

Etude du rôle des déformations locales résultant de sollicitations hydriques dans l'altération des pierres de construction par desquamation en plaques

Mohamad DAHER

LaMé EA 7494, Université d'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072 Orléans France

RESUME Cette étude contribue à la compréhension des processus d'altération des pierres de construction en conditions réelles. En effet, la desquamation en plaques est une forme d'altération des pierres calcaires comme le tuffeau, pierres des châteaux de la Loire, dont les mécanismes de formation sont encore mal connus. Parmi les hypothèses émises pour expliquer ce phénomène, les déformations différentielles provoquées par l'humidification partielle de la pierre pourraient être à l'origine de la fissuration. Des études antérieures ont prouvé la limitation de l'utilisation de jauges de contrainte pour la surveillance mécanique en raison de la taille et de la nature locale de la mesure. La technique de corrélation d'images numériques (CIN) s'est avérée être une méthode significative sans contact et non destructive pour les mesures de déformation en plein champ de divers matériaux, y compris les roches naturelles et donc hétérogènes. Dans ce travail, nous avons étudié les paramètres de la CIN et le processus d'étalonnage afin d'identifier la meilleure configuration pour travailler avec un matériau poreux sous charge mécanique et hydrique. Notre objectif est de calibrer un système de mesure qui sera utilisé pour mesurer la dilatation hydrique, où des études antérieures ont démontré que l'ordre des déformations détectées est compris entre 10^{-5} et 10^{-4} .

Mots-clefs Corrélation d'images numériques (CIN), tuffeau, desquamation en plaque, calibration, mesures hydriques

I. INTRODUCTION

Le tuffeau est un calcaire blanc, tendre et poreux. Il a été largement utilisé comme matériau de construction dans la région du val de la Loire en France en raison de sa disponibilité abondante et de ses propriétés telles que sa blancheur et sa légèreté (Beck et al., 2003). L'une des formes les plus courantes de dégradation du tuffeau est la desquamation en plaque qui est défini comme le détachement superficiel de fines couches de pierre, de quelques millimètres à quelques centimètres, parallèlement à la zone exposée aux changements environnementaux (Beck and Al-Mukhtar, 2010). De nombreuses hypothèses ont été proposées pour déterminer les paramètres régissant le processus d'endommagement de desquamation (Benavente et al., 2008), mais aucune n'a jamais été validée expérimentalement (Janvier-Badosa et al., 2015). L'une des hypothèses explique que la cristallisation et l'accumulation du gypse dans le matériau vont générer des hétérogénéités dans les pierres, ce qui initierait une fissuration progressive des pierres (Janvier-Badosa et al., 2014). Les déformations thermo-hydro chimiques induites dans les pierres par les variations environnementales sont censées jouer un rôle majeur dans la dégradation de la pierre. Des études antérieures ont montré l'intérêt de la mesure locale des déformations à l'aide d'une jauge de contrainte par rapport à la mesure globale. Cependant, l'utilisation de la jauge de contrainte a montré des limites en raison de sa taille, ce qui rend impossible l'observation de caractéristiques de dimensions inférieures, et en raison de son aspect local, ce qui la rend très sensible à l'hétérogénéité du matériau. De plus, le collage de la jauge à la surface peut localement impacter le transfert d'eau et par conséquent perturber les mesures (Hassine et al., 2018).

Ainsi, l'utilisation d'une technique de mesure non locale et sans contact pour évaluer le champ de déformation permettrait de surmonter les limites des jauges de contrainte. Notre objectif au-delà de l'étalonnage de l'essai mécanique, est de calibrer un système de mesure qui sera utilisé pour mesurer la dilatation hydrique, où des études précédentes ont démontré que l'ordre des déformations détectées est compris entre 10^{-5} et 10^{-4} .

La technique de corrélation d'images numériques (CIN) appartient à la classe des méthodes sans contact. L'acquisition d'images est réalisée et stockée sous forme numérique. Ensuite, l'analyse d'images est appliquée pour estimer les déplacements et les déformations du champ complet sur la base de l'analyse des images numériques prises d'un motif à la surface d'un échantillon (Sutton et al., 2000). La CIN nécessite une configuration spécifique pour l'acquisition d'images. Cette configuration comprend une caméra, un système d'éclairage et une surface cible avec un motif CIN (Sutton et al., 2009). La caméra doit avoir une haute résolution pour capturer des images de haute qualité de la surface. Le système d'éclairage doit fournir un éclairage constant et uniforme de la surface, sans créer d'ombres ou de reflets qui pourraient interférer avec la mesure (Segouin, 2019). Le motif sur la surface doit être conçu pour maximiser la précision et la résolution de la mesure. En plus de la caméra et du système d'éclairage, la configuration CIN nécessite également un réglage minutieux du triangle d'exposition, qui se compose de l'ouverture du diaphragme, du temps d'exposition et du réglage ISO. La technique CIN s'appuie sur une diversité d'outils numériques développés pour mesurer avec précision les champs de déformation. Cette étude vise à fournir une configuration CIN optimisée pour les pierres blanches, tendres et poreuses. Après cette phase, on termine par l'objectif principale où des mesures de déformations durant un test d'imbibition est réalisée. Dans cette méthode, on travaille avec des variables plus complexes, où l'ordre de déformation qu'on cherche à mesurer varie de 1 à 100 micromètres avec un changement de couleur détecté. Les résultats de cette campagne ont montré l'exigence des calculs d'incertitudes approfondies afin qu'on puisse définir et valider ces mesures.

II. Matériaux et méthodes

A. Acquisition d'images, propriétés des matériaux et essais mécaniques/hydriques

La configuration de l'acquisition d'image a été effectuée à l'aide d'un Canon EOS 5D MARK IV et l'objectif est un Canon EF 100mm f/2.8L Macro IS USM. La FIGURE 1 montre la configuration de l'expérience CIN et du système d'acquisition d'images. Sur la partie droite de l'image, la caméra est reliée à un portable afin d'avoir une acquisition en direct et automatique des images en fonction du temps. Sur la gauche, l'échantillon est placé sous le capteur de pesage avec les sources d'éclairage placées pour obtenir un contraste suffisant. Sur la droite, un exemple de la région d'intérêt est présenté avec l'histogramme de niveaux de gris lié à l'image.

Les pierres étudiées sont des matériaux naturels et complexes avec une grande porosité et une texture particulière. Le tuffeau est connu pour sa couleur blanche, sa texture homogène et ses grains fins. Les principales caractéristiques de cette roche sont sa porosité et sa perméabilité élevées, ce qui rend ce matériau sensible aux variations d'humidité, à la pluie et aux infiltrations d'eau. Le tuffeau est composé de plusieurs minéraux, dont les proportions varient d'une roche à l'autre. Les principaux minéraux sont le quartz, la calcite, la silice amorphe et les minéraux argileux. De plus, la couleur, les caractéristiques physiques et la composition chimique sont également susceptibles de varier d'un gisement à l'autre (Beck et al., 2003). Le TABLEAU 1 résume les principales propriétés du tuffeau.

TABLEAU 1 Principales propriétés du tuffeau (Beck et al., 2003)

Tuffeau	Propriétés
Couleur	Blanc - beige clair (sec) Verdâtre (saturé)
Composition minéralogique	Calcaire siliceux, calcite (50 %), opale (30 %), quartz (10 %), minéraux argileux (10 %)
Résistance à la compression non confinée	10 MPa
Densité apparente	1.3
Porosité	45 %

Des cubes d’arête de 8 cm rectifiés ont été testés. À l’origine, les spécimens sont coupés à l’aide d’une scie classique pour les matériaux de construction comme les pierres et le béton. Les éprouvettes obtenues risquent d’avoir une face non rectifiée en raison de la scie elle-même. Le processus de rectification se fait à l’aide d’une machine 3R mini-matic. Les essais mécaniques sont appliqués à l’aide d’une SYNTAXE 3R avec un capteur de pesage d’une capacité de 50 kN. La FIGURE 1 montre une illustration de l’essai de compression pour une forme cubique. La charge appliquée a été progressivement augmentée jusqu’à 50% de la résistance à la compression, qui est de 11 MPa à l’état sec pour le tuffeau (Beck, 2006). La force maximale appliquée n’a pas dépassé 35 kN pour l’échantillon cubique.

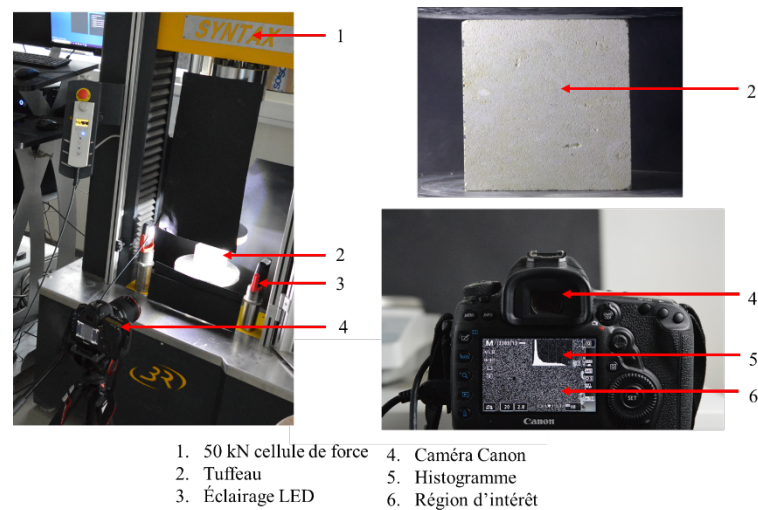


FIGURE 1 Mise en place expérimentale de la CIN

Une chose importante à prendre en compte dans notre expérience est la mise en place du test. La FIGURE 2 présente un exemple du comportement réel de la réponse mécanique des matériaux rocheux. Cette réponse est caractérisée par une phase perturbée entre 0 et 15% de la résistance de la pierre. Le début de la partie élastique commence une fois que les microfissures préexistantes ont été fermées et que la porosité a été écrasée (Guéguen and Palciauskas, 1992). Cette phase est considérée comme mal définie et correspond dans notre expérience à la mise en place. Pour cela, les images considérées seront prises entre 30 et 50% de la résistance maximale, ce qui correspond bien à la phase élastique reproductible du comportement. Ce comportement ne dépend que du matériau qui a des propriétés intrinsèques (Beck and Al-Mukhtar, 2004).

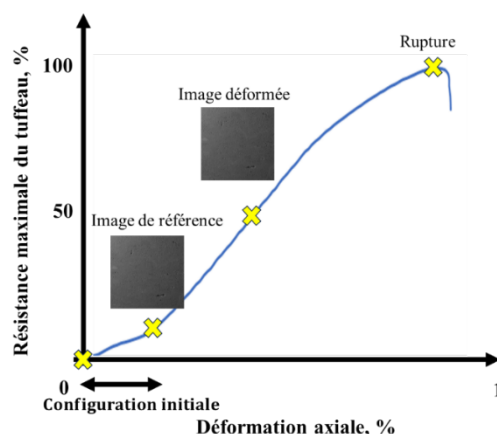


FIGURE 2 La réponse mécanique des matériaux rocheux lors de l'essai de compression

Des échantillons en pierre, ont été utilisés pour réaliser les mesures de déformation pendant un test d'imbibition. Les éprouvettes sont placées sur une grille enveloppée de papier absorbant qui permet une alimentation permanente en eau pendant l'essai. Lorsque la pierre est en contact avec l'eau, l'air qui remplit la porosité est remplacé par l'eau sans appliquer de pression externe. Ce phénomène d'imbibition capillaire est dû à la mouillabilité de l'eau dans un milieu poreux. Les mesures de déformations par CIN ont été faites sur une échelle plus petite que les essais mécaniques. Des mesures moyennes sur des jauges virtuelles ont été effectués afin d'être comparé avec les mesures des jauges de contraintes faites antérieurement. La FIGURE 3 montre la zone d'intérêt et la jauge virtuelle utilisée durant les mesures.

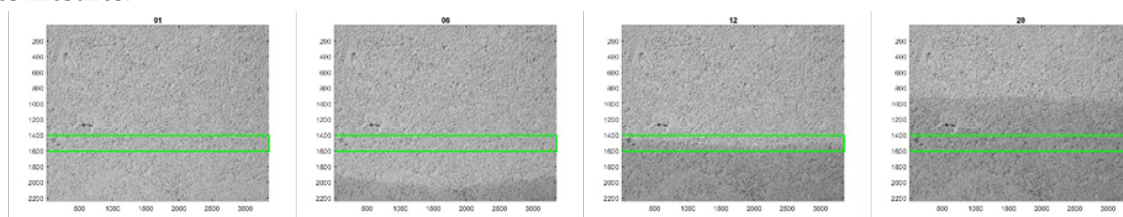


FIGURE 3 Zone d'intérêt et la jauge virtuelle utilisée (en vert) pendant un test d'imbibition

B. Paramètres CIN

1. Exposition, éclairage et texture CIN

Le processus comprend deux phases principales, la première est l'acquisition des images numériques et la seconde est le traitement numérique des images pour obtenir les résultats souhaités en termes de déplacement complet du champ. L'acquisition des images nécessitait le contrôle de différents paramètres et facteurs liés à l'image elle-même. Une image bien exposée doit avoir un histogramme uniformément réparti sur toute la plage d'intensité, sans aucune région sous-exposée ou surexposée. D'autre part, le contraste de l'image doit respecter certaines règles adéquates pour le traitement des algorithmes CIN, où la texture de la surface du matériau doit être constituée de petites caractéristiques distribuées de manière aléatoire qui peuvent être facilement suivies par l'algorithme de corrélation. Dans notre cas, la texture naturelle de l'échantillon est comparée à une texture appliquée (mouchetis artificiel) pour vérifier si le motif naturel est suffisant pour l'analyse CIN. Ceci est basé sur plusieurs facteurs, tels que la taille des spots où au moins 4 pixels de diamètre sont recommandés. En outre, la taille physique des éléments utilisés dans l'application prévue en simulation, où l'on considère que chaque élément doit contenir au moins 3-4 taches mouchetées (Reu, 2014). Nous avons choisi la plus petite valeur d'ouverture du diaphragme $f/2.8$, ce qui signifie que nous maximisons la quantité de lumière entrant dans l'appareil photo. Les valeurs ISO les plus basses sont choisies dans notre

expérience en raison de la lumière suffisante que nous avons des LED. Les deux sources de lumière ont été placées en diagonale sur l'échantillon. Le TABLEAU 2 récapitule tous les paramètres pris en compte pour chaque image.

TABLEAU 2 Paramètres d'acquisition et d'éclairage

N	Éclairage A (Puissance/Température)	Éclairage B (Puissance/Température)	Temps d'exposition
1	100% 3300k	100% 3300k	1/50
2	100% 4400k	100% 4400k	1/50
3	100% 5600k	100% 5600k	1/50
4	100% 5600k	100% 5600k	1/25
5	10% 5600k	100% 5600k	1/25
6	10% 5600k	100% 5600k	1/50

De plus, nous savons qu’avec un mouchetis artificiel, nous optimisons la texture et la taille de l’élément par rapport à un moucheté naturel. Cependant, l’histogramme en niveaux de gris n’est pas le seul facteur à prendre en compte, la taille des éléments utilisés dans l’analyse CIN a un impact significatif sur la précision et la fiabilité des résultats et doit être testée et comparée entre la moucheture naturelle et artificielle pour vérifier la plus pratique pour le processus de calcul.

2. Principe théorique de la DIC et des outils numériques

La méthode CIN s’appuie sur une diversité d’outils numériques développés pour mesurer avec précision les champs de déformation. Le déplacement de la surface du matériau est mesuré en comparant les images de la surface avant et après la déformation. Le traitement d’un ensemble d’images est réalisé par l’application d’un algorithme de corrélation. L’objectif de l’algorithme est de détecter la distribution du motif sur la surface, puis d’estimer le champ de déplacement en minimisant la différence entre le déplacement de l’image mesuré à l’aide des méthodes des moindres carrés (Équation 2). Les équations détaillées ci-dessous décrivent la dérivation de la solution d’un problème CIN (Hild and Roux, 2008). Les images d’origine et déformées sont considérées comme une fonction scalaire de la coordonnée spatiale. Chaque pixel discret des coordonnées x se voit attribuer une valeur en niveaux de gris. Les fonctions $f(x)$ et $g(x)$ représentent respectivement l’image de référence et l’image déformée. Le champ de déplacement est défini par $u(x)$. Ce champ permet la connexion entre les deux images en exigeant la conservation du flux optique (Équation 1) : La minimisation de la différence quadratique entre les membres droit et gauche intégrée sur le domaine étudié pour estimer $u(x)$.

$$g(x) = f[x + u(x)]$$

Équation 1

$$X^2 = \iint_{\Omega} [u(x) \cdot \nabla f(x) + f(x) - g(x)]^2 dx$$

Équation 2

Dans notre travail on a travaillé initialement pour la partie mécanique avec la version correli_q4 développée par François Hild et Stéphane Roux. Cette version est partagée avec des collègues à des fins de recherche (Hild and Roux, 2008). On a testé l’applicabilité et la validité de cette version avec nos images de tuffeau pour voir si les résultats sont pertinents ou pas. Puis avec les mesures hydriques on a resté toujours dans le même environnement Correli mais avec une version plus récente qui est Correli 3.0 (Leclerc J et al., 2015) avec cette version vue on travaille avec des changements de couleurs on a pu utiliser plus de fonctions liées aux changements de brillance et du contraste afin d’avoir des résultats plus comparables et adéquates.

III. Résultats et discussion

A. Calibrage de l'image

1. Optimisation de niveau de gris et effet de texture

Dans cette section, nous discutons de l'adaptation des motifs naturels du tuffeau pour les mesures de CIN. Des facteurs tels que l'éclairage, l'ouverture et le temps d'exposition doivent être pris en compte lors de l'acquisition d'images. Il est essentiel de s'assurer que les images acquises offrent un contraste suffisant entre l'arrière-plan et le motif. Dans la FIGURE 4, nous présentons l'histogramme en niveaux de gris des différentes conditions d'éclairage et des valeurs d'ouverture, comme mentionné et détaillé dans TABLEAU 2. Toutes les images montrent une distribution en niveaux de gris similaire en termes de forme, cependant, nous avons pu clairement observer que pour les images 5 et 6, la distribution en niveaux de gris est la plus étalée et centrée. Il est plus pratique de travailler avec le maximum possible de distribution en niveaux de gris, ce qui est cohérent avec les histogrammes 5 et 6. Les histogrammes 1 à 4 montrent la même distribution qui couvre principalement les valeurs des niveaux de gris comprises entre 100 et 200 environ. Pour optimiser l'analyse de corrélation, les niveaux de gris doivent couvrir les niveaux maximaux entre le blanc et le noir. Ainsi, travailler avec une distribution centrée devrait être une meilleure solution pour l'analyse où on considère la configuration 6 pour la suite des analyses. Cela ne signifie pas que les autres histogrammes ne sont pas réalisables, mais qu'ils pourraient être optimisés.

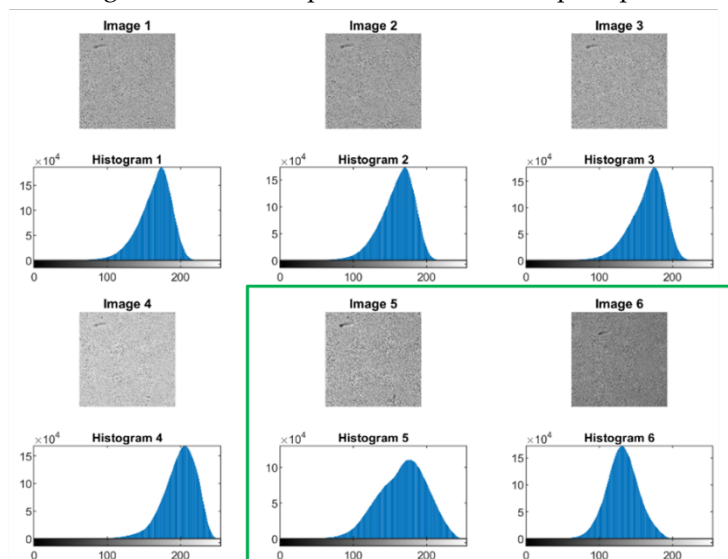


FIGURE 4 Histogrammes en niveaux de gris pour différents types de valeurs d'ouverture et de conditions d'éclairage

2. Effet de taille d'élément

Dans la FIGURE 5, nous présentons la distribution des éléments pour chaque type de texture. La région d'intérêt (ROI) de l'image est égale à 60 x 60 mm avec une résolution de 25 μm pour chaque pixel. Comme nous pouvons le remarquer, lorsque nous zoomons sur une zone d'intérêt (ZOI) de 6 x 6 mm et que nous considérons une taille de 15 pixels de l'élément utilisé dans le calcul CIN, nous constatons que le motif n'est pas bien distribué dans les deux cas où nous avons trouvé des zones où l'élément est complètement recouvert ou découvert par le motif. Si nous considérons une taille d'élément supérieure à 15 pixels, nous remplissons les conditions requises pour en termes de taches détectées dans l'élément et de taille du motif local, comme indiqué précédemment, où il est considéré que chaque élément doit contenir au moins 3 à 4 taches mouchetées et que la taille des taches doit être d'au moins 4 pixels. Afin de vérifier l'adéquation de la taille de l'élément, un test de compression est effectué sur un cube de tuffeau (8x8x8 cm). La déformation dans la direction verticale est visualisée pour une taille d'élément

de 16 et 48 pixels dans la FIGURE 6. Comme nous pouvons l'observer pour les deux zones, nous avons pu constater que pour l'élément de taille 16 pixels, ces zones sont affectées et induisent un bruit remarquable dans les résultats. Les résultats de sortie montrent le niveau de bruit dans les cas locaux et globaux, où nous sommes obligés d'augmenter la taille de l'élément pour réduire le bruit détecté. Pour la taille de 48 éléments, nous avons pu observer que les résultats de sortie sont beaucoup plus représentatifs et homogènes avec moins de bruit. Le choix d'un élément supérieur ou égal à 48 pixels présente un meilleur choix pour l'analyse et remplit les conditions requises pour les exigences de texture pour la texture naturelle, comme nous l'avons vu précédemment.

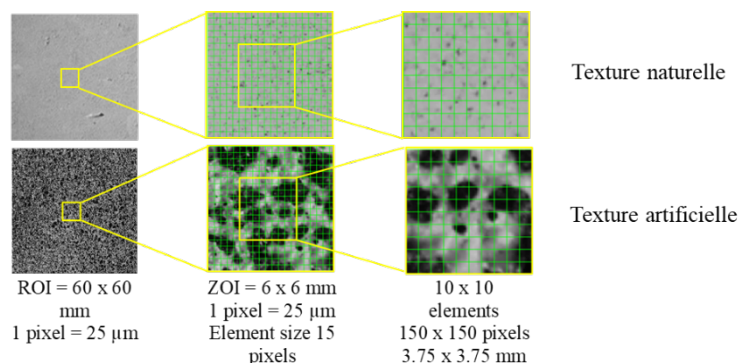


FIGURE 5 Texture et motif artificiel de tuffeau naturel

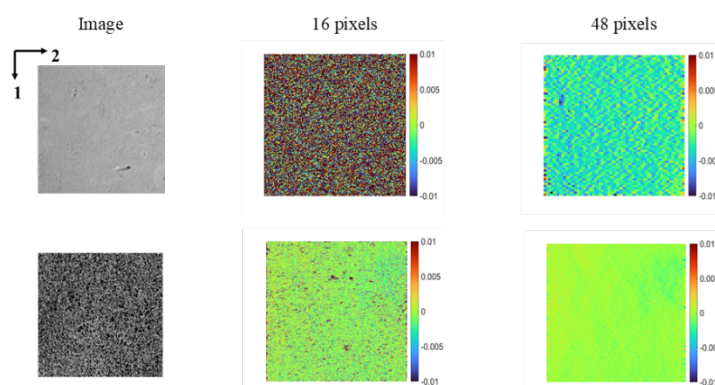


FIGURE 6 Détection du bruit dans la direction verticale pour un élément de 16 et 48 pixels lors d'un test de compression

B. Essais mécaniques – Validation

Enfin, les champs de déplacement et de déformation sont présentés et discutés pendant un essai de compression uni axiale qui a été effectué sur les échantillons cubiques rectifiés. Nous présentons dans la FIGURE 7 les résultats pour le cube rectifié pour un chargement de 50% de la capacité maximale du tuffeau. Les résultats montrent un comportement homogène attendu du champ de déplacement dans les directions 1 et 2 respectivement. La direction 1 qui correspond à la direction verticale, nous nous attendons à un déplacement plus élevé dans la face supérieure en raison de la compression qui lui est appliquée, tandis que pour la face inférieure, nous attendons une valeur de déplacement plus faible en tenant compte du fait que cette face est soutenue verticalement. Le déplacement vertical varie entre 0 et 12 pixels. Pour la direction 2 qui correspond à la direction horizontale, on trouve une dilatation quasi-symétrique due à l'effet du Poisson, ce qui est attendu dans de tels essais de compression. Le déplacement varie entre -2,5 et 2,5 pixels. Pour les champs de la déformation, nous avons observé un modèle conforme avec les champs de déplacement. Dans la direction 1, nous avons un champ homogène globalement avec une valeur moyenne de $-2,25 \times 10^{-3}$ et quelques déformations locales et limitées avec une amplitude moyenne de $-4,5 \times 10^{-3}$. Pour la direction 2, nous avons pu identifier la forme d'un cône

qui correspond bien à la dérivation du champ de déplacement. Une valeur moyenne de 5×10^{-4} est remarquée dans la zone de contour du cube, tandis qu'une valeur de déformation plus élevée de 1×10^{-3} est identifiée dans la zone intérieure du cube. Ces résultats valident nos résultats pour un cube rectifié, où le déplacement et le champ de déformation sont conséquents à ce que nous attendons pour un essai de compression simple. Il convient de mentionner que les zones locales élevées de déformations que nous avons détectées dans les échantillons sont liées à certains défauts dans l'image du tuffeau, où nous avons une variation de contraste liée aux irrégularités du matériau. Ainsi, l'analyse de corrélation est influencée par ces traces et donne des déformations élevées qui ne sont pas liées à la charge mécanique.

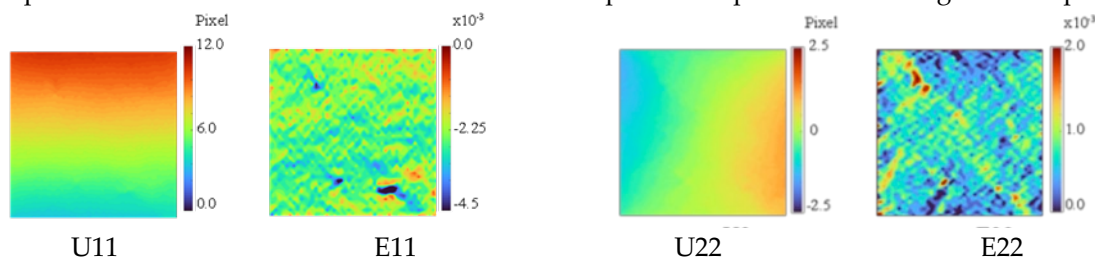


FIGURE 7 Les champs de déplacement et de déformation pour les éprouvettes rectifiées

C. Essais Hydriques – mesure de déformation durant l'imbibition

Des mesures des déformations sont faites par corrélation des images numériques sur une série de images de tuffeau pris lors de l'essai de l'imbibition. En comparant avec les essais mécaniques, afin de détecter les phénomènes déroulant durant l'imbibition, cela exige d'aller avec une échelle plus grande comme on remarque avec la FIGURE 8. La même démarche a été suivie pour le choix de la configuration d'acquisition de ces images. En examinant le résidu de corrélation associé à ces images FIGURE 9, une observation pertinente se dégage. Il devient apparent que la détection du front d'imbibition peut être réalisée efficacement en se basant sur ces résidus. Notamment, des valeurs significatives se manifestent à l'interface des zones imbibée et sèche.

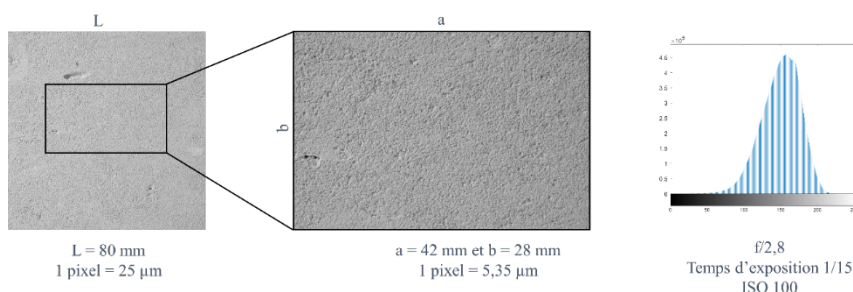


FIGURE 8 Distribution de niveau de contraste pour l'échelle considéré

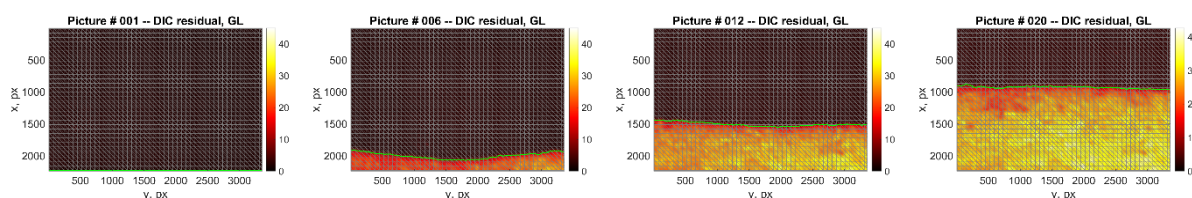


FIGURE 9 Variation du Résidu Lagrangien durant l'imbibition

La FIGURE 10 montre la variation de la déformation moyenne de la zone de la jauge virtuelle. À travers cette approche, les variations de déformation ont été tracées pour trois directions clés : 11, 22, et 12. L'examen de la variation de la déformation dans la direction 2 révèle un phénomène remarquable. Une expansion progressive est détectée en fonction du nombre d'images, avec une légère diminution perceptible entre les images 10 et 15. En examinant attentivement la direction y, une variation

substantielle, de l'ordre de 20×10^{-4} , émerge entre les images 10 et 15. Cette observation significative est directement liée au passage du front d'imbibition, une transition clairement perceptible sur les images associée. Une constatation similaire est faite dans la direction 12, où un pic notable de l'ordre de 10×10^{-4} coïncide avec le même intervalle de temps que celui observé pour E11. Il fait noter que les allures trouvées sont similaires aux mesures faites par des jauges durant des études précédentes (Hassine et al., 2018). Une différence en termes d'amplitudes est remarquable et peut être expliquée par le lien avec la taille des jauges où les valeurs sont moyennes sur la zone couverte par la jauge.

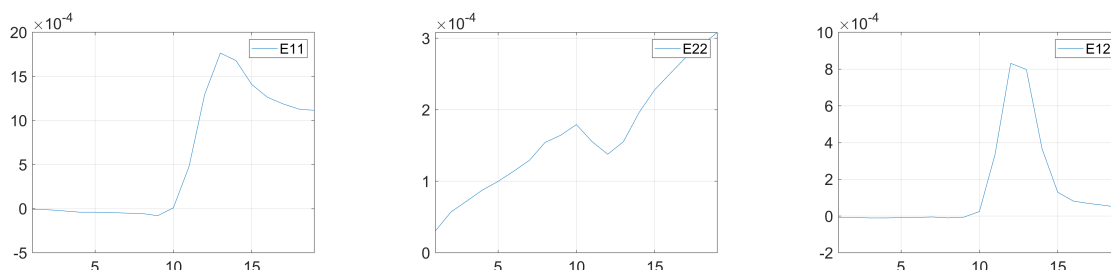


FIGURE 10 Variation de la déformation sous une jauge virtuelle

Dans l'objectif d'obtenir une vision exhaustive des déformations, un champ 2D de la déformation en direction 12 pour l'ensemble de l'image a été généré comme la montre la FIGURE 11. Les résultats révèlent des observations significatives, mettant en lumière une bande de cisaillement qui suit de près le passage du front d'imbibition tout au long du processus. Cette observation suggère une réaction dynamique où la zone imbibée tente de se dilater sous l'absorption d'eau, tandis que la zone sèche, apparemment non encore impactée par l'imbibition, gêne la déformation de la zone imbibée. Cette interaction donne lieu à la formation d'une zone de cisaillement entre les deux régions. Cependant, il est essentiel de souligner que malgré ces découvertes, des calculs supplémentaires sont nécessaires pour évaluer avec précision les incertitudes associées à ces données, ainsi que pour tenir compte des effets potentiels de la luminosité sur les résultats obtenus.

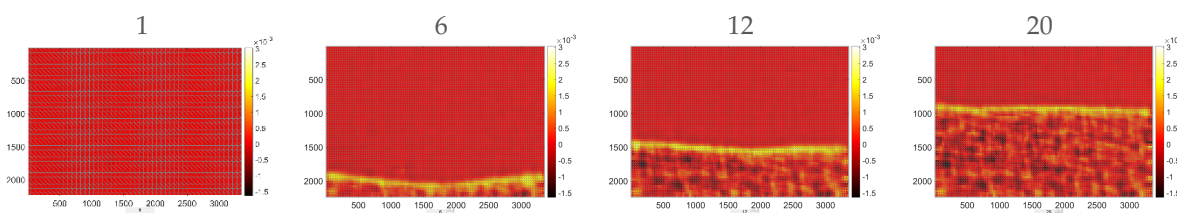


FIGURE 11 Variation de la déformation du cisaillement E12

IV. Conclusion

La corrélation d'images numériques (CIN) a permis de mieux comprendre le comportement des pierres et les dommages qui sont souvent cachés dans ces matériaux. Cette pierre se caractérise par une hétérogénéité et une variété potentielle d'un échantillon à l'autre. Cette imprévisibilité combinée à la fragilité du tuffeau rend le suivi du comportement mécanique très incertain. À travers cette étude, nous soulignons l'importance de l'étalonnage de la configuration CIN, et nous présentons tous les facteurs qui peuvent affecter l'entrée. Nous montrons ce qu'il faut faire en tenant compte de l'éclairage à l'aide des LED, et ce qu'il est important de prendre en compte pour optimiser l'histogramme en niveaux de gris de l'image en termes d'obtention d'un contraste et d'une variabilité suffisants entre les motifs de l'image. Nous avons confirmé que la texture naturelle du tuffeau est pratique pour l'analyse, nous avons testé numériquement la taille optimale de l'élément et l'outil le plus fiable pour faire l'analyse. Ensuite, pour l'étude mécanique, les résultats montrent pour le cube rectifié que notre calibrage est valide. L'analyse des déformations durant l'imbibition de la pierre de tuffeau révèle des variations notables

dans toutes les directions. L'émergence d'une bande de cisaillement, en corrélation avec le front d'imbibition, souligne l'impact dynamique de l'absorption d'eau sur la structure du matériau et construit une base forte sur l'effet potentiel de cette bande sur le développement de la desquamation en couplant autres facteurs importants. Une investigation expérimentale est en cours sur des échantillons desquamés et non desquamés afin d'étudier l'influence des déformations détectées sur le développement des desquamations, ainsi que sur le comportement et la résistance du matériau, notamment en ce qui concerne les contraintes générées.

REFERENCES

- Beck, K., 2006. Étude des propriétés hydriques et des mécanismes d'altération de pierres calcaires à forte porosité. Thèse de doctorat, Université d'Orléans.
- Beck, K., Al-Mukhtar, M., 2010. Weathering effects in an urban environment: A case study of tuffeau, a French porous limestone. *Geol Soc Spec Publ* 331, 103–111. <https://doi.org/10.1144/SP331.8>
- Beck, K., Al-Mukhtar, M., 2004. The mechanical resistance properties of two limestones from France, Tuffeau and Sébastopol, in: *Dimension Stone*.
- Beck, K., Al-Mukhtar, M., Rozenbaum, O., Rautureau, M., 2003. Characterization, water transfer properties and deterioration in tuffeau : building material in the Loire valley-France. *Building and Environment*, Elsevier 1151–1162. [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(03\)00074-Xi](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(03)00074-Xi)
- Benavente, D., Cultrone, G., Gomez-Heras, M., 2008. The combined influence of mineralogical, hygric and thermal properties on the durability of porous building stones. *European Journal of Mineralogy* 20, 673–685. <https://doi.org/10.1127/0935-1221/2008/0020-1850>
- Guéguen, Y., Palciauskas, V., 1992. Introduction à la physique des roches.
- Hassine, M.A., Beck, K., Brunetaud, X., Al-Mukhtar, M., 2018. Strain measurements during capillary water infiltration in porous limestones. *Constr Build Mater* 175, 439–447. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.182>
- Hild, F., Roux, S., 2008. CORRELI Q4: A Software for “Finite-element” Displacement Field Measurements by Digital Image Correlation Internal report no. 269.
- Janvier-Badosa, S., Beck, K., Brunetaud, X., Al-Mukhtar, M., 2014. The occurrence of gypsum in the scaling of stones at the Castle of Chambord (France). *Environ Earth Sci* 71, 4751–4759. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2865-2>
- Janvier-Badosa, S., Beck, K., Brunetaud, X., Guirimand-Dufour, A., Al-Mukhtar, M., 2015. Gypsum and spalling decay mechanism of tuffeau limestone. *Environ Earth Sci* 74, 2209–2221. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4212-2>
- Leclerc J, Neggers J, Mathieur F, Roux Stéphane, Hild, F., 2015. Correli 3.0. Agence pour la Protection des Programmes, Paris (France), IDD.N.FR.001.520008.000.S.P.2015.000.31500.
- Reu, P., 2014. All about speckles: Speckle Size Measurement. *Experimental Techniques*, Society for Experimental Mechanics 38. <https://doi.org/10.1111/ext.12110>
- Segouin, V., 2019. Développement d'un outil de Corrélation d'Images Numériques pour la caractérisation du comportement piézoélectrique et ferroélectrique. Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay - CentraleSupélec.
- Sutton, M.A., McNeill, S.R., Helm, J.D., Chao, Y.J., 2000. Two-Dimensional and Three-Dimensional Computer Vision, in: Rastogi, P.K. (Ed.), *Photo-Mechanics*. Springer, pp. 323–372. https://doi.org/10.1007/3-540-48800-6_10
- Sutton, M.A., Orteu, J.J., Shceier, H., 2009. Image correlation for shape, motion and deformation measurements: Basic concepts, theory and applications, *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78747-3>