

Etude de l'adhérence pierre-mortier pour la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris

Kévin BECK¹, Ali BASBOUS¹, Ghadir OLLAIC¹, Xavier BRUNETAUD¹

¹ Laboratoire de mécanique Gabriel Lamé - LaMé EA 7494, Université d'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans France

RESUME : Pour la restauration des voûtes de la cathédrale Notre-Dame de Paris, la pierre dure de la roche Croix-Huyart venant des carrières « Les pierres de Paris – Saint-Pierre-Aigle » a été sélectionnée par la maîtrise d'œuvre. Elle possède les caractéristiques les plus proches de la pierre originelle. Afin d'étudier le comportement de l'interface pierre-mortier et pour choisir le liant le plus compatible avec la pierre dure de la roche Croix Huyart, des mesures de la résistance mécanique et de l'adhérence du mortier a été réalisée à 7, 14, 28 jours et 18 mois. Quatre types de liant balayant les différents degrés d'hydraulicité ont été testés : une chaux aérienne CL90, une chaux naturelle hydraulique NHL3,5, une chaux grise préformulée PF70 et un ciment CEM I 52,5 N. Les résultats des tests mécaniques ont confirmé que la résistance mécanique est d'autant plus forte que le liant possède une forte hydraulicité, allant à dépasser celle de la pierre dans le cas du mortier à base de ciment. Celui-ci présente une adhérence beaucoup trop forte entraînant une rupture cohésive dans la pierre, ce qui est néfaste pour une maçonnerie, où le mortier doit présenter une certaine souplesse. Les mortiers à la chaux aérienne ou hydraulique présentent les meilleurs résultats grâce à des adhérences faibles mais non nulles, avec des valeurs proches de 0,2 MPa.

Mots-clefs : restauration, pierre, mortier, adhérence, patrimoine bâti

I. INTRODUCTION

Le 15 avril 2019, la charpente de la cathédrale Notre-Dame de Paris prenait feu. Ce terrible incendie et la chute de la flèche de la cathédrale et des éléments de la toiture ont provoqué l'effondrement partiel des voûtes. Cette catastrophe a déclenché l'ouverture d'un chantier scientifique piloté par le CNRS et le ministère de la Culture avec la participation d'autres organismes universitaires de recherche, et en étroite collaboration avec la maîtrise d'œuvre et le chantier de restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris. Ainsi, depuis 2019, plusieurs Groupes de Travail se sont mis en place autour de différentes thématiques (GT structure, GT pierre, GT bois, GT métal, GT verre, etc.), et un bilan de leurs travaux a pu être rendu public lors du colloque interdisciplinaire « Naissance et renaissance d'une cathédrale : Notre-Dame de Paris sous l'œil des scientifiques » qui a eu lieu du 22 au 24 avril 2024, année de la réouverture de la cathédrale. Une des tâches du laboratoire de mécanique Gabriel Lamé (LaMé), membre du GT pierre, a été de caractériser les pierres initialement candidates à la restauration et de tester différents types de mortier afin d'étudier l'adhérence entre la pierre et le mortier (Beck & Brunetaud, 2024). En effet, la compatibilité des mortiers avec les pierres en œuvre est un facteur

principal dans la conservation des monuments. Pour étudier le degré de compatibilité pierres/mortier, il est mis en avant la nature chimique du mortier qui peut contenir des sels solubles, les propriétés de transfert des fluides, la tenue mécanique du mortier (résistance, souplesse, rigidité) et les propriétés d'adhérence (O'Brien et al., 1995 ; Binda et al., 2003 ; Lanas et al., 2003). Pour l'étude de la durabilité de la maçonnerie, l'interface pierre-mortier est essentielle car c'est elle qui assure le transfert des sollicitations mécaniques ainsi que le transfert d'eau. Les mortiers à base de chaux sont généralement employés pour la restauration des maçonneries des monuments historiques mais on peut rencontrer des mortiers à base de chaux hydraulique, de chaux avec des additions minérales ou même du ciment car ces derniers sont plus pratiques à mettre en œuvre et ils offrent une prise plus rapide. L'objectif de l'étude présentée ici consiste à tester des mortiers formulés avec différents types de liants balayant tous les degrés d'hydraulicité, de la chaux aérienne au ciment, afin d'observer leur montée en résistance du jeune âge jusqu'à 18 mois de cure et de mesurer l'adhérence de ces mortiers avec la pierre de la roche Croix-Huyart. Les résultats pourront aider au choix du liant le plus compatible avec la pierre pour la restauration des voûtes de la cathédrale Notre-Dame de Paris.

II. MATÉRIAUX ET MÉTHODES

A. *La pierre étudiée : la pierre dure de la roche Croix-Huyart*

Suite à l'identification par le Laboratoire de Recherche sur les Monuments Historiques (LRMH) des pierres des voûtes effondrées de la cathédrale Notre-Dame de Paris, et à la caractérisation des pierres initialement candidates à la restauration, c'est la pierre dure de la roche Croix-Huyart venant des carrières « Les pierres de Paris – Saint-Pierre-Aigle » qui a été sélectionnée par la maîtrise d'œuvre pour la reconstruction des voûtes car cette pierre de carrière possède les caractéristiques physiques et mécaniques les plus proches de la pierre originelle. Les mesures de porosité et de résistances mécaniques à l'état sec sont présentées au tableau 1. Les mesures de porosité ont été faites par saturation sous vide à l'eau et au porosimètre au mercure. Cette pierre calcaire se caractérise par une couleur beige-crème avec une porosité d'environ 18%, une taille de pore moyenne d'environ 2 μm avec une distribution de pores allant de 0,1 μm à 100 μm . Les mesures mécaniques ont été faites par l'essai à la compression simple suivant la norme P94-420, et par l'essai de traction indirecte par fendage (essai brésilien) suivant la norme P94-422. La pierre dure de la roche Croix-Huyart possède une résistance mécanique à l'état sec d'environ 45 MPa en compression et d'environ 2 MPa en traction.

TABLEAU 1. Propriétés de la pierre dure de la roche Croix-Huyart

Masse volumique apparente sèche (g/cm^3)	$2,20 \pm 0,02$
Masse volumique du squelette solide (g/cm^3)	$2,68 \pm 0,01$
Porosité totale (%)	$17,9 \pm 2,1$
Taille de pore moyenne (Hg volume) (μm)	$2,3 \pm 0,6$
Résistance à la compression à l'état sec (MPa)	$47,1 \pm 2,6$
Résistance à la traction à l'état sec (MPa)	$2,0 \pm 0,4$

B. Sable, liants et formulation

Pour la formulation des mortiers, quatre types de liants ont été sélectionnés afin de balayer tous les différents degrés d'hydraulicité : une chaux blanche aérienne CL90 de Saint-Astier, une chaux blanche naturelle hydraulique NHL3.5 de Saint-Astier, une chaux grise artificielle préformulée Tradical PF70 de Balthazard contenant un mélange de chaux aérienne (75%), de chaux hydraulique (15%) et de pouzzolanes (10%), et un ciment Portland CEM I 52.5 N de Vicat. Enfin, il a été choisi de ne pas faire varier le type de sable et la granulométrie du sable. Ainsi, pour chaque type de liant, les mortiers sont à base d'un sable normalisé 0/4 répondant à la norme CEN EN 196-1, disponibles en sachets pré-pesés de 1350 g.

Pour formuler les mortiers en voulant suivre les recommandations des fabricants pour chaque liants, le dosage en liant varie fortement entre 7 à 12 seaux de 10 litres de sable pour un sac de liant. Ainsi, il a été choisi d'avoir une formulation moyenne d'environ 3 à 4 parts de sable pour une part de liant. De plus, la formulation d'un mortier sur chantier étant basé sur des proportions volumiques et qu'une formulation d'un mortier en laboratoire est basé sur des proportions massiques, il est nécessaire de déterminer les masses volumiques apparentes pour le sable et pour chaque liant. Pour le sable, la masse volumique apparente a été mesurée par la masse de sable remplissant un récipient calibré via le cône d'écoulement à sable. Pour les liants, la masse volumique apparente a été mesurée par l'appareil de Rigden sans compaction par vibrations, ceci afin de représenter au mieux le lien entre masse et volume prélevé dans les sacs. Les résultats sont présentés dans le tableau 2. Ainsi, à partir des ces mesures et pour respecter une proportion volumique liant/sable cohérente avec les recommandations des fabricants, les proportions massiques utilisées pour chacun des liants sont : 10% pour la chaux aérienne CL90, 15% pour la chaux naturelle hydraulique NHL3,5, 15% pour la chaux grise préformulée Tradical PF70, 25% pour le ciment CEM I 52,5 N.

TABLEAU 2. Masses volumiques apparentes pour le sable normalisé et les quatre liants testés

	Sable normalisé 0/4	Chaux aérienne CL90	Chaux naturelle hydraulique NHL3.5	Chaux grise Tradical PF70	Ciment CEM I 52,5 N
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1,66 ± 0,01	0,54 ± 0,02	0,73 ± 0,02	0,85 ± 0,02	1,25 ± 0,02

Une fois que les différents mélanges secs ont été déterminés, la dernière étape pour la formulation consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire pour confectionner le mortier. Afin d'avoir des mortiers comparables possédant une maniabilité constante, le test d'étalement à la table à chocs a été réalisé en se référant à la norme EN 459-2. Dans ce test, le sable, le liant et l'eau sont mélangé suivant un protocole similaire à la norme EN 196-1, puis le mortier frais est introduit sur la table à chocs dans un mini-cône (Figure 1). Une fois le mini-cône retiré, une quinzaine de chocs sont donné à la table favorisant l'étalement du mortier suivant sa consistance plus ou moins liquide. En se basant sur l'étalement visé pour un mortier à la chaux, une valeur de 16,5 cm d'étalement

est recherchée avec une précision de 0,5 cm. Après plusieurs essais convergents, les valeurs de teneurs en eau correspondant à cet étalement ont été mesurées et sont présentées au tableau 3. La teneur en eau correspond à la masse d'eau rapportée à la masse de matière sèche (sable et liant). Les teneurs en eau pour fabriquer le mortier frais à une même maniabilité sont comprises entre 11% et 15%. Les teneurs en eau sont d'autant plus grandes que le liant est fin, la surface spécifique Blaine étant d'environ 3000 cm²/g et 10000 cm²/g pour le ciment CEM I et pour la chaux aérienne CL90, respectivement (Beck et al., 2010).

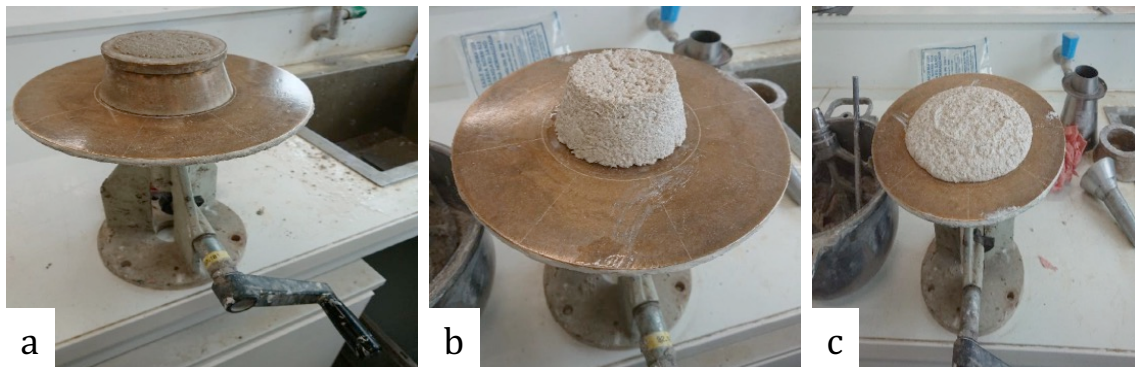


FIGURE 1. Etalement à la table à chocs (norme EN 459-2) : (a) mise en place dans le mini-cône ; (b) mortier frais avant étalement ; (c) mortier frais après 15 coups à la table à chocs

TABLEAU 3. Teneurs en eau des mortiers pour une maniabilité constante à 16,5 cm d'étalement

	Mortier à la chaux aérienne CL90	Mortier à la chaux hydraulique NHL3.5	Mortier à la chaux grise Tradical PF70	Mortier au ciment CEM I 52,5 N
Teneur en eau (%)	15 ± 0,5	13,5 ± 0,5	11,5 ± 0,5	11,0 ± 0,5

C. Méthodes de caractérisation mécanique

Pour chaque type de liant, trois éprouvettes prismatiques 4×4×16 cm ont été fabriquées pour chacune des quatre durées de cure testées : 7 jours, 14 jours, 28 jours, 550 jours (18 mois). Le démoulage des mortiers à la chaux doit se faire à un minimum de 3 jours dans le cas de ceux fabriqués avec la chaux aérienne car ils sont très fragiles au jeune âge. Tous les échantillons ont été conservés à l'ambiance du laboratoire après démoulage (20°C, 50%Hr). Les résistances mécaniques à la compression et à la flexion ont été mesurées sur les échantillons de mortier. La mesure a été effectuée à l'aide de deux cellules spécifiques à la mesure de la compression et de la flexion d'éprouvettes 4×4×16 et d'une presse 3R disposant de capteurs de force de 300 kN, 50 kN et 5 kN suivant la résistance attendue (Figure 2).

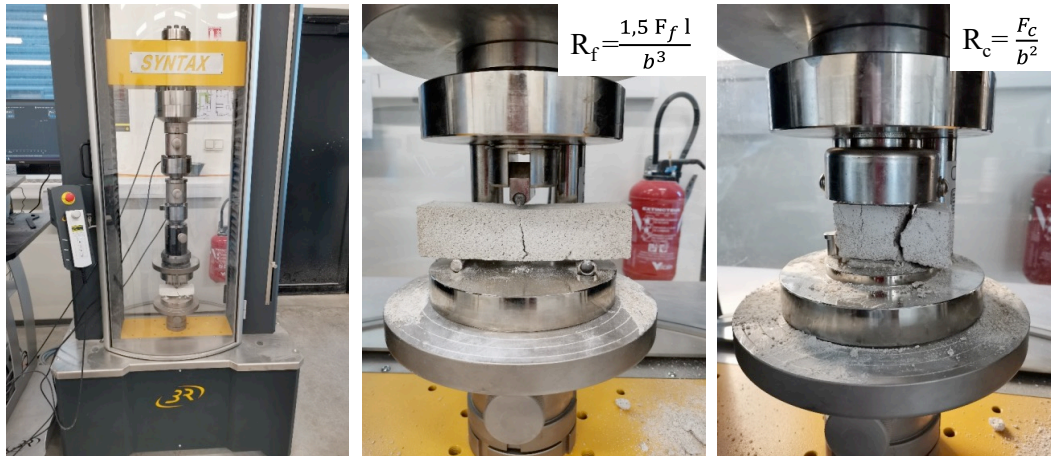


FIGURE 2. Dispositif de mesure de résistance à la compression et à la flexion d'éprouvettes 4x4x16

Pour chaque type de liant, dix éprouvettes cylindriques de pierre (50 mm de diamètre et 50 mm de hauteur) ont été découpées par carottage. Ensuite, les différents mortiers à l'état frais ont été mis en place sur les échantillons de pierre préalablement humidifiés afin d'éviter toute absorption d'eau des mortiers qui pourrait nuire à la bonne adhérence entre la pierre et le mortier. Afin d'avoir une épaisseur constante d'un centimètre de mortier pour chaque échantillon et une surface plane, les échantillons de pierre étaient entourés par un film adhésif en aluminium épais de 60 mm de hauteur (Figure 3). Après 48h, le film en aluminium était retiré et les éprouvettes ont été laissées à l'ambiance du laboratoire (20°C, 50%HR) pour une durée de cure de 18 mois (i.e. 550 jours) afin de tester l'interface pierre-mortier uniquement à la plus grande durée de cure testée et donc quand le mortier possède sa plus haute résistance mécanique. L'adhérence entre la pierre et le mortier a été mesurée à l'aide d'un dispositif composé de deux platines rotulées en acier se vissant dans le bâti et la traverse mobile de la presse. Les échantillons pierre-mortier sont collés sur des pastilles métalliques par les deux côtés (côté pierre et côté mortier) à l'aide d'une colle époxy. Les pastilles métalliques se fixent dans les platines à l'aide de goupilles en acier (Figure 3). La mesure en traction directe a été effectuée avec une presse INSTRON 4485 avec un capteur de force de 250 kN et enregistrée avec le logiciel de pilotage Bluehill3. La vitesse de déplacement de la traverse a été fixée à 0,01 MPa/s selon la norme EN 1015-12. L'essai se poursuit par augmentation progressive de la force jusqu'à la rupture de l'éprouvette. L'évaluation de l'adhérence se fait alors en mesurant la force maximale à la rupture, qui est ensuite rapportée à la surface de contact entre l'enduit et le support. L'examen du faciès de rupture permet de compléter l'information quantitative de la valeur de cette force maximale. En effet, durant l'essai de traction réalisé, la force maximale peut être provoquée par la rupture de trois éléments différents : le mortier, la pierre ou l'interface pierre-mortier. La rupture au niveau de l'interface pierre-mortier sera une rupture adhésive, et la force d'adhérence sera égale à la valeur de l'essai. La rupture dans un des deux matériaux sera une rupture cohésive, et la force d'adhérence sera supérieure à la résistance de la pierre ou du mortier.

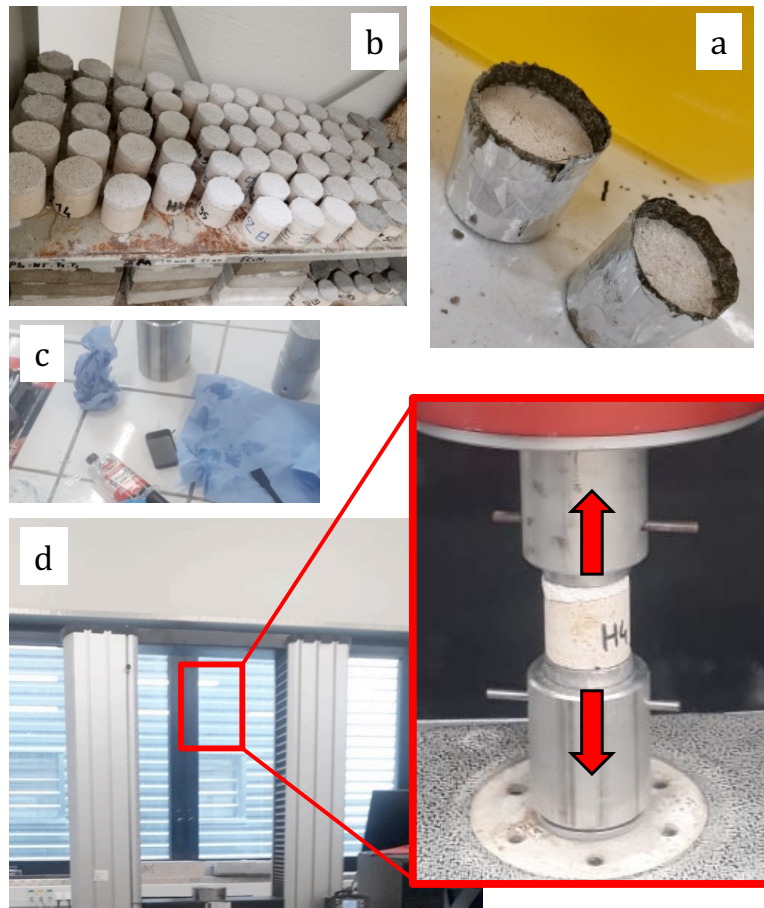


FIGURE 3. Fabrication des échantillons et dispositif de mesure d'adhérence pierre-mortier : (a) moule calibré pour la mise en place du mortier ; (b) échantillons pierre-mortier ; (c) collage des échantillons sur les pastilles ; (d) dispositif de mise en traction

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les tableaux 4 et 5 présentent respectivement les résultats des mesures de résistance en compression et en flexion sur les échantillons de mortier pour les quatre durées de cure. Pour les différents mortiers, les montées en résistance sont similaires en compression et en flexion. La résistance mécanique est d'autant plus grande suivant l'hydraulicité du liant utilisé. Le mortier à base de ciment possède, comme attendu, les valeurs de résistance mécanique les plus grandes, avec une montée en résistance rapide. En effet, au bout de 7 jours, le mortier atteint près de 90% de résistance maximale qui est atteinte au bout de 28 jours. Au bout de 18 mois de cure, ce mortier au liant purement hydraulique ne montre pas de résistance supplémentaire avec des valeurs de résistances maximales de 7 MPa en flexion et 50 MPa en compression, valeur supérieure à la résistance en compression de la pierre dure de la roche de Croix-Huyart. À l'opposé, le mortier à base de chaux aérienne, qui est un liant avec une hydraulicité nulle, présente les plus faibles résistances. À 7 jours, ce mortier ne possède quasiment pas de cohésion avec une résistance à la flexion quasi nulle, et une résistance à la compression très faible de l'ordre de 0,14 MPa. La montée en résistance de ce mortier formulé avec un liant aérien est principalement dû aux forces

de frottement entre particules après le séchage du mortier frais, puis à la carbonatation qui est un phénomène lent et progressif. Le mortier reste assez fragile à 28 jours de maturation, mais ses résistances mécaniques doublent après 18 mois pour atteindre 0,3 MPa en flexion et 0,8 MPa en compression. Il est fort possible que la résistance mécanique de ces mortiers pourrait encore augmenter davantage car il est bien connu que les mortiers à base de chaux aérienne peuvent prendre plusieurs années pour atteindre leur résistance mécanique maximum (Lanas et al., 2003). Concernant les mortiers à base de chaux naturelle hydraulique NHL3.5 et la chaux grise artificiel Tradical, les résistances mécaniques sont nettement supérieures à celles du mortier formulé seulement avec la chaux aérienne même au jeune âge, ce qui en fait un avantage important lors de la mise en place du mortier lors des travaux de restauration des maçonneries. A 18 mois de maturation, les résistances à la compression des mortiers à base de chaux hydraulique NHL3.5 et chaux grise Tradical sont respectivement de 4 MPa et 9 MPa, et donc près de 10 fois supérieur à celle du mortier à base de chaux aérienne. Comme pour les mortiers à base de chaux aérienne, les performances mécaniques évoluent fortement avec le temps mais de manière moindre. En effet, ces mortiers à base de liant à l'hydraulicité partielle n'augmentent leur résistance mécanique que d'environ 30% entre 28 jours et 18 mois de maturation. Cette montée en résistance lente pour les mortiers formulés avec ces chaux s'explique par les réactions pouzzolaniques entre les constituants, qui sont combinées à la carbonatation de l'hydroxyde de calcium.

TABLEAU 4. Résultats des mesures de résistance en flexion sur les éprouvettes de mortier

Type de liant	Résistance à la flexion Rf (MPa)			
	7 jours	14 jours	28 jours	550 jours
CL90	0,02 ± 0,01	0,14 ± 0,07	0,23 ± 0,04	0,33 ± 0,14
NHL3.5	0,35 ± 0,03	0,47 ± 0,08	0,90 ± 0,07	1,09 ± 0,30
Tradical	1,29 ± 0,10	1,62 ± 0,05	2,10 ± 0,13	2,62 ± 0,68
ciment	5,65 ± 0,35	7,05 ± 0,32	7,20 ± 0,50	7,16 ± 0,42

TABLEAU 5. Résultats des mesures de résistance en compression sur les éprouvettes de mortier

Type de liant	Résistance à la compression Rc (MPa)			
	7 jours	14 jours	28 jours	550 jours
CL90	0,14 ± 0,02	0,35 ± 0,02	0,41 ± 0,04	0,81 ± 0,13
NHL3.5	1,11 ± 0,04	1,67 ± 0,06	2,96 ± 0,16	4,14 ± 0,91
Tradical	3,67 ± 0,14	4,80 ± 0,50	6,47 ± 0,13	9,31 ± 1,25
ciment	47,2 ± 2,4	49,3 ± 1,2	51,4 ± 1,5	51,8 ± 4,8

Les mesures de l'adhérence par traction directe des éprouvettes pierre-mortier formulées avec les quatre types de liant étudiés sont présentées à la figure 5. Aucune rupture au niveau de la colle epoxy n'a eu lieu, ce qui montre que la résistance à l'adhérence de la colle est bien supérieure aux

forces d'adhérence ou de cohésion des matériaux. Une dizaine d'éprouvettes a été testée pour chaque type de mortier. Les valeurs de l'adhérence pour les mortiers à base de chaux aérienne de l'ordre de 0,1 MPa sont cohérentes avec les mesures d'adhérence de mortiers à la chaux aérienne sur d'autres pierres supports (Beck & Al-Mukhtar, 2008). Globalement, l'adhérence est bien corrélée à l'hydraulicité du liant et à sa résistance mécanique. Plus le liant est hydraulique, plus l'adhérence est forte. L'adhérence moyenne du mortier sur la pierre dure de la roche Croix-Huyart est d'environ 0,1 MPa pour le mortier à base de chaux aérienne, 0,3 MPa pour le mortier à base de chaux naturelle hydraulique, 0,5 MPa pour le mortier à base de chaux grise et 1,8 MPa pour le mortier à base de ciment. Néanmoins, la dispersion des mesures est assez grande quel que soit le type de mortiers, de l'ordre de 20% à 30% car la mesure est dépendante de la bonne mise en place du mortier sur les échantillons de pierre, ainsi que du bon collage des éprouvettes sur les pastilles métalliques avec la résine epoxy.

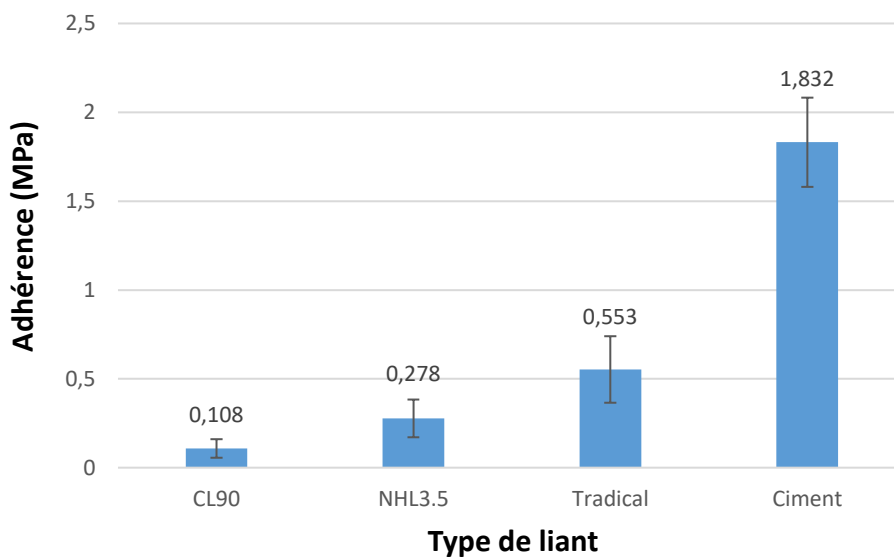


FIGURE 4. Résultats des essais d'adhérence en traction directe entre la pierre dure de la roche Croix-Huyart et les mortiers suivant les quatre types de liants étudiés (maturation : 18 mois)

En plus des valeurs numériques de l'adhérence, il est important de regarder le faciès de rupture au niveau des éprouvettes. Ainsi, les éprouvettes pierre-mortier confectionnées avec les mortiers à base de chaux naturelle hydraulique NHL3.5 et à base de chaux grise Tradical PF70 ont toutes eu une rupture adhésive au niveau de l'interface pierre-mortier. La figure 5 montre un exemple de rupture adhésive entre la pierre dure de la roche Croix-Huyart et un mortier à base de chaux hydraulique NHL3.5. On observe un décollement uniforme et homogène du mortier, laissant quelques résidus blanchâtres sur la surface de la pierre. Dans le cas des mortiers à base de chaux aérienne, près de la moitié des éprouvettes présentaient une rupture cohésive avec une rupture nette dans le mortier, ou bien une rupture moitié adhésive / moitié cohésive avec des gros morceaux de mortiers encore collé à la pierre après rupture. La figure 6.a montre un exemple de rupture cohésive entre la pierre dure de la roche Croix-Huyart et un mortier à base de chaux aérienne CL90. En effet, on remarque que la valeur de l'adhérence (0,11 MPa) est très proche de la

résistance en flexion des mortiers à la chaux aérienne au même âge de maturation (0,33 MPa). A l'opposé, dans le cas des mortiers à base de ciment, plus d'un tiers des éprouvettes présentaient une rupture cohésive avec une rupture dans la pierre, ou bien une rupture moitié adhésive / moitié cohésive avec des gros morceaux de pierre encore collé au mortier après rupture. La figure 6.b montre un exemple de rupture cohésive entre la pierre dure de la roche Croix-Huyart et un mortier à base de ciment. En effet, on remarque que la valeur de l'adhérence (1,8 MPa) est très proche de la résistance en traction de la pierre dure de la roche Croix-Huyart (2 MPa) comme indiqué dans le tableau 1. Ainsi, les mortiers à hydraulicité moyenne (chaux hydraulique et chaux grise) sont préférables pour une restauration des maçonneries en pierre car les valeurs d'adhérence sont suffisantes et qu'en cas de problèmes structuraux, la rupture sera purement adhésive. Pour les mortiers à base de chaux aérienne, l'adhérence est suffisante et le risque de rupture dans le mortier est préférable car il est préférable d'avoir le mortier comme matériau sacrificiel dans une maçonnerie. A l'opposé, les mortiers à base de ciment ont une valeur d'adhérence trop forte, presque égale ou supérieure à la résistance en traction de la pierre. Dans le cas d'une maçonnerie en pierre dure de la roche Croix-Huyart, les mortiers à base de ciment sont à proscrire car beaucoup trop adhérent et pouvant provoquer une rupture dans la pierre en cas de déformation de la structure.



FIGURE 5. Exemple de rupture adhésive entre la pierre et le mortier

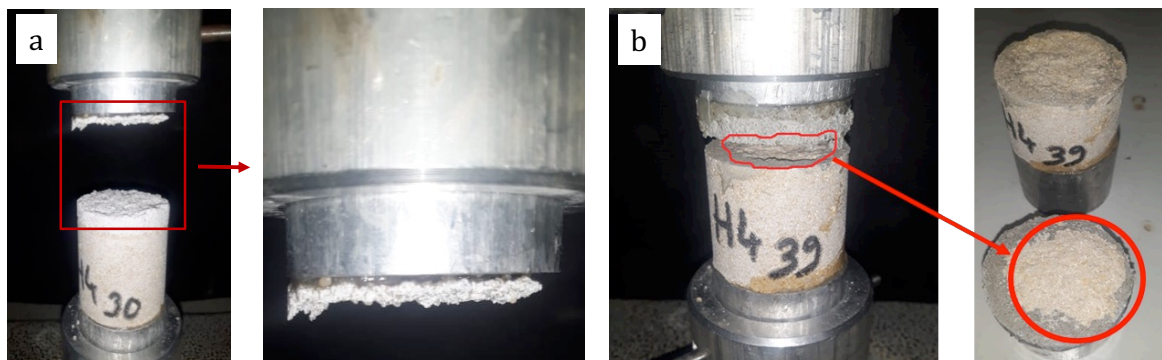


FIGURE 6. Exemple de rupture cohésive entre la pierre et le mortier : (a) rupture cohésive dans le mortier ; (b) rupture cohésive dans la pierre

IV. CONCLUSION

Dans le cadre du chantier scientifique interdisciplinaire autour de la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris, une étude de formulation de mortiers à base de différents liants a été réalisée pour choisir le liant le plus compatible avec la pierre dure de la roche Croix Huyart. Les quatre liants sélectionnés balayent les différents degrés d'hydraulicité de 0% à 100% : une chaux aérienne CL90 de Saint-Astier, une chaux naturelle hydraulique NHL3,5 de Saint-Astier, une chaux grise préformulée PF70 de Balthazard et un ciment CEM I 52,5 N de Vicat. Les résultats des tests mécaniques ont confirmé que la résistance est d'autant plus forte que le liant possède une forte hydraulicité. Mais cela signifie également que la résistance à la compression du mortier à base de ciment dépasse largement celle de la pierre, ce qui est couramment admis comme non recommandé pour une maçonnerie en pierre calcaire, où le mortier doit présenter une certaine souplesse.

La mesure de l'adhérence a été réalisée en traction directe, d'après la norme NF EN 1015-12, après une maturation de 18 mois, afin de s'assurer que même les mortiers dont la montée en résistance est la plus faible ont pu atteindre une résistance représentative d'un état permanent. Les résultats montrent que le mortier à base de ciment possède une adhérence trop proche de la résistance en traction de la pierre, et son usage provoque des ruptures cohésives, ce qui doit être absolument évité. Ceci confirme l'idée bien connue que l'usage du ciment est totalement néfaste en restauration des maçonneries en pierres calcaires. Les mortiers à base uniquement que de chaux aérienne CL90 n'offrent pas une bonne résistance mécanique et n'ont pas une assez bonne cohésion ni une assez bonne adhérence. Les mortiers à la chaux hydraulique NHL3.5 présentent les meilleurs résultats grâce à des adhérences suffisantes et une rupture totalement adhésive. Cela confirme le bien-fondé de la décision de la maîtrise d'œuvre qui a choisi d'utiliser des mortiers à base d'une chaux faiblement hydraulique comme la chaux hydraulique naturel NHL2, et non pas à base uniquement de chaux aérienne CL90, pour la reconstruction des voûtes de la cathédrale Notre-Dame de Paris en 2024. En effet, les mortiers à base de chaux naturelle hydraulique NHL2 possède une meilleure souplesse par rapport à un mortier à base de chaux NHL3.5, ce qui permet aux zones restaurées d'être plus compatible avec le reste des maçonneries anciennes.

REFERENCES

Beck, K., Al-Mukhtar, M., (2008). Formulation and characterization of an appropriate lime-based mortar for use with a porous limestone, *Environmental Geology*, vol.56, No. 3-4, p. 715-727 (doi 10.1007/s00254-008-1299-8).

Beck, K., Brunetaud, X., Mertz, J-D., Al-Mukhtar, M., (2010). On the use of eggshell lime and tuffeau powder to formulate an appropriate mortar for restoration purposes, *Geological Society of London Special Publications*, 331, p. 137-145 (doi.org/10.1144/SP331.12).

Beck, K., Brunetaud, X., (2024). Les pierres pour la restauration de la cathédrale Notre-Dame de Paris : caractérisation et étude de l'interface pierre-mortier. *Colloque interdisciplinaire du chantier scientifique Notre-Dame « Naissance et renaissance d'une cathédrale : Notre-Dame de Paris sous l'œil des*

scientifiques », *Session 6 : structures et expériences architecturales*, 22-24 avril 2024, cité de l'Architecture et du Patrimoine, Paris.

Binda, L., Baronio, G., Tiraboschi, C., Tedeschi, C., (2003). Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto. *Construction and Building Materials*, 17, p. 629-639.

Lanas, J., Alvarez, J.I., (2003). Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior, *Cement and Concrete Research*, 33, p. 1867-1876.

O'Brien P.F., Bell E., Pavia Santamaria S., Boyland P., Cooper T.P., (1995). Role of mortars in the decay of granite, *The Science of the total Environment*, 167, p. 103-110.

Norme NF EN 196-1. Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques, 31 p., 2006

Norme NF P 94-420 : Roches - Déterminations de la résistance à la compression uniaxial, 2000

Norme NF P 94-422 : Roches - Déterminations de la résistance à la traction - Méthode indirecte - Essai brésilien, 2001

Norme NF EN 1015-12. Méthodes d'essai des mortiers pour maçonnerie - Partie 12 : détermination de l'adhérence des mortiers d'enduit durcis appliqués sur supports, 11 p., 2001