
Caractérisation expérimentale de la décohésion des inclusions granulaires dans un béton soumis à une sollicitation dynamique

Silvère PIERRE¹, Fabrice GATUINGT¹

¹ LMT, 61 avenue du Président Wilson, 94230 Cachan (CNRS UMR 8538 - Université Paris Saclay)

RÉSUMÉ. Dans les milieux hétérogènes, les mécanismes physiques et mécaniques ne peuvent être complètement analysés sans prendre en compte la présence d'interfaces au sein des matériaux. Ces frontières, d'épaisseur faible, voir nulle, présentent un défi en terme de modélisation et de caractérisation expérimentale. Dans les matériaux cimentaires comme le béton, les interfaces entre inclusions rocheuses et pâte de ciment sont particulièrement importantes de par leur épaisseur non négligeable, leur structure très poreuse et leur comportement mécanique plus faible. De par leur structure poreuse, une grande quantité d'eau libre est stockée dans ces zones. Une présence qui est associée par beaucoup à la variation des comportements mécaniques sous sollicitations dynamiques. Dans cette étude, une méthode expérimentale de caractérisation de l'interface entre une roche, le granite, et un mortier est présentée. Les méthodes de dépouillement permettant d'obtenir différents paramètres caractérisant le comportement à rupture de cette interface seront discutés.

ABSTRACT. In heterogeneous materials, physical and mechanical processes cannot be thoroughly analyzed without considering the interfaces inside those materials. Those boundaries of little to no thickness are a challenge when it comes to modelling or experimental identification. In cement-based materials such as concrete, interfaces between rock particles and cement matrix are particularly essential due to their non-negligible thickness and highly porous structure and lower mechanical properties. A higher water amount is contained in these porous zones, the same water which is held responsible for the rate effects of cement by many. In this study, an experimental procedure to identify the dynamic behaviour of an interface between a rock, here the granite, and a cement paste is presented. Post-treatment strategies to get several parameters defining the fracture processes of this interface are discussed.

MOTS-CLÉS : interface, dynamique, décohésion, béton

KEYWORDS: interface, dynamic, debounding, concrete

1. Introduction

Le rôle et l'importance des interfaces entre différents milieux est une question universelle quand on s'intéresse à la physique. Elles peuvent être virtuelles ou physiques suivant la définition qu'on leur donne mais il reste que leur présence dans un modèle n'est jamais triviale. Et pourtant, les physiciens, mathématiciens et mécaniciens ne cessent de trouver de nouveaux intérêts à ces lieux si particuliers [1] [2]. Il est donc important de bien comprendre les phénomènes complexes et spécifiques que l'on peut y rencontrer.

En mécanique des solides, quand on s'intéresse à un matériau composé de plusieurs phases, il est primordial de bien comprendre les interactions entre celles-ci. Cela va bien au-delà du fait de connaître les caractéristiques de chaque phase prise indépendamment, car les mécanismes et propriétés mécaniques des interfaces influent parfois plus sur le comportement global du matériau multi-phasique [3].

C'est une problématique que l'on retrouve dans les domaines du génie civil et de l'aéronautique où l'utilisation de matériaux composites constitués d'inclusions dispersées dans une matrice liante est monnaie courante. Pour cette étude, le cas particulier des interfaces entre matrice cimentaire et granulat rocheux va être étudiée. L'objectif n'est pas ici de tirer des conclusions générales sur ces interfaces mais de développer une méthodologie de détermination des caractéristiques dynamiques de cette frontière méconnue. Il est en effet connu que des modifications mineures des processus de coulage ou de curage, de la formulation des bétons, ou encore de la nature des granulats peut venir altérer grandement l'aspect et le comportement des zones de transitions qui auréolent les granulats [4]. Pour cette raison, une seule formulation de béton et un seul type de roche seront étudiés ici : un mortier haute performance industriel, Sikacem Pack, et un granite.

Cette méthodologie consiste à utiliser des tests de flexion en dynamique sur des échantillons de formes innovantes par leur simplicité. Le dépouillement des résultats doit tenir compte de cette géométrie particulière et exploite des outils avancés de corrélation d'images numérique (CIN) développés au LMT [5].

L'objectif de cette approche est d'obtenir des paramètres importants pour les modèles numériques, tels que l'énergie de fissuration ou la résistance en traction de ces interfaces. L'énergie de fissuration est un paramètre dont l'obtention reste encore mal maîtrisée (surtout en dynamique) et plusieurs approches seront discutées.

2. Phénomènes importants pour la représentation de la rupture dynamique d'un béton

Comme annoncé précédemment, l'objectif de cette étude est de fournir une stratégie de caractérisation expérimentale des interfaces entre un mortier et un type de granulat particulier le granite, en particulier en dynamique. Afin de correctement analyser les résultats de nos tests, il est important de bien comprendre les mécanismes mis en jeu lors de la rupture d'un béton sous un chargement rapide

Ce qu'on nomme effet de vitesse dans le béton correspond à une variation non-linéaire de sa résistance mécanique en fonction de la vitesse de sollicitation qu'on lui impose. Ce phénomène a été identifié pour la première fois dans le béton au milieu du XX^{ème} siècle [6].

La résistance du béton croît avec l'augmentation de la vitesse de déformation du matériau. Cette augmentation connaît plusieurs phases de progression visibles sur la Figure 1 : une première phase d'augmentation lente avant $1s^{-1}$, puis une augmentation nettement plus rapide de la résistance au-dessus de cette vitesse de déformation.

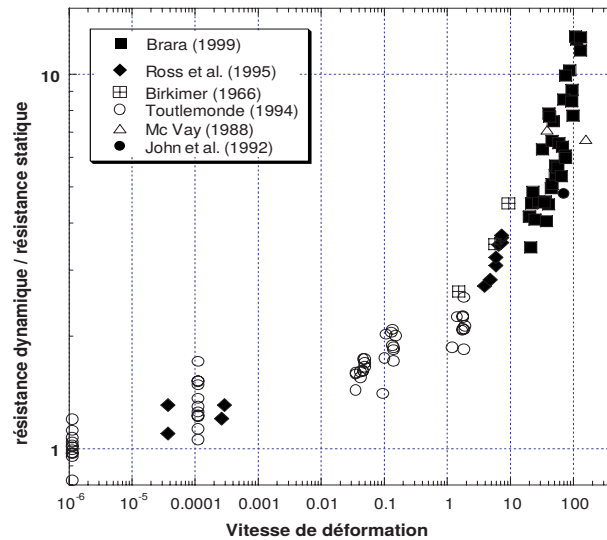


Figure 1. Représentation des effets de vitesse (source [7])

Les phénomènes les plus souvent répertoriés comme ayant un lien avec ce phénomène sont :

- le fluage de la pâte de ciment (ce phénomène n'est pas listé par tous les auteurs qui considèrent que son échelle de temps caractéristique est trop importante pour être considérée, mais d'autres comme [8], prenant la définition du terme *dynamique* au sens large, l'intègrent à leurs modèles),
- la viscosité de la pâte de ciment, souvent résumé par l'effet Stefan,
- la vitesse de propagation des fissures qui est liée aux effets inertiels à l'échelle locale,
- l'inertie structurelle ou globale.

2.1. Influence de l'inertie

Une majorité de la communauté scientifique [9] [10] [11] attribuent maintenant l'essentiel de l'augmentation de la résistance dynamique du béton pour les hautes vitesses de déformations ($> 10^{-2} s^{-1}$) à des phénomènes liés plus ou moins directement à l'inertie.

Les phénomènes inertiels sont généralement différenciés par certains auteurs ([7] ou [12]) en deux catégories : certains liés à l'inertie *matérielle* c'est à dire à des comportements locaux ne dépendant que de la nature du matériau, et d'autres aux forces d'inertie *structurelles*, qui elles, sont dépendantes de la géométrie de l'éprouvette testée et des chargements.

2.1.1. Inertie matérielle

On présente comme origines de l'inertie *matérielle* la limitation de la vitesse d'ouverture des fissures et la multi-fissuration qui sont des phénomènes liés. Les fissures devraient pouvoir atteindre des vitesses d'ouverture

aussi importantes que la vitesse des ondes de Rayleigh. Cependant, ce n'est pas ce qui fut démontré théoriquement [13] dans le cas idéal des milieux élastiques et déjà relevé expérimentalement par [14] et plus récemment par [15] ou [12] : la vitesse de propagation des fissures semble plafonner aux alentours de $500 - 650 \text{ m.s}^{-1}$ (entre $1/4$ et $1/3$ de la vitesse des ondes de Rayleigh).

Lorsque la pointe de fissure avance à de telles vitesses, les forces inertielles nécessaires pour écarter les lèvres de la fissure deviennent trop importantes pour progresser plus rapidement.

En raison de ces forces inertielles, la vitesse de dissipation d'énergie d'une fissure est limitée. Quand on augmente la vitesse de sollicitations, ce taux de dissipation d'énergie n'est plus suffisant. Ouvrir une autre fissure, ou déclencher une ramification quand c'est possible, permet au matériau d'augmenter le taux de dissipation de l'énergie. Les principes fondamentaux de la thermodynamique et particulièrement le principe de maximisation de l'entropie tendent à augmenter le nombre de fissures.

Ce fait explique pourquoi en dynamique, on considère que le processus de rupture se déroule en plusieurs étapes [16] :

- Une première phase de micro-fissuration diffuse au cours de laquelle la matrice cimentaire, plus faible, s'endommage uniformément dans les zones où la contrainte dépasse la résistance en traction et préférentiellement au niveau des interfaces entre les différentes phases du béton, les auréoles de transition. Cette multi-fissuration, qui est bien plus importante en dynamique pour les raisons qui seront expliquées dans le paragraphe suivant, dissipe beaucoup d'énergie et explique une partie de l'augmentation de la contrainte ultime quand on charge dynamiquement le matériau.

- Puis les micro-fissures vont croître et coalescer pour former des macro-fissures. Ces fissures subissent la même limitation que les micro-fissures quant à leur vitesse de propagation ce qui favorise la multi-fissuration.

- Enfin, une ou plusieurs fissures vont être dominantes et provoquer la ruine du matériau. Les fissures qui cessent d'être sollicitées car elles sont *occultées* par une fissure active peuvent se refermer [17].

La vitesse de chargement va jouer un rôle majeur sur l'ouverture des fissures car pour les hautes vitesses de chargement, on s'intéresse à des phénomènes transitoires. Il n'y a plus d'état d'équilibre et l'ouverture des fissures ne va pas venir relâcher les contraintes de la même façon qu'en quasi-statique. Au contraire, en raison de l'inertie du matériau déjà en mouvement et du temps que mettront les ondes de relaxation à se propager dans le matériau, des fissures proches pourront se développer simultanément. Comme dit précédemment, la multi-fissuration qui en résulte augmente fortement le taux de dissipation de l'énergie.

Ce mécanisme semble actif autant pour la micro-fissuration qui peut être amenée à se prolonger après l'ouverture de macro-fissures, que pour les macro-fissures qui peuvent co-exister dans des zones où en quasi-statique le fait que chaque état soit un état d'équilibre aurait entraîné une localisation beaucoup plus importante de la dissipation de l'énergie et n'aurait engendré qu'un nombre très limité de fissures.

Cette augmentation de la dissipation provoquée par l'inertie *matérielle* contribue à l'augmentation de résistance du matériau car elle augmente l'énergie nécessaire pour provoquer la ruine du béton.

2.1.2. Inertie structurelle

Cet aspect des forces inertielles est plus compliqué à décrire car il est par nature dépendant de la géométrie des éléments en béton testés. Plusieurs auteurs tels que [18] parlent de forces *structurelles* pour désigner d'autres mécanismes que celui dépeint dans cette partie.

Ici, les forces d'inertie *structurelles* considérées seront celles qui vont venir intervenir à la suite de la mise en mouvement de la structure complète de l'éprouvette. Cette mise en mouvement globale qui peut être complètement découplée des phénomènes localisés en pointe de fissure, a pourtant un impact direct sur les états de contraintes globaux et vient modifier les mécanismes de fissuration.

Un exemple frappant et qui permet d'illustrer ces effets est le confinement dynamique qui a été mis en évidence par [19] ou encore [20].

En effet, les expériences de ces auteurs (parmi d'autres) ont prouvé que le béton soumis à un chargement dynamique uniaxial subissait des contraintes radiales correspondant à l'effet de Poisson qui est partiellement empêché par la vitesse même de progression des ondes dans le matériau. Dans le cas de la compression, on se rapproche de conditions oedometriques tandis qu'en traction, on se rapproche de conditions de traction multi-axiale.

Si en traction, ce comportement ne permet pas d'expliquer l'augmentation de résistance du béton, en compression, le confinement occasionné semble s'opposer à la micro-fissuration et augmente considérablement la résistance comme l'ont montré [9] ou [21].

Cependant, il semble qu'une bonne représentation de ces phénomènes inertiels et de mécanique de la rupture ne suffise pas à retrouver la totalité des effets de vitesse [22].

2.2. Influence de l'eau libre

Pour beaucoup [23] [24] [25] [26] ou [27] l'augmentation de la résistance en dynamique est également liée à des phénomènes visqueux intrinsèques à la pâte de ciment. Ces phénomènes voyant leur origine dans l'eau libre présente dans les pores et la structure des hydrates.

Ces phénomènes sont généralement expliqués en les assimilant à l'effet Stefan : la force visqueuse qui apparaît quand on sépare dynamiquement deux plaques planes séparées par un écartement minime par rapport à leurs dimensions et comblé par un liquide visqueux.

La formule théorique qui permet de calculer la valeur de cette force, bien connue des physiciens (cf. [28]) est :

$$F(\dot{h}) = \dot{h} \frac{3\eta V^2}{2\pi h^5} \quad [1]$$

où F , est la force visqueuse appliquée pour séparer les plaques, η , est la viscosité du fluide, V , est le volume de fluide, h , est l'écartement entre les plaques et \dot{h} , est la vitesse d'écartement des plaques.

L'effet Stefan vient compléter la résistance, indépendante de la vitesse, qui résulte de la tension superficielle du liquide [29].

Cet effet physique refléterait donc pour [18] [27] ou les autres, la résistance visqueuse de cette eau libre dans le matériau lors de la phase élastique du comportement de la matrice cimentaire. Cette ressemblance des mécanismes ne permet malheureusement pas une estimation quantitative de l'augmentation de la résistance dynamique du béton.

Pour autant, du fait que la porosité au niveau des auréoles de transition est différente de celle de la matrice cimentaire seule [30], les effets de cette eau libre sur le comportement des interfaces entre granulat et pâte de ciment ne peuvent être négligés.

L'influence de ce mécanisme ne s'étendrait pas au-delà de l'initiation des fissures et les auteurs comme [31] fixent une limite d'efficacité en déformation dans leur modèle pour le représenter.

Cette hypothèse sur l'influence prédominante de l'eau libre dans le béton semble appuyée par un constat expérimental documenté par [32] et [33] ou plus récemment par [34] : les bétons secs ne connaissent peu ou pas d'augmentation de résistance en dynamique, contrairement aux bétons non séchés.

Cependant, [35] a proposé une explication alternative pour justifier la différence entre les bétons secs et humides. Sa proposition est que la rupture dans les bétons secs est causée par des réflexions d'onde sur les pores vides, ce qui crée des zones de concentrations de contraintes que l'on ne trouverait pas si le béton était humide et les réflexions d'ondes plus faibles. Cette hypothèse remet en cause le fait que l'eau libre est un mécanisme de l'augmentation de la contrainte maximale, mais sans apporter une explication complémentaire à cette résistance accrue.

Ainsi la plupart des auteurs comme [16] [36] [22] ou [37] jugent que les phénomènes visqueux et les phénomènes inertiels sont responsables du comportement dynamique macroscopique et doivent être pris en compte pour assurer une bonne représentation des effets de vitesse. Les phénomènes visqueux liés à la présence d'eau causant une part non négligeable de la résistance dynamique du béton, et les phénomènes liés à l'inertie étant à l'origine du restant de l'augmentation de résistance dynamique et de la majorité de l'augmentation de la dissipation d'énergie.

La transition entre les deux domaines de prédominance pour l'augmentation de la résistance étant progressive et ayant lieu aux alentours de $10s^{-1}$, selon [18].

3. Dispositif expérimental

Afin d'identifier aisément le comportement de l'interface, une nouvelle géométrie d'éprouvette a été choisie. Ces échantillons sont ensuite sollicités en flexion en dynamique. Les matériaux choisis ainsi que le détail de la géométrie et des essais sont détaillés ci-après.

3.1. Matériaux utilisés

Deux matériaux ont été utilisés pour la réalisation de nos échantillons. Le premier est un mortier réalisé à l'aide d'un mélange industriel haute performance SikaCem Pack et de sable (0 – 4mm). Le second est un même bloc de granite dans lequel tous nos échantillons ont été découpés.

	Mortier	Granite
E [GPa]	25	80
ν [-]	0.2	0.25
f_t [MPa]	1.87	1.89
f_c [MPa]	70	/

Tableau 1. Paramètres en quasi-statique des matériaux utilisés

Ces deux matériaux ont été testés en quasi-statique pour obtenir les paramètres du tableau 1. Les valeurs des constantes d'élasticité E et ν et de la contrainte à rupture en compression f_c sont issues d'essais de compression simple. La contrainte à rupture en traction f_t a été déterminée en flexion 3 points sur des éprouvettes $4 \times 4 \times 16$ cm.

Pour les échantillons contenant du mortier, les échantillons sont démoulés environ 24h après le coulage et sont immergés pendant au moins 28 jours, jusqu'aux essais. Le processus de curage a été jugé nécessaire pour éviter le retrait de dessiccation qui pourrait endommager les interfaces entre roche et pâte de ciment.

3.2. Géométrie des échantillons

Nos tests étant basés sur des essais de flexion, la géométrie qui a inspiré les essais est celle très classique des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16$ cm, la même que celle utilisée lors de nos essais quasi-statique pour obtenir les caractéristiques de nos deux matériaux. Cette décision est justifiée par la volonté de s'affranchir des effets d'échelle pour le dépouillement de nos résultats.

Pour parvenir à caractériser la décohésion de notre interface, il fallait que la seule fissure qui se développe (ou au moins la première, dans le cas des essais dynamiques) suive l'interface entre granulat et mortier. Dans le cas de la flexion 3 points, l'allure classique des fissures est un plan normal à la fibre neutre de la poutre qui traverse la poutre au niveau de l'appui central. S'inspirant de cette allure de rupture, il a été choisi de créer une interface plane normale à la fibre neutre de la poutre, située au centre de la poutre. Pour cela, il suffit de découper un parallélépipède rectangle dans le granite de 4 cm de large et de venir l'insérer dans le moule avant le coulage. Les dimensions exactes qui ont été choisies pour nos pièces de granite est $40 \times 5 \times 60$ mm.

Un système de fixation est nécessaire pour pouvoir vibrer les moules sans modifier le positionnement de notre pièce. C'est pour cette raison qu'il a été choisi de la laisser dépasser en hauteur, afin de venir fixer sa position jusqu'à prise du mortier.

Figure 2. Représentation de la géométrie des échantillons : éprouvette en mortier avec inclusion en granite

Même si la position de l'appui central du dispositif de flexion sera contrôlée pour être au niveau d'une des deux interfaces entre granite et mortier, il a été jugé préférable de limiter la dimension de la surface de contact entre les

deux matériaux sur une des deux faces de la pièce de mortier, créant ainsi une entaille. Pour cela, plutôt que de venir scier l'éprouvette après sa prise, le choix a été fait de plaquer une feuille de plastique le long du granite. La surface de liaison entre les matériaux est donc pilotée par la position de cette feuille, qui sera retirée au démoulage, laissant une entaille ($\simeq 0.5 \text{ mm}$). Le rendu global est illustré sur la Figure 2.

Enfin, afin de garantir un bon contact avec les différents appuis, la face inférieure des éprouvettes sera polie pour assurer une bonne répartition des efforts.

3.3. Mise en place des essais

Des barres d'Hopkinson de plusieurs matériaux et diamètres étaient disponibles au laboratoire. Le choix a été fait d'utiliser des barres en aluminium de diamètre 60 mm en raison de leur diamètre et de leur impédance de même ordre de grandeur que nos matériaux. Cependant, l'essai en dynamique ne se passera pas à l'équilibre et des simulations numériques préalables montrent que la fissuration devrait se produire avant que les ondes aient le temps de propager jusqu'au appuis et de revenir vers la zone centrale. Pour ces raisons, le choix est fait de ne pas avoir de barres sortantes : on parle alors de flexion 1 point. Selon la même justification, si l'échantillon est placée de façon à ce que la fibre neutre soit verticale, le type de support sur lequel il est placé ne devrait pas influencer la fissuration.

Le contact entre la barre entrante et l'éprouvette a donné lieu à plusieurs essais :

- utiliser des barres entrantes de plus faibles diamètres pour avoir un contact circulaire au centre de l'éprouvette,
- sceller l'éprouvette contre la barre entrante pour avoir une meilleure transmission de l'onde de compression,
- utiliser une petite pièce d'aluminium entre la barre et l'éprouvette pour contrôler la surface d'impact.

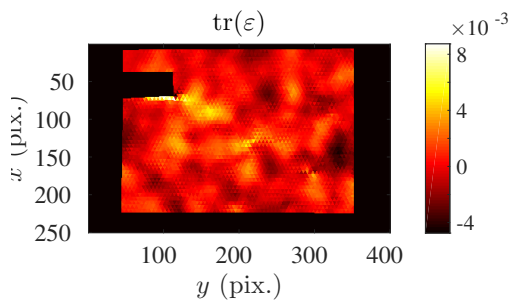


Figure 3. Localisation du contact

Cependant plusieurs problèmes ont été rencontrés :

– des problèmes de contact quand la surface de contact devient trop grande, entraînant une localisation du chargement dans la majorité des cas (voir Figure 3 où on voit que le choc repéré par la zone de fortes valeurs de la trace des déformations est très localisé et n'est pas en face de l'entaille),

– un manque de représentativité des données en surface lors du dépouillement quand le choc n'a pas lieu sur toute la largeur de l'échantillon (voir Figure 4 où on ne peut détecter la déformation dans l'axe du chargement).

Ces expérimentations ont été départagées à l'aide de la corrélation d'images numérique (CIN) et des profils de fissuration. La solution retenue est de placer une barrette d'aluminium ($40 \times 10 \times 3 \text{ mm}$) très légèrement recouverte de vaseline entre la barre entrante et l'éprouvette. Ce procédé ne modifiera pas la force avec laquelle notre échantillon sera impacté mais nous permet d'avoir un impact sur toute la largeur de l'éprouvette et sur une hauteur limitée. Les champs de déplacement obtenus par CIN (voir section 4) sont tout à fait cohérents avec un contact quasi-linéique et valident notre dispositif.

La barre est instrumentée en pont complet ce qui nous fournit les données nécessaires pour connaître la force d'impact. Pour l'acquisition des images, on utilise une caméra Shimadzu HPV-X2 et on fixe la fréquence d'acquisition à $1/500 \text{ ns}$.

Pour l'ensemble de nos essais, la vitesse d'impact de l'éprouvette visée est de l'ordre de 5 m/s .

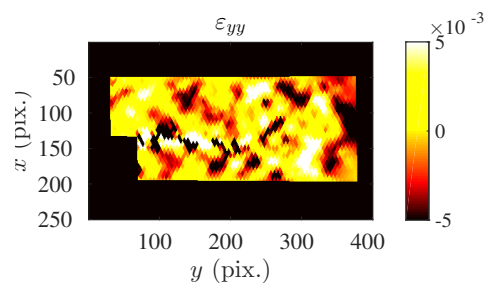


Figure 4. Application non-constante dans l'épaisseur

4. Résultats et dépouillements

Pour illustrer la méthode expérimentale, un résultat de flexion 1 point dynamique va être présenté. La méthode pour arriver à une valeur de la contrainte à rupture en traction et de l'énergie de fissuration en dynamique sera détaillée.

4.1. Résultats de l'essai

Comme attendu la rupture suit l'interface pré-entaillée. La Figure 5 présente l'onde de compression qui a impactée l'échantillon ainsi que la force équivalente. Sur les images, la barre entrante frappe l'échantillon par la gauche, et l'entaille se situe à droite. Le pic de traction au début du signal entrant est causé par la réflexion sur la grande partie de la surface qui reste libre à la fin de la barre entrante. Le dépouillement classique pour arriver à la force entrante n'est donc pas suffisant et ne peut pas être exploité directement.

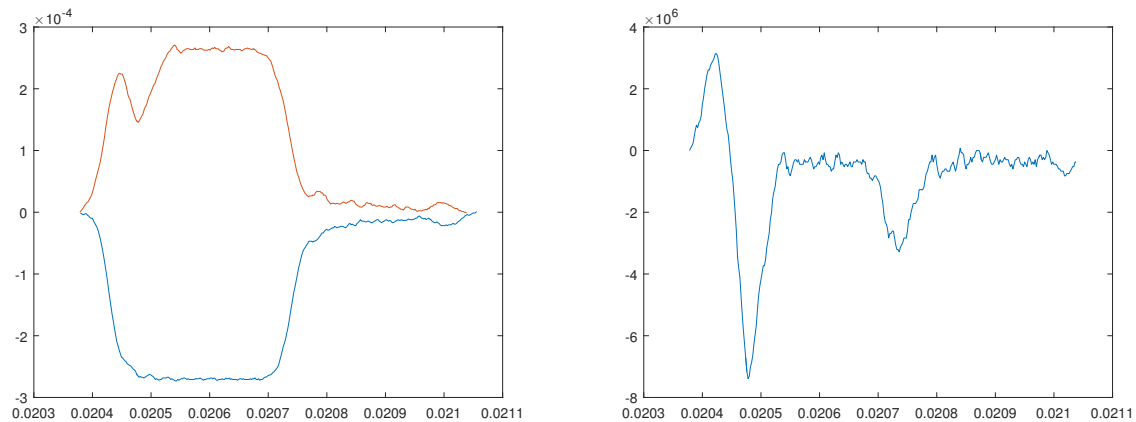


Figure 5. Onde de déformation et force d'appuis

Pour l'analyse des images, un code de CIN développé au LMT a été utilisé pour obtenir les champs de déplacements en surface de notre éprouvette. Cet outil utilise une approche globale sur un maillage triangulaire dans un formalisme éléments finis [5]. Il exploite des méthodes de régularisation pour limiter l'influence du bruit de mesure ainsi qu'un mécanisme d'endommagement des éléments qui vient relâcher cette régularisation dans les zones qui sont détectées comme endommagées et ainsi localiser les déformations [38].

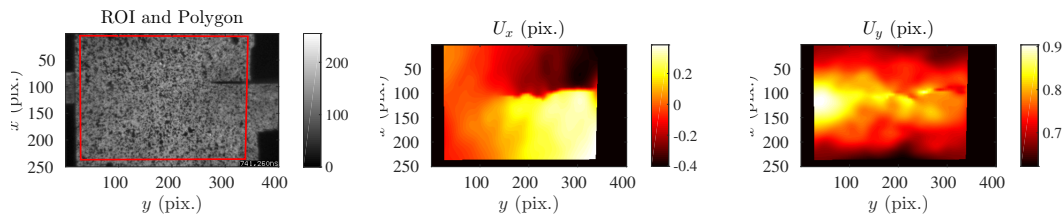


Figure 6. Champs de déplacement obtenus par corrélation

Un résultat de ce post-traitement des images de la caméra rapide est illustré sur les Figures 6. On observe des champs de déplacements très discontinus au niveau de la fissure. Ce type de résultats convient parfaitement au type de dépouillement que l'on souhaite faire pour déterminer les paramètres d'intérêts pour notre interface et qui est expliqué dans la partie suivante.

4.2. Méthode directe de dépouillement

L'hypothèse principale qui est utilisée pour le dépouillement de cet essai est que la résistance mécanique de l'interface est suffisamment faible par rapport à celle de l'inclusion en granite. Ainsi, pour rompre l'interface, le

chargement reste modéré et lors des premiers allers-retours d'onde, le granite va rester élastique. De ce fait, il est possible de remonter aux contraintes du matériau en considérant la déformation élastique.

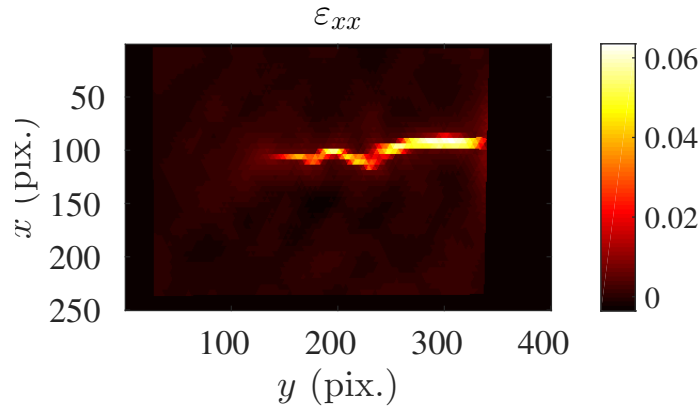


Figure 7. Déformations verticales par CIN

s

Détecter la contrainte maximale verticale atteinte dans le granite le long de la fissure revient à déterminer la contrainte à rupture de l'interface. Cette conclusion peut sembler hâtive, mais la mesure de champs nous donne accès aux cartes de déformations composante par composante, et on peut vérifier que le mécanisme de rupture est bien très proche d'un mode I (voir Figure 7).

En calculant la valeur moyenne des déformations ϵ_{xx} à la hauteur de la pointe de fissure mais au milieu de la partie de granite, tout au long du processus de fissuration, on peut obtenir les contraintes qui ont permis de fissurer le matériau en utilisant l'hypothèse d'élasticité du matériau.

Pour en arriver à l'énergie de fissuration, l'idée a été de se détacher complètement des dépouillements quasi-statique car en l'absence d'équilibre et dans le cas d'un endommagement des matériaux environnants quasi-nul, il vaut mieux raisonner de manière local.

On propose d'utiliser la méthode suivante pour calculer l'énergie de fissuration depuis les champs de corrélation : $G_c^{(i)} = \frac{1}{l_c^{(i-1)}} \int_{l_c^{(i-1)}} \Delta U f_t dx$ La longueur cohésive l_c étant une inconnue qui dépend de G_c l'énergie de fissuration, il faut procéder par itération. Une valeur issue de la littérature peut être prise pour la valeur de départ. Une relation simple du type $G_c = l_c * f_t/2$ peut être utilisée pour updatet la valeur de la longueur cohésive à chaque itération.

5. Conclusions

Une nouvelle méthodologie de détermination des caractéristiques des interfaces est proposée. Elle est basée sur un essai très classique en statique, la flexion, mais exploite l'inertie pour faire des essais hors équilibre. La technique de dépouillement par CIN qui est proposée, exploite la résistance du granite pour aboutir à une mesure de la résistance en traction de l'interface ainsi que l'énergie dissipée par cette décohésion.

Cependant, sans une grande différence de résistance entre l'interface elle-même et les matériaux qu'elle sépare (ici, granite et mortier hautes performances), cet essai n'amènerait pas à une décohésion contrôlée comme celle que l'on observe dans nos essais où au moins un des matériaux ne s'endommage pas avant la rupture complète de l'interface.

Dans le cas des matériaux du génie civil, on peut souvent faire ces hypothèses sur le comportement des matériaux. Ainsi, avec cette nouvelle stratégie de détermination des paramètres d'une interface on peut accéder, avec des essais relativement simples à mettre en place, aux paramètres nécessaires à de nombreux modèles numériques.

Références

- [1] Gary G WELLS, Rodrigo LEDESMA-AGUILAR, Glen MCHALE, and Khellil SEFIANE. A sublimation heat engine. *Nature communications*, 6, 2015.
- [2] Karen L. SCRIVENER, Alison K. CRUMBIE, and Peter LAUGESSEN. The interfacial transition zone (itz) between cement paste and aggregate in concrete. *Interface Science*, 12(4) :411–421, 2004.
- [3] M. MORSLI, A. MOKADDEM, B. DOUMI, L. TEMIMI, A. BOUTAOUS, and N. BELDJOUDI. Prediction, by a genetic algorithm, of the effect of heat stress on the transverse damage of fiber-matrix interface of hybrid composite material (glass-carbon/ epoxy). *Composites : Mechanics, Computations, Applications : An International Journal*, 7(1) :31–43, 2016.
- [4] Yuwadee ZATANG, Vanchai SATA, Ampol WONGSA, and Prinya CHINDAPRASIRT. Properties of pervious concrete containing recycled concrete block aggregate and recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 111 :15 – 21, 2016.
- [5] Zvonimir TOMICEVIC, François HILD, and Stéphane ROUX. Mechanics-Aided Digital Image Correlation. *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 48 :330–343, 2013.
- [6] D WATSTEIN. Effect of straining rate on the compressive strength and elastic properties of concrete. In *ACI Journal Proceedings*, volume 49, pages 729–744. ACI, 1953.
- [7] A BRARA and JR KLEPACZKO. Experimental characterization of concrete in dynamic tension. *Mechanics of materials*, 38(3) :253–267, 2006.
- [8] Gianluca CUSATIS. Strain-rate effects on concrete behavior. *International Journal of Impact Engineering*, 38(4) :162–170, 2011.
- [9] Gérard GARY and Patrice BAILLY. Behaviour of quasi-brittle material at high strain rate. experiment and modelling. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 17(3) :403 – 420, 1998.
- [10] Chuan QIN and Chuhan ZHANG. Numerical study of dynamic behavior of concrete by meso-scale particle element modeling. *International Journal of Impact Engineering*, 38(12) :1011–1021, 2011.
- [11] Leonardo SNOZZI, Antonio CABALLERO, and Jean-François MOLINARI. Influence of the meso-structure in dynamic fracture simulation of concrete under tensile loading. *Cement and Concrete Research*, 41(11) :1130–1142, 2011.
- [12] Natalija BEDE, Joško OŽBOLT, Akanshu SHARMA, and Bariş İRHAN. Dynamic fracture of notched plain concrete beams : 3d finite element study. *International Journal of Impact Engineering*, 77 :176–188, 2015.
- [13] LB FREUND. Crack propagation in an elastic solid subjected to general loading—i. constant rate of extension. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 20(3) :129–140, 1972.
- [14] JR RICE. *Fracture*, vol. 2. ed. H. Liebowitz. New York : AcademicPress, 1968.
- [15] M. CURBACH and J. EIBL. Crack velocity in concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, 35(1–3) :321 – 326, 1990. Special Issue Fracture and Damage of Concrete and Rock.
- [16] P ROSSI and F TOUTLEMONDE. Effect of loading rate on the tensile behaviour of concrete : description of the physical mechanisms. *Materials and structures*, 29(2) :116–118, 1996.
- [17] François HILD, Christophe DENUAL, Pascal FORQUIN, and Xavier BRAJER. On the probabilistic–deterministic transition involved in a fragmentation process of brittle materials. *Computers and Structures*, 81(12) :1241 – 1253, 2003. Advanced Computational Models and Techniques in Dynamics.
- [18] Pierre ROSSI. Strain rate effects in concrete structures : the lpc experience. *Materials and structures*, 30(1) :54–62, 1997.
- [19] M.D. KOTSOVOS. Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression. *Matériaux et Construction*, 16(1) :3–12, 1983.
- [20] Fabrice GATUINGT. *Prévision de la rupture des ouvrages en béton sollicités en dynamique rapide*. PhD thesis, École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 1999.

- [21] O LE VU. *Etude et modélisation du comportement du béton sous sollicitations de grande amplitude*. PhD thesis, PhD thesis. Ecole Polytechnique, 1998.
- [22] Fabrice GATUINGT, Leonardo SNOZZI, and Jean-François MOLINARI. Numerical determination of the tensile response and the dissipated fracture energy of concrete : role of the mesostructure and influence of the loading rate. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 37(18) :3112–3130, 2013.
- [23] Pierre ROSSI, Jan GM VAN MIER, François TOUTLEMONDE, Fabrice LE MAOU, and Claude BOULAY. Effect of loading rate on the strength of concrete subjected to uniaxial tension. *Materials and structures*, 27(5) :260–264, 1994.
- [24] XQ ZHOU and H HAO. Mesoscale modelling of concrete tensile failure mechanism at high strain rates. *Computers & Structures*, 86(21) :2013–2026, 2008.
- [25] XX ZHANG, G RUIZ, RC YU, and M TARIFA. Fracture behaviour of high-strength concrete at a wide range of loading rates. *International Journal of Impact Engineering*, 36(10) :1204–1209, 2009.
- [26] P FORQUIN and B ERZAR. Dynamic fragmentation process in concrete under impact and spalling tests. *International Journal of Fracture*, 163(1-2) :193–215, 2010.
- [27] RR PEDERSEN, A SIMONE, and LJ Sluys. Mesoscopic modeling and simulation of the dynamic tensile behavior of concrete. *Cement and Concrete Research*, 50 :74–87, 2013.
- [28] A.V. NGUYEN. Historical note on the stefan–reynolds equations. *Journal of Colloid and Interfaces Science*, 231(1) :195 –, 2000.
- [29] P. ROSSI. A physical phenomenon which can explain the mechanical behaviour of concrete under high strain rates. *Materials and Structures*, 24(6) :422–424, 1991.
- [30] Bouthaina LARBI. *Caractérisation du transport diffusif dans les matériaux cimentaires : influence de la microstructure dans les mortiers*. PhD thesis, Université Paris-Est, 2013.
- [31] J. SERCOMBE, F.-J. ULM, and H.-A. MANG. Consistent return mapping algorithm for chemoplastic constitutive laws with internal couplings. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 47(1-3) :75–100, 2000.
- [32] Hans W. REINHARDT, Pierre ROSSI, and Jan G.M. VAN MIER. Joint investigation of concrete at high rates of loading. *Materials and Structures*, 23(3) :213–216, 1990.
- [33] François TOUTLEMONDE, Pierre ROSSI, Claude BOULAY, Christian GOURRAUD, and Dominique GUEDON. Dynamic behaviour of concrete : tests of slabs with a shock tube. *Materials and Structures*, 28(5) :293–298, 1995.
- [34] B. Erzar and P. Forquin. Analysis and modelling of the cohesion strength of concrete at high strain-rates. *International Journal of Solids and Structures*, 51(14) :2559 – 2574, 2014.
- [35] E CADONI, K LABIBES, C ALBERTINI, M BERRA, and M GIANGRASSO. Strain-rate effect on the tensile behaviour of concrete at different relative humidity levels. *Materials and structures*, 34(1) :21–26, 2001.
- [36] Dan ZHENG and Qingbin LI. An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity. *Engineering fracture mechanics*, 71(16) :2319–2327, 2004.
- [37] Joško OŽBOLT, Josipa BOŠNJAK, and Emiliano SOLA. Dynamic fracture of concrete compact tension specimen : Experimental and numerical study. *International Journal of Solids and Structures*, 50(25) :4270–4278, 2013.
- [38] François HILD, Amine BOUTERF, and Stéphane ROUX. Damage measurements via dic. *International Journal of Fracture*, 191(1) :77–105, 2015.