

La pierre de construction, matériau du développement durable

Depuis l'époque préhistorique, l'homme n'a eu de cesse d'extraire la pierre pour son usage quotidien. Il l'a toujours considérée comme noble car durable, dans le sens « qui résiste au temps », l'utilisant jusqu'à une époque récente comme principal matériau de construction. Aujourd'hui la pierre doit apporter la preuve qu'elle répond bien aux principes du développement durable, afin de figurer en bonne place parmi les matériaux de construction de demain.

Abattage d'une quille de roche calcaire dans la carrière de Massangis, Yonne, Bourgogne.

Extraction of a limestone wedge in the Massangis quarry, Yonne Department, Burgundy.

© F. Michel
http://monumat.brgm.fr



David Dessandier
Directeur régional PACA
BRGM
d.dessandier@brgm.fr



Shahinaz Sayagh
Chef de projet
Centre technique de matériaux naturels de construction (CTMNC)
s.sayagh@ctmnc.fr



Philippe Bromblet
Ingénieur de recherche
Centre interrégional de conservation et restauration du patrimoine (CICRP)
philippe.bromblet@cicrp.fr



Lise Leroux
Ingénieur de recherche
Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH)
lise.leroux@culture.gouv.fr

La pierre de construction à travers les temps

Dans l'Antiquité, les difficultés d'extraction ont d'abord fait de la pierre un matériau de prestige dédié à la construction de bâtiments symbolisant le pouvoir ou le divin, alors que le bois et la terre étaient utilisés pour les constructions à usage plus banal. Plus récemment, les évolutions technologiques ont permis d'améliorer les techniques d'extraction et de taille, autorisant l'usage de la pierre dans des édifices plus variés. Nombre d'ouvrages sont toujours observables aujourd'hui, des centaines, voire des milliers d'années après leur édification, témoignant du savoir-faire des hommes et de la durabilité des pierres.

> *« Les difficultés d'extraction ont d'abord fait de la pierre un matériau de prestige. »*

En France, la grande diversité des formations géologiques (*figure 1*) s'est naturellement traduite par une grande variété de pierres dimensionnelles[1] en œuvre. Le Val de Loire a

(1) Les pierres dimensionnelles désignent les pierres extraites de carrières sous forme de blocs, par opposition aux pierres exploitées pour les granulats.

ainsi bénéficié de la facilité d'extraction du tuffeau, pierre tendre et présente en grandes masses. Les grès triasiques ont été largement utilisés dans les constructions alsaciennes, tout comme les granites dans le Massif armoricain, les molasses tertiaires le long de la vallée du Rhône, ou certaines roches volcaniques en Auvergne. Les bâtisseurs ont su tirer parti de cette diversité de la ressource en utilisant les pierres de manière appropriée. Ainsi, le soubassement de la cathédrale d'Amiens présente plusieurs assises de blocs de grès qui étaient peu capillaires[2] ; les parties hautes ont pu être construites en craie, matériau plus tendre, permettant une sculpture plus aisée et plus fine. Avant le XIX^{e} siècle, les pierres de construction étaient souvent extraites de carrières proches des édifices, minimisant ainsi le coût de transport et de la manipulation. Cependant, dès l'Antiquité, certaines pierres de renommée particulière ont fait exception. Pour exemple, le « Grand Antique » extrait dans une carrière à Aubert (Ariège) est reconnaissable dans de nombreuses cités romaines du pourtour méditerranéen. De même, le « Liais », calcaire fin qui affleurait uniquement dans le sous-sol de Paris, se retrouvait dans les portails sculptés de nombreuses cathédrales (Chartres, Sens, Auxerre).

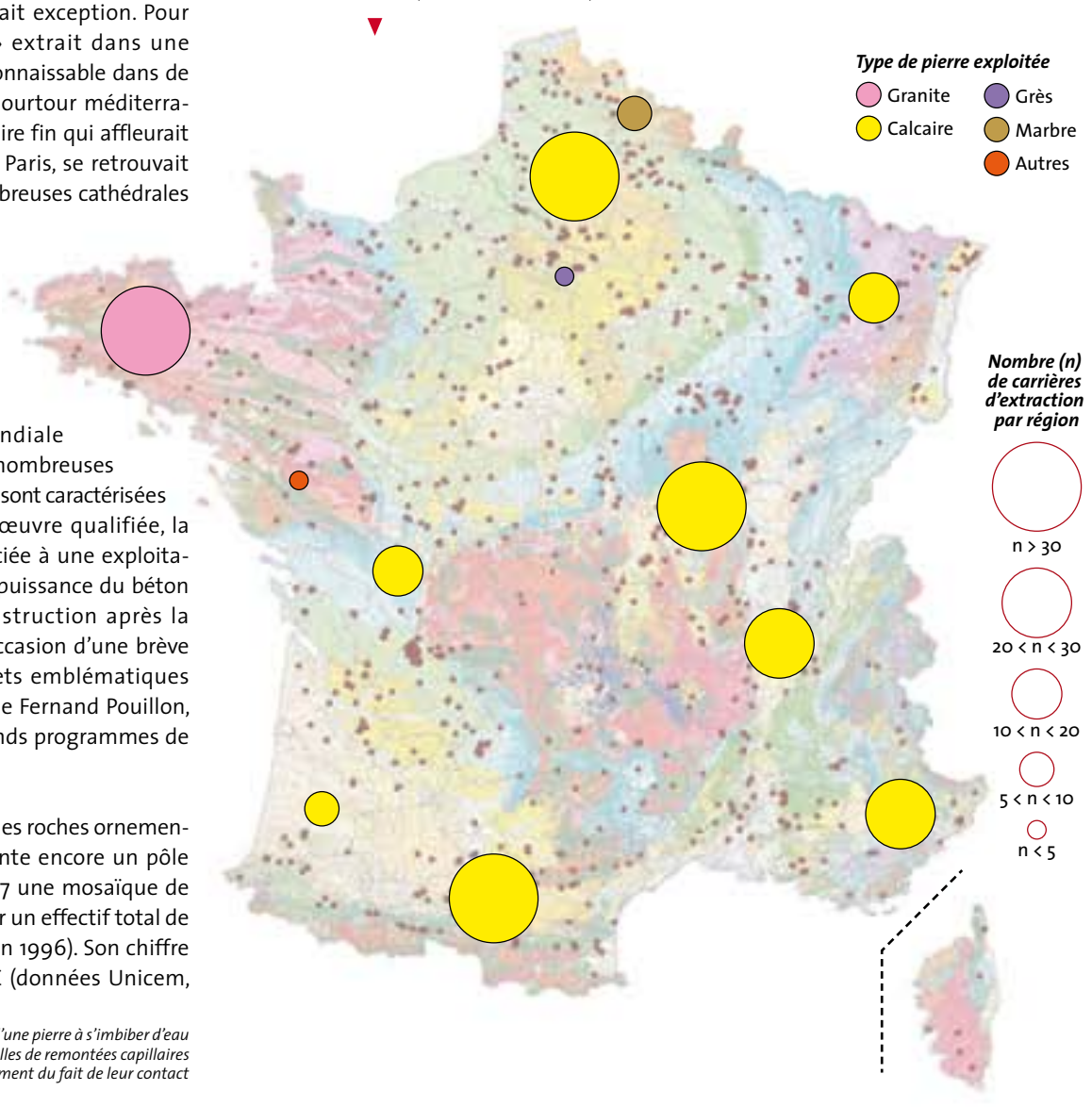
À partir du XIX^{e} siècle, on voit apparaître sur le marché de la construction parisienne les pierres de la vallée de l'Aisne, de Côte-d'Or, de l'Yonne ou de la Meuse. La première guerre mondiale entraîne la mise en sommeil de nombreuses carrières. Les années d'après-guerre sont caractérisées par la raréfaction de la main d'œuvre qualifiée, la diminution des savoir-faire associée à une exploitation mécanisée et la montée en puissance du béton dans les années 1930. La reconstruction après la seconde guerre mondiale est l'occasion d'une brève embellie marquée par des projets emblématiques portés par des architectes comme Fernand Pouillon, qui intègre la pierre dans les grands programmes de construction.

Aujourd'hui, l'industrie française des roches ornementales et de construction représente encore un pôle important d'activité avec en 2007 une mosaïque de 923 entreprises (954 en 1996) pour un effectif total de 7 687 personnes (près de 9 200 en 1996). Son chiffre d'affaires total était de 776,1 M€ (données Unicem, [*Pierre Actual* (2009)]. La filière est caractérisée par la grande diversité des matériaux extraits, avec la prédominance des pierres calcaires et marbres (272 000 m^3 extraits), des granites et roches similaires (124 500 m^3) suivis d'assez loin par les grès de construction (18 200 m^3) et les ardoises (10 100 m^3).

Figure 1 : Carrières actives hors granulats (pierres de construction, pierres ornementales, argiles, pierres pour l'industrie minérale...) en France métropolitaine, sur fond géologique au 1/1000 000.
Un site internet en cours de développement par le BRGM donnera accès à ces données à compter de janvier 2010.

Figure 1: Quarries in activity in metropolitan France, exclusive of aggregates (building and ornamental stones, clays, stones for the mineral industry...) plotted on the 1:1000 000 geological map of France.
A web site is being developed by BRGM which will allow these data to be accessed as of January 2010.

© BRGM, Observatoire des matériaux, CTMNC.



(2) La capillarité désigne l'aptitude et la vitesse d'une pierre à s'imbiber d'eau à pression atmosphérique ; les zones préférentielles de remontées capillaires sont habituellement les soubassements de bâtiment du fait de leur contact avec le sol.

« La pierre reste une ressource fragile, nécessitant une exploitation raisonnée. »

En 1995, on dénombrait 323 carrières en activité avec une activité fortement régionalisée dans cinq zones (Bretagne, Midi-Pyrénées, Bourgogne-Franche-Comté, Lorraine et Provence-Languedoc-Roussillon) qui totalisaient 80 % du volume extrait national, pour 66 % du chiffre d'affaires total, 68 % des entreprises et 60 % des effectifs [Thibaut (1996), BRGM (1997)]. Ces dernières années, le développement de nouvelles techniques de préfabrication et de précontrainte ouvrent à la pierre des perspectives d'emplois sophistiqués jusqu'alors réservés au béton (*photo 1*).

Une ressource épuisable entre accessibilité et conflits d'usage

La pierre est une ressource minérale naturelle présente dans le sous-sol français dont la grande diversité des formations géologiques a permis de fournir un large panel de matériaux. Exploité généralement en carrières à ciel ouvert ou parfois en galeries souterraines, chaque gisement de pierre correspond à un volume limité de matériau, répondant à des critères de rentabilité, d'exploitabilité et d'aptitude aux usages pour la construction. Globalement, la pierre de construction constitue une ressource fragile et épuisable, pour laquelle le recyclage est aujourd'hui très limité. Outre la raréfaction, voire l'épuisement des gisements, les questions d'accessibilité à la ressource et de concurrence d'usage des matériaux extraits sont également sensibles, à l'exemple du marbre blanc de Saint-Béat (Haute-Garonne), exploité dès l'époque gallo-romaine comme roche décorative et aujourd'hui réduit sous forme de poudre à usage industriel.

Les carrières, entre acceptation sociale et cadre réglementaire

Tout le monde s'accorde à dire que la pierre est le matériau de construction le plus noble et le plus durable, produit naturel mis en œuvre dans les monuments emblématiques ayant résisté aux siècles. Parallèlement, les carrières (*photo 2*) ne sont pas toujours bien acceptées par les populations riveraines, et les projets



Photo 1 : Colonnes précontraintes en pierres des Lens (Gard) et du mont Caume (Var) dans le chantier de réhabilitation de la gare Saint-Charles à Marseille.

Photo 1: Pre-stressed columns of stone from Lens (Gard Department) and Mont Caume (Var Department) used in the renovation operation of Marseille's Saint-Charles railway station.

© P. Bromblet



Photo 2 : Vue générale d'une carrière de pierre de Comblanchien (Côte-d'Or).

Photo 2: Panoramic view of a Comblanchian limestone quarry (Côte-d'Or Department).

© J.-P. Gauthier, Les Pierres Bourguignonnes SARL

d'ouverture de nouveaux sites s'avèrent toujours compliqués. L'image de la pierre de construction est en effet souvent amalgamée à celle des carrières de granulats, perçues uniquement comme sources de nuisances en oblitérant leur rôle de développement local. Il est ainsi souvent fait abstraction du « développement » pour ne garder en mémoire que le « durable », en oubliant que les matériaux de construction sont nécessaires au développement économique.

Pourtant, l'exploitation des carrières est aujourd'hui extrêmement réglementée. D'un point de vue historique, la loi du 21 avril 1810 instaure un « régime de déclaration » d'exploitation à la mairie laquelle transmet à la préfecture. Le 16 août 1956 est publié le *Code Minier* qui rassemble les textes essentiels relatifs à l'exploitation des gîtes minéraux. Les carrières vivront sous ce régime très libéral de simple déclaration jusqu'à la loi du 2 janvier 1970 qui soumet l'ouverture des carrières à autorisation préfectorale préalable. Un autre tournant majeur est pris avec la loi du 4 janvier 1993 dont l'objet principal est de changer la base juridique des autorisations d'ouverture et d'exploitation des carrières, lesquelles deviennent des installations classées. Parmi les autres grands principes de cette loi, citons : la généralisation des autorisations avec étude d'impact et enquête publique ; l'obligation de constituer des garanties financières pour assurer le réaménagement en cas de disparition ou de défaillance de l'exploitant ; les durées des autorisations ; la création de la commission départementale des carrières, instance consultative examinant les demandes d'autorisation d'exploiter ; le schéma départemental des carrières et le permis d'exploitation. Divers décrets d'application de 1994 à 1996 viennent constituer le dispositif réglementaire du nouveau régime des carrières, notamment le décret du 11 juillet 1994 relatif aux schémas départementaux des carrières. Enfin, depuis 2006 (décret du 31 mai), le régime dérogatoire de la simple déclaration est étendu sous conditions à certaines petites carrières destinées à la restauration des monuments historiques classés ou inscrits... ou à la restauration de bâtiments anciens dont l'intérêt patrimonial ou architectural justifie que celle-ci soit effectuée avec leurs matériaux d'origine.

« Les matériaux de construction sont nécessaires au développement économique. »

Un matériau fragilisé par les pollutions modernes, à adapter aux usages

Comme tout matériau, la pierre de construction subit au fil du temps des processus d'altération, dommageables pour l'esthétique et la conservation des bâtiments. D'origine physico-chimique ou biologique, ces mécanismes sont conditionnés par les caractéristiques intrinsèques de la pierre ainsi que par les conditions d'exposition et d'alimentation du bâtiment en eau et sels dissous.

Les facteurs externes d'altération, plus importants en milieu urbain, se sont amplifiés au cours du temps. Ainsi, à partir du début de l'ère industrielle au XIX^{e} siècle, la pierre a souffert du fort accroissement de la pollution atmosphérique. Les façades des constructions se sont progressivement couvertes de croûtes noires avec des particules carbonées, produites par la combustion du charbon, puis des dérivés du pétrole, qui ont encrassé la pierre. En parallèle, le dioxyde de soufre (SO_2) à l'état gazeux a réagi avec le carbonate de calcium ($CaCO_3$) de la pierre ou des poussières qui la recouvraient pour former du gypse ($CaSO_4$, $2H_2O$). Ce gypse a alors cimenté les particules carbonées pour former des dépôts indurés inesthétiques (*photo 3*).

Il a aussi généré des écaillages et desquamations en plaques en cristallisant sous la surface de la pierre. À l'occasion d'opérations de nettoyage et de restauration, il est fréquent de découvrir sous les « croûtes noires », des patines naturelles anciennes, résultant de dépôts éoliens ou de l'activité des lichens, mousses, algues qui se développaient naturellement sur les pierres avant l'ère industrielle. En milieu rural, la pierre a continué à être colonisée par des organismes et microorganismes. Algues, mousses, lichens et plantes s'y développent à condition d'y trouver la lumière favorable à la photosynthèse et les substances nutritives nécessaires. Ces recouvrements biologiques induisent la formation de patines orangées riches en phosphates et en oxalates de calcium, également observables sous la « croûte noire » des pierres des monuments des villes. Certains organismes libèrent durant leur métabolisme des enzymes et des acides organiques (notamment l'acide oxalique) qui sont capables d'attaquer la surface de la pierre pour former de petites cavités millimétriques caractéristiques, altération appelée « biopitting ».



Photo 3 : Vue partielle du portail ouest de l'église Sainte-Croix à Bordeaux : « croûte noire » et essai de nettoyage (parties beiges).

Photo 3: Detail of the west door of the Sainte-Croix church in Bordeaux: the "black coating", and an attempt at cleaning (beige patches).

© P. Bromblet

De leur côté, les facteurs internes d'altération d'une pierre correspondent aux propriétés intrinsèques suivantes, mesurables par des essais physico-chimiques en laboratoire [Dessandier (2000)] :

– comportement des minéraux constitutifs en présence d'eau (gonflement des argiles, dissolution des carbonates, etc.) ;

– degré maximum de saturation d'eau et volume poreux mobilisable (rôle de « vase d'expansion ») en cas de changement volumique d'un élément (cristallisation saline, gélifraction) ;

– propriétés de transfert d'eau dans le milieu poreux par répétition de cycles d'imbibition-évaporation pouvant mener des cristallisations salines en surface (efflorescences) ou en profondeur ;

– résistance mécanique (qualité des joints de grains) intervenant directement dans la réponse d'une pierre aux sollicitations générées par les cristallisations salines, la gélifraction ou le gonflement de minéraux argileux.

Ces propriétés intrinsèques à chaque type de pierre présagent ainsi de sa « résistance » dans le temps (durabilité intrinsèque), laquelle peut être très différente

La base de données « Monumat »

Isabelle Pallot-Frossard – LRMH – isabelle.pallot-frossard@culture.gouv.fr
Lise Leroux – LRMH – lise.leroux@culture.gouv.fr
Jean Féraud – BRGM – j.feraud@brgm.fr
Patrick Vadala – BRGM – p.vadala@brgm.fr



L'édification du patrimoine bâti a nécessité la mise en œuvre de pierres variées et dotées d'une valeur non seulement culturelle, sociétale et patrimoniale, mais aussi économique. Pour se procurer des pierres d'origine ou de remplacement adaptées aux restaurations, les pouvoirs publics, les architectes et les particuliers rencontrent des difficultés croissantes. De même, les exploitants de carrières accèdent de plus en plus difficilement à la ressource. Certains chantiers de restauration sont ainsi paralysés, ce qui s'avère souvent aussi coûteux que la restauration elle-même.

La base de données « Monumat » (http://monumat.brgm.fr), développée par le BRGM avec la collaboration du Laboratoire de recherche des monuments historiques (LRMH) du ministère de la Culture, a vu le jour fin 2005 afin de faciliter l'accès à la connaissance sur les pierres et la documentation sur les carrières. Cette base, accessible sur Internet par tous les acteurs impliqués dans des chantiers de restauration, rassemble des données sur environ 3 600 monuments, 2 600 carrières et 7 000 pierres. Des actions régionales d'inventaire (Poitou-Charentes, Centre, Réunion, Languedoc-Roussillon) viennent régulièrement l'enrichir.



▲ **Château de Saumur, finalisation des travaux de restauration après l'effondrement du rempart nord, 2001.**

Saumur Castle (Maine-et Loire Department), the final stage of restoration work undertaken subsequent to the collapse of the northern rampart in 2001.

© P. Thierry



◄ **Exemple d'une mauvaise restauration ayant utilisé des pierres incompatibles (chapelle San Michele à Piétralba, Corse). Pour remplacer les calcaires blancs d'origine, non exploités actuellement, des pierres blanches non calcaires, d'apparence adaptée, ont été utilisées. Mais assez rapidement le fer contenu dans ces pierres s'est oxydé, ce qui a apporté une patine disgracieuse. Monumat vise à empêcher ces erreurs.**

An example of bad restauration by incompatible stones (the San Michele chapel at Pietralba, Corsica). As a replacement of the original white limestone, no longer quarried, white non-calcareous stones of apparently suitable aspect were used. But the iron they contained rapidly oxidized, producing an unsightly patina. Monumat aims at preventing such mistakes.

© J. Féraud

d'un type de pierre à l'autre. Une pierre calcaire très poreuse et très capillaire comme le tuffeau (*photo 4*) extrait dans le Val de Loire résistera beaucoup moins dans le temps qu'une pierre de Berchères, calcaire lacustre de Beauce, peu poreux et peu capillaire, utilisé dans la construction de la cathédrale de Chartres [Dessandier (2003)].

La sélection des pierres et leur adéquation aux usages dans la construction sont des questions primordiales, traitées dans la norme B10-601 « Produits de carrières – Pierres naturelles – Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles ». Ce document précise les tolérances sur les produits et les prescriptions d'emploi, en fonction de leur destination dans l'ouvrage, et les conditions de réception applicables aux fournitures.

Un matériau naturel qui doit aujourd'hui prouver sa valeur écologique

La pierre doit apporter la preuve scientifique de ses qualités écologiques et pouvoir être objectivement comparée aux autres matériaux. Elle doit être capable de mettre à disposition des prescripteurs des données précises d'évaluation environnementale de ses produits, leur permettant de comparer objectivement la valeur environnementale de chaque produit et de les guider vers la conception d'ouvrages respectueux de l'environnement [AFNOR (2004)].

Prévue à cet effet, la Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (FDES) d'un produit de construction fournit des données chiffrées issues d'une Analyse de cycle de vie (ACV) du produit [AFNOR (2006a, 2006b)], complétée par des informations sanitaires résultant souvent d'essais spécifiques. L'ensemble des FDES est rassemblé dans INIES (www.inies.fr), base de données nationale française de référence sur les caractéristiques environnementales et sanitaires des matériaux et produits de construction. L'ACV est une évaluation des impacts sur l'environnement d'un système comprenant l'ensemble des activités associées à un produit, depuis l'extraction jusqu'à l'élimination des déchets.

Pour la première fois en France, et sous la conduite du Centre technique de matériaux naturels de construction (CTMNC), cette démarche a été appliquée à des produits en pierre naturelle, afin d'en apprécier objectivement la valeur écologique. Trois types de produits en pierre naturelle ont été étudiés : un pavé de voirie, une pierre massive et un revêtement mince attaché.

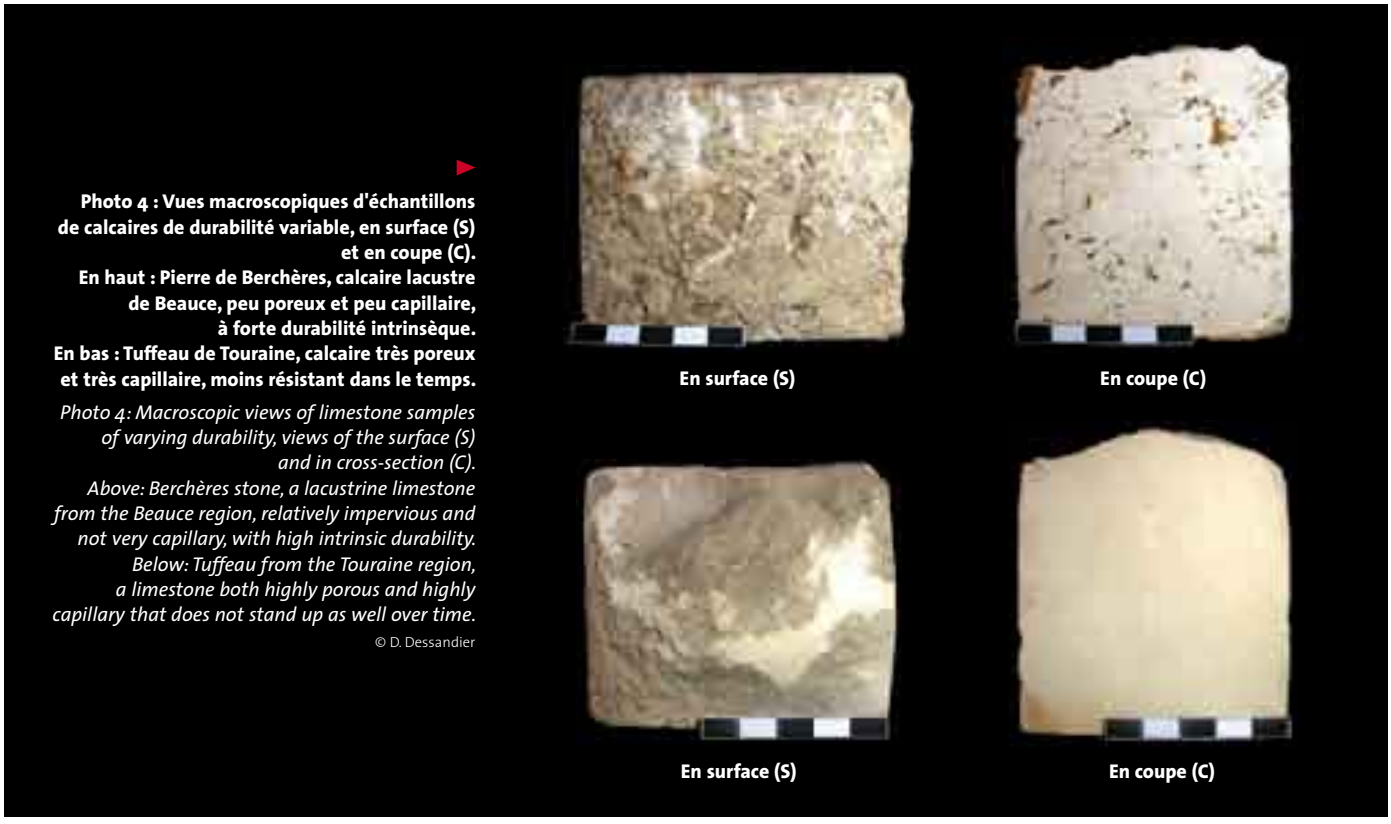


Photo 4 : Vues macroscopiques d'échantillons de calcaires de durabilité variable, en surface (S) et en coupe (C).
En haut : Pierre de Berchères, calcaire lacustre de Beauce, peu poreux et peu capillaire, à forte durabilité intrinsèque.
En bas : Tuffeau de Touraine, calcaire très poreux et très capillaire, moins résistant dans le temps.

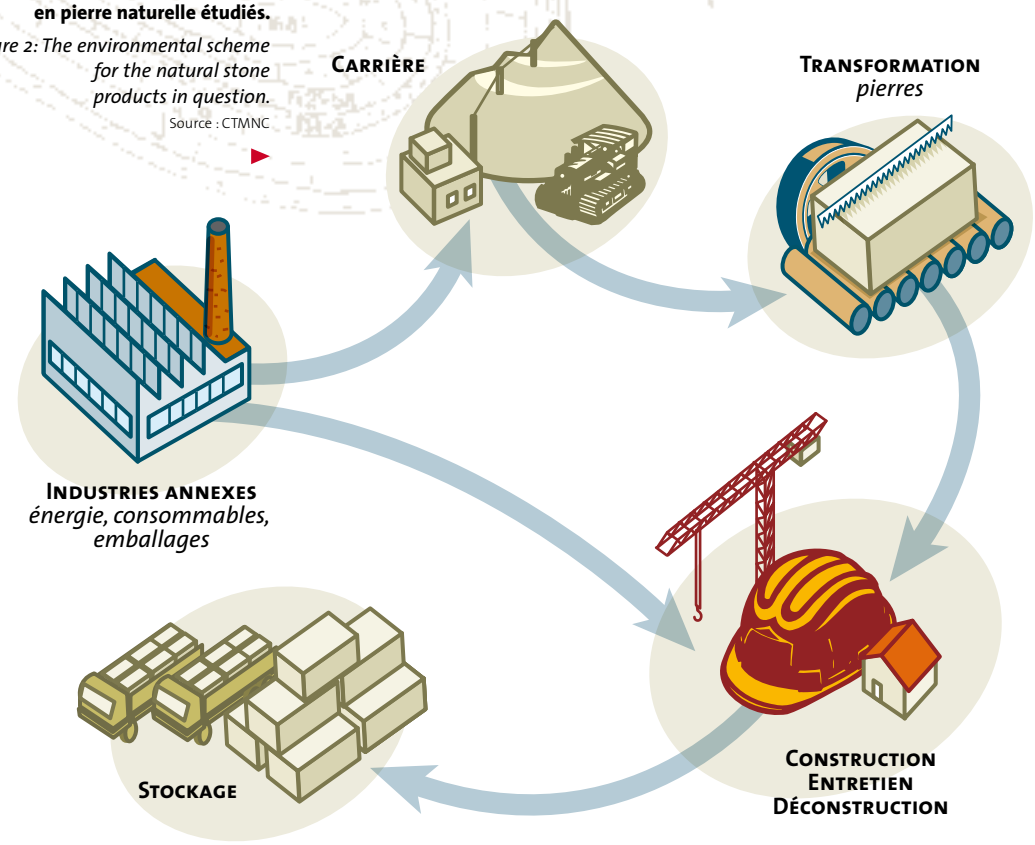
Photo 4: Macroscopic views of limestone samples of varying durability, views of the surface (S) and in cross-section (C).
Above: Berchères stone, a lacustrine limestone from the Beauce region, relatively impervious and not very capillary, with high intrinsic durability.
Below: Tuffeau from the Touraine region, a limestone both highly porous and highly capillary that does not stand up as well over time.

© D. Dessandier

Figure 2 : Système environnemental relatif aux produits en pierre naturelle étudiés.

Figure 2: The environmental scheme for the natural stone products in question.

Source : CTMNC



Le système environnemental étudié est présenté en *figure 2*. Les résultats d'ACV de ces produits en pierre ont été comparés à ceux d'autres produits de construction (en béton et en acier). Il apparaît que le revêtement mince attaché de façade en pierre présente des indicateurs d'impact environnementaux plus ou moins favorables. Dans le cas du pavé, le bilan environnemental est clairement à l'avantage de la pierre naturelle. Une telle démarche reste maintenant à étendre à d'autres produits en pierre, afin de permettre des comparaisons objectives et de positionner favorablement la pierre comme alternative environnementale aux autres matériaux de construction.

Parallèlement, l'amélioration continue de la qualité environnementale des produits en pierre doit constituer un objectif guide. Elle doit s'appuyer sur une exploitation raisonnée des ressources, privilégiant l'emploi local des pierres extraites et leur usage mixte avec d'autres matériaux naturels, facteurs de pérennisation de l'identité des terroirs et de meilleure acceptation des carrières d'extraction. Dans son *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e^ au XVI^e^ siècle*, Viollet-le-Duc décrivait en 1856 l'usage de la pierre dans l'architecture en ces termes : « *Les constructions de pierre qu'ils ont laissées sont élevées toujours avec les meilleurs matériaux que l'on pouvait se procurer dans le voisinage de leurs monuments [...] ; lorsque celles-ci faisaient absolument défaut dans un rayon étendu, ils employaient le caillou ou la brique, plutôt que de mettre en œuvre de la pierre à bâtir d'une qualité inférieure...* ». Et si la pierre devait regarder son passé en face pour mieux se construire un avenir ?

> *« Positionner favorablement la pierre comme alternative environnementale aux autres matériaux de construction. »*

Building stone, a sustainable development material

Since prehistoric times, mankind has regularly quarried stone for daily needs, always regarded it as a reference building material and used it extensively until it was replaced with concrete. The considerable diversity of France's geological formations has provided a wide assortment of stones disseminated over the whole country that exhibit varying technical characteristics suited to different types of building uses. Stone has also been called on for decorative purposes. However, it is a fragile resource that must be managed sensibly. Some deposits have already run out, whilst others are no longer accessible. Furthermore, quarries are subject to strict regulations, which are becoming increasingly stringent as years go by, while they also continue to be viewed as negatively impacting the environment. With modern air pollution, buildings that heretofore had withstood the test of time have significantly deteriorated today, especially in urban areas. Still, stone is the only material that has shown itself to be resistant in the long term. Finally, in these early years of the 21st century, stone, a natural substance per se and irreplaceable in former times, now must prove that it complies with the principles of sustainable development if it is to retain its good standing amongst building materials for the future.

Bibliographie : **AFNOR (2006)** – NF B10-601 « Produits de carrières – Pierres naturelles – Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles ». **AFNOR (2004)** – NF P 01-010 – Qualité environnementale des produits de construction, Paris. **AFNOR (2006a)** – NF EN ISO 14040, Management environnemental, analyse du cycle de vie Principes et cadres, Paris. **AFNOR (2006b)** – NF EN ISO 14044, Management environnemental, analyse du cycle de vie, Exigences et lignes directrices, Paris. **BRGM (1997)** – Analyse technico-économique de l'industrie française des pierres ornementales face au marché mondial. Proposition pour son développement, rapport BRGM R39978. **D. Dessandier (2000)** – Guide méthodologique de sélection des pierres des monuments historiques en termes de durabilité et compatibilité, rapport BRGM RP-50137-FR. **D. Dessandier (2003)** – Mémento des pierres du patrimoine bâti de la région Centre, rapport BRGM/RP-51868-FR. **Pierre Actual (2009)** – La pierre française toujours en forme, revue Pierre Actual, janvier 2009, pp. 31-34. **P.-M. Thibaut (1996)** – Inventaire des roches ornementales et de construction françaises et des sociétés exploitantes, rapport BRGM R38877. **E. Viollet-Le-Duc (1856)** – Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI^e^ au XVI^e^ siècle, Librairies-imprimeries Réunies, Paris.