimisation de l'entretien des grands ouvrages peut conduire à faire évoluer les méthodes d'évaluation de la qualité des matériaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] COMTET A., MATHURIN J.-L., DIVET E., PERRIER J., Réalisation d'un schéma directeur d'entretien des protections de berges du Rhône aménagé, *Congrès AIPCN de Sydney*, **2002**.
- [2] LCPC, *Les enrochements*, 1^{ère} éd, Ministère de l'Équipement, Vol. 1, **1989**, Paris, 106 pages.
- [3] Norme NF B 10 503, *Porosité et masse volumique sur pierres naturelles*, AFNOR, **1973**.
- [4] Norme NF B 10 509, *Résistance en compression sur pierres naturelles*, AFNOR, **1973**.
- [5] Norme P 18 573, *Essai Los Angeles sur granulats*, AFNOR, **1973**.
- [6] Norme P 18 556, *Détermination de l'indice de continuité sur granulats*, AFNOR, **1990**.
- [7] Norme NF EN 1926, *Méthodes d'essai pour pierres naturelles – Détermination de la résistance en compression*, AFNOR, **1999**.
- [8] CATED, *Pierres de carrières et produits manufacturés*, **1991**.