

QUELQUES METHODES EXPERIMENTALES POUR CARACTERISER LE COMPORTEMENT DES GEOMATERIAUX SOUS CONDITIONS EXTREMES

P. Forquin, *Laboratoire Sols, Solides, Structures et Risques (3SR), Université Grenoble Alpes, BP 53 - 38041 Grenoble cedex 9. Téléphone : 04 76 82 52 48, Télécopie : 04 76 82 70 43, Adresse électronique : pascal.forquin@3sr-grenoble.fr*

Mots clés : Barres de Hopkinson, essais dynamiques, compression, impact, béton, roche

1. INTRODUCTION

Les géomatériaux tels que les bétons, les bétons hautes-performances, les roches ou la glace de grêlons sont présents dans de nombreuses problématiques de recherche industrielles ou du génie civil faisant intervenir des conditions de chargement dynamiques ou de fortes pressions hydrostatiques. Nous pouvons citer par exemple le comportement des structures en béton vis-à-vis de chargements d'impact, de chutes de bloc ou de déflagration. La figure 1 présente l'exemple d'une dalle de béton suite à l'impact d'un pénétrateur cinétique. La cible est soumise à un chargement triaxial caractérisé par des niveaux de pression hydrostatique et de déformation très élevés. D'autre part, une rupture dite "de cratérisation" (fissuration en assiette) est observée en face avant (Fig. 1a). Cette fissuration résulte de contraintes de cisaillement sous faible niveau de confinement générées dans les premiers instants d'impact. Une fissuration radiale est également observée autour du tunnel de pénétration (Fig. 1a). Enfin une rupture dite d'écaillage est observée au voisinage de la face arrière de la cible dans le cas où elle est perforée [Li et al, 2005]. Ces 2 modes d'endommagement résultent de chargements de traction dynamique à des vitesses de déformation d'environ 100/s. C'est pourquoi, une caractérisation expérimentale sous chargement de traction dynamique et de compression confinée dynamique est nécessaire pour modéliser le comportement du béton et simuler numériquement le problème (Fig. 1b).

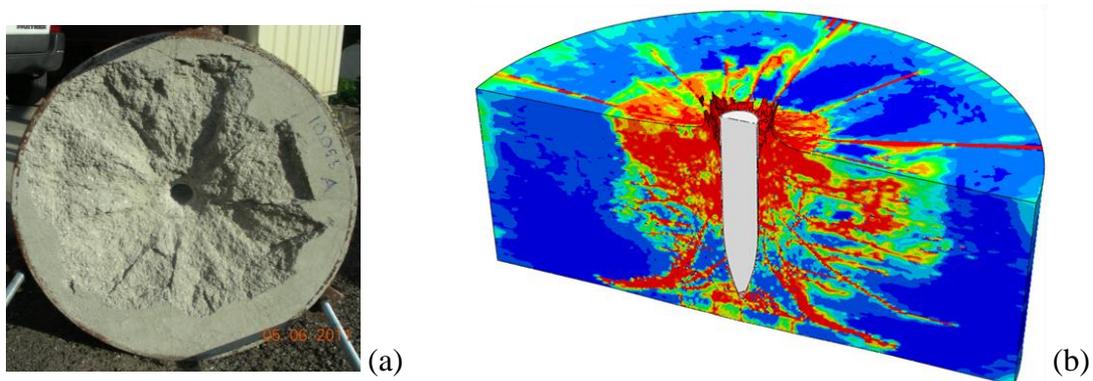


Figure 1. (a) Essai d'impact de projectile rigide sur dalle de béton [Pontirol et al, 2012]. (b) Simulation numérique du problème à l'aide du code de calcul Abaqus-Explicit et du modèle couplé DFH-KST (Denoual-Forquin-Hild - Krieg-Swenson-Taylor).

Une autre problématique est celle de l'abatage de roche par chargement explosif. Ce procédé est abondamment mis en œuvre dans l'industrie minière pour la production de sable ou de gravier et dans le génie civil pour la construction d'ouvrage. Au voisinage du chargement pyrotechnique on

l'ordre de 100 à 10⁴/s se révèlent généralement inadaptés pour tester les géomatériaux, et ce pour plusieurs raisons : tout d'abord, la fabrication d'éprouvettes de géométrie complexe est difficilement envisageable pour des matériaux comme les bétons ou les roches en raison de la fragilité de ces matériaux et des tolérances dimensionnelles requises. Ensuite, le dépouillement de ces essais repose généralement sur l'hypothèse d'un « équilibre statique » de l'échantillon c'est-à-dire d'une égalité des forces entrante et sortante et d'efforts inertiels dans l'échantillon dans les directions axiales et transverses négligeables, ce qui permet de supposer un champ de contrainte et de déformation homogène dans la partie utile de l'échantillon. Or ces hypothèses ne sont généralement pas satisfaites dans le cas de matériaux de comportement fragile (faible déformation à rupture) sollicités à des vitesses de déformation élevées. A titre d'exemple, le Tableau 1 donne la déformation à rupture de quelques géomatériaux sollicités en traction ou en compression uniaxiale.

Tab. 1. Propriétés mécaniques de base de 4 géomatériaux

| Matériaux | Calcaire crinoïde | BUHP Ductal | Béton R30A7 | Micro-béton |
|---|-------------------|-------------|-------------|-------------|
| Résistance en traction (σ_t) | 25 MPa | 20 MPa | 3-4 MPa | 4-5 MPa |
| Déformation à rupture en traction | ~ 0.03% | ~ 0.04% | ~ 0.02% | ~ 0.02% |
| Résistance en compression (σ_c) | 150 MPa | 200 MPa | 40 MPa | 40 MPa |
| Déformation à rupture en compression | ~ 0.3% | ~ 0.4% | ~ 0.2% | ~ 0.2% |
| Taille caractéristique de la microstructure | 0.1 mm | 200 μ m | 8 mm | 2 mm |

L'hypothèse d'égalité des forces entrante et sortante nécessite un temps de chargement avant rupture ($T_{\text{chargement}}$) très grand par rapport au temps de parcours des ondes dans l'échantillon de longueur L ($T_{\text{Aller-Retour}}$) :

$$T_{\text{chargement}} = \frac{\varepsilon_{\text{rupture}}}{\dot{\varepsilon}} \gg T_{\text{aller-retour}} = \frac{2L}{C_{\text{onde}}}, \quad (1)$$

la célérité des ondes C_{onde} étant d'environ 4000 m/s dans les géomatériaux (béton, roche, mortier). Le temps de chargement est calculé dans le Tableau 2a pour 3 déformations à rupture et 3 vitesses de déformation. Le temps de parcours des ondes est reporté pour 3 tailles d'échantillon et une vitesse d'onde dans le Tableau 2b. On constate que, s'agissant d'échantillons de taille centimétrique, l'hypothèse précédente (Eq. 1) n'est satisfaite que pour les vitesses de déformation à rupture les plus lentes (environ 1/s en traction, 10/s en compression). Des vitesses de déformation aussi faibles sont difficiles à obtenir avec un système traditionnel de barre de Hopkinson. En effet, réduire la vitesse de déformation dans l'échantillon revient à diminuer la vitesse d'impact et du même coup à diminuer l'intensité du pulse incident dans la barre d'entrée. Une solution est de limiter le front de montée du pulse incident à l'aide de « pulse-shaper ». Cette technique consiste à utiliser un matériau mou ou une structure déformable entre l'impacteur et la barre d'entrée. Bien que généralement très empiriques, les techniques de « pulse-shaping » ont fait l'objet de publications dans la littérature. On peut mentionner notamment l'utilisation de disque de cuivre recuit ou écroui [Frew et al., 2001] ou l'utilisation d'un système de type masse-ressort attaché à l'extrémité de la barre d'entrée [Song et Chen, 2004] ou de 2 impacteurs séparés par un tube élastique [Chen et Luo, 2004].

Tab. 2a. Temps de chargement (ms)

| Déformation à rupture : | 0,01% | 0,1% | 1% | Tab. 2b. Aller-retour des ondes | | | |
|--------------------------|--|-------------|-------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------|------------|
| | | | | C_{onde} : | 4000 m/s | | |
| Vitesse de déformation : | $T_{\text{chargement}} = \varepsilon_{\text{rupture}} / \dot{\varepsilon}$ | | | Hauteur H : | $T_{\text{AR}} = 2H/C_{\text{onde}}$ | | |
| 1 s ⁻¹ | 100 μ s | 1 ms | 10 ms | | | 20 mm | 10 μ s |
| 10 s ⁻¹ | 10 μ s | 100 μ s | 1 ms | | | 40 mm | 20 μ s |
| 100 s ⁻¹ | 1 μ s | 10 μ s | 100 μ s | | | 80 mm | 40 μ s |

D'autres limitations et difficultés peuvent être mentionnées en ce qui concerne les essais de compression dynamique aux barres de Hopkinson sur géomatériaux. Tout d'abord, la résistance en compression de ces matériaux est beaucoup plus élevée que la résistance en traction. (Tab. 1). Il faut donc garantir des contraintes de traction induites très faibles dans l'échantillon en comparaison du chargement de compression. De plus, les géomatériaux présentent généralement une forte sensibilité à la pression de confinement. Ainsi une pression latérale même modeste vis-à-vis de la résistance en compression simple (c'est-à-dire de quelques MPa pour les bétons ou les roches) peut augmenter significativement voire doubler la contrainte ultime en compression. C'est pourquoi, les efforts de frottement à l'interface barres de Hopkinson/échantillon et l'inertie radiale peuvent influencer très significativement la réponse dynamique en compression. Ce phénomène de confinement inertiel peut expliquer en grande partie l'augmentation apparente de résistance ultime (Fig. 3) observée au delà de 20/s pour les bétons [Weerheijm, 1992].

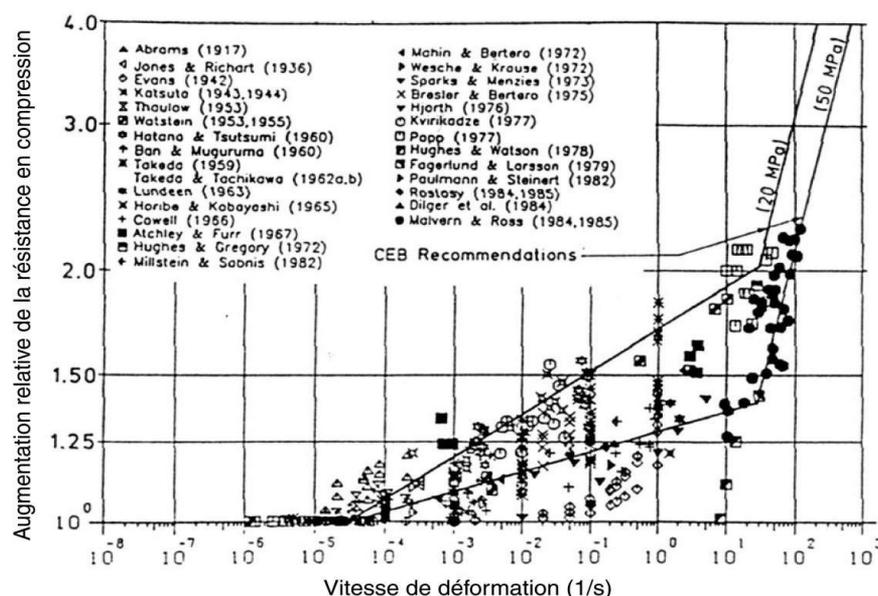


Figure 3. Synthèse bibliographique des essais de compression quasi-statique et dynamique réalisés sur bétons standards et à hautes-performances [Bischoff et Perry, 1991].

3. CLASSIFICATION DES METHODES EXPERIMENTALES

Différentes méthodes expérimentales ont été développées par Forquin [2003; 2010] et appliquées à différents géomatériaux. Nous pouvons classer ces méthodes expérimentales selon 4 catégories (Fig. 4) :

- Les essais dédiés à la caractérisation du comportement de ces matériaux. Par exemple nous pouvons citer les essais de traction directe, de traction dynamique par écaillage, les essais de cisaillement quasi-statiques et dynamiques et ceux de compression quasi oedométrique,
- Les essais mis en œuvre pour analyser les mécanismes d'endommagement. Ainsi les essais d'impact sur la tranche permettent d'étudier la cinétique d'endommagement (essais en configuration ouverte avec caméra ultra-rapide) ou le réseau de fissures généré par impact (essais en configuration sarcophage),
- Les essais destinés à identifier des « paramètres matériaux » constituent une troisième catégorie. Il s'agit notamment des essais de flexion qui peuvent permettre de caractériser les paramètres de Weibull et donc la population de défauts sur laquelle s'amorcent les fissures. On peut aussi évoquer les essais de fissuration dynamique dont l'objectif est de caractériser la vitesse de propagation instable des fissures,
- Enfin, les essais de validation de modèles sont destinés à évaluer les capacités prédictives d'un modèle ou d'une méthode numérique. Les essais de cratérisation par

impact de projectiles biseautés sur la tranche de carreaux en béton ont été spécialement conçus à cet effet.

Il faut préciser que cette classification n'est pas stricte dans la mesure où certains essais peuvent appartenir à plusieurs catégories : par exemple, les essais d'écaillage peuvent également être utilisés pour étudier les propriétés associées à la fragmentation dynamique (étude post-mortem), pour valider une modélisation (simulation numérique de l'essai), voire pour identifier un paramètre matériau (identification par approche inverse). 3 méthodes expérimentales sont détaillées ci-après.

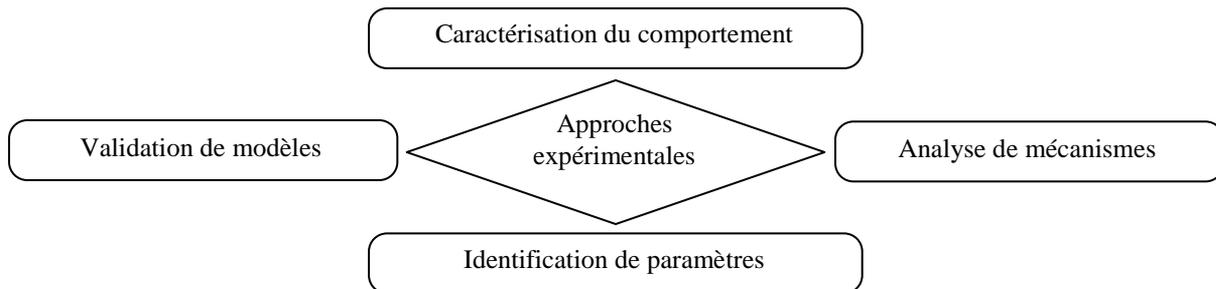


Figure 4. Classification des méthodes expérimentales développées pour les géomatériaux selon l'objectif poursuivi.

4. ESSAIS DE TRACTION DYNAMIQUE PAR ECAILLAGE

L'essai d'écaillage avec barre de Hopkinson constitue sans doute la méthode expérimentale la plus utilisée pour caractériser le comportement en traction des géomatériaux à des vitesses de déformation de quelques dizaines à quelques centaines de 1/s [Klepaczko et Brara, 2001; Schuler et al, 2006; Erzar et Forquin, 2010]. Le principe de l'essai est décrit sur la Figure 5. Un projectile impacte une barre de Hopkinson générant une onde incidente de compression. Cette onde se propage jusqu'à l'échantillon et se réfléchit en onde de traction sur sa face libre. Le chargement de traction s'accroît jusqu'à endommagement et rupture en traction dynamique de l'échantillon (Fig. 5).

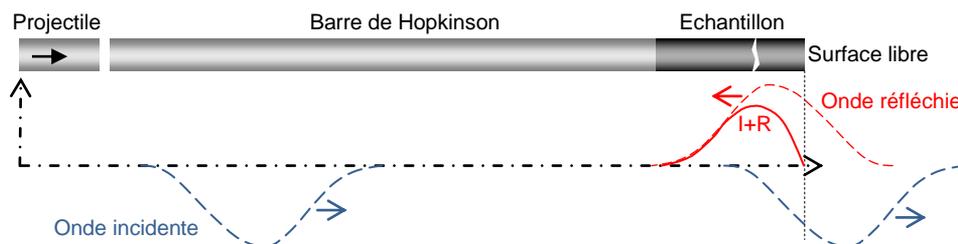


Figure 5. Principe de l'essai d'écaillage. Une onde incidente de compression se réfléchit en onde de traction dans l'échantillon conduisant à une rupture dynamique de l'échantillon.

Un banc d'essai a été conçu et assemblé au sein du laboratoire 3SR de Grenoble (Figure 6). Ce banc comprend l'instrumentation suivante : des barrières de vitesse mesure la vitesse d'impact du projectile. De plus, la barre de Hopkinson est instrumentée à l'aide de jauges de déformation afin de caractériser les pulses incidents et réfléchis. L'échantillon de roche ou de béton est instrumenté à l'aide de jauges de déformation. Ces signaux sont amplifiés et analysés sur un oscilloscope. De plus un interféromètre laser mesure la vitesse matérielle en face arrière. Une caméra ultra-rapide Kirana (800 kpixels, 5 Mfps) est mise en œuvre pour visualiser la fragmentation dynamique de l'échantillon. L'originalité de la technique expérimentale employée réside d'une part dans l'utilisation de projectiles optimisés par simulation numérique. Le projectile à bout hémisphérique avec un rayon de courbure suffisamment grand ($r_c > 1$ m) permet d'influencer très nettement le profil du pulse de compression et au final le champ de contrainte dans l'échantillon [Erzar et Forquin, 2010].

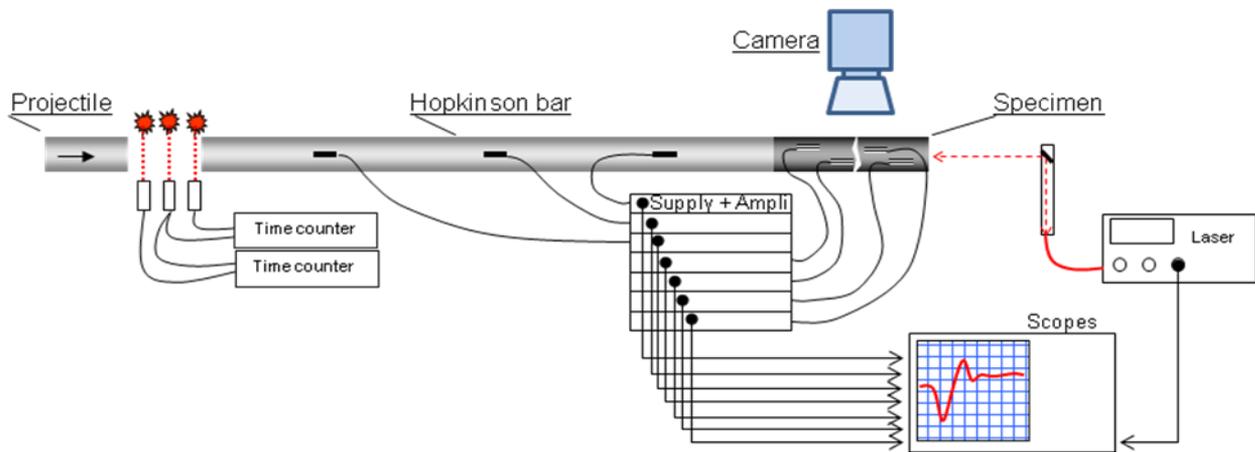


Figure 6. Instrumentation utilisée au laboratoire 3SR pour l'essai d'écaillage : barrières de vitesse, jauges, conditionneur de signaux, interféromètre laser et caméra ultra-rapide KIRANA.

Une illustration de ce phénomène apparaît sur la figure 7. L'évolution de la contrainte axiale est tracée en fonction de la vitesse de déformation pour des points situés à une distance comprise entre 40 et 88 mm de la face libre, la longueur de l'éprouvette étant de 120 mm. Dans le cas d'un projectile à bout plat, on constate que le champ de vitesse de déformation est fortement hétérogène lorsque la contrainte axiale est comprise entre 10 et 20 MPa (Fig. 7a, 7c). En revanche, le projectile optimisé permet de réduire l'hétérogénéité du champ de contrainte avec une vitesse de déformation de 100/s lorsque la contrainte axiale atteint 10 MPa (Fig. 7b, 7d). C'est pourquoi, le niveau de vitesse de déformation peut être évalué avec une plus grande précision en particulier dans le cas où des jauges de longueur 30 mm sont utilisées (essais sur béton R30A7) [Erzar et Forquin, 2011].

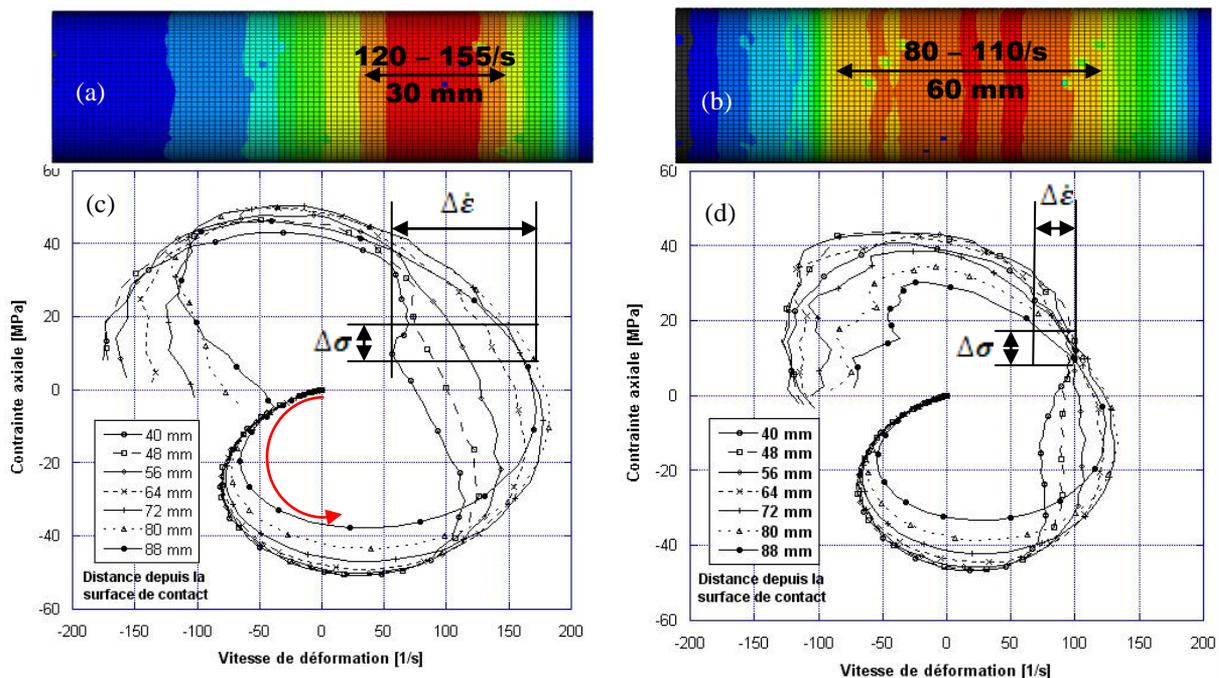


Figure 7. (a) Courbe de chargement pour un projectile plat impactant la barre à 10 m/s, (b) même courbe pour le projectile optimisé impactant à 10 m/s. (c, d) Champ de vitesse de déformation lorsque la contrainte maximale dans l'éprouvette atteint 20 MPa respectivement pour le projectile plat et pour le projectile optimisé.

D'autre part, l'originalité des essais réside dans l'instrumentation mise en œuvre et dans la méthode de dépouillement appliquée. En effet Pierron et Forquin [2012] ont mis au point une méthode basée sur la mesure de champs par grille collée sur l'échantillon (Fig. 8). Cette grille filmée à l'aide de la caméra ultra-rapide à une fréquence de 1 million d'images par seconde permet de déduire le champs

de déplacement et de déformation en surface. De plus en appliquant un champ spécifique dans la méthode des champs virtuels il est possible d'utiliser l'échantillon lui même comme une véritable cellule de force permettant de déduire le champ de contrainte dans l'échantillon. Il est alors possible de tracer la courbe contrainte-déformation et de caractériser le comportement en traction dynamique du béton.

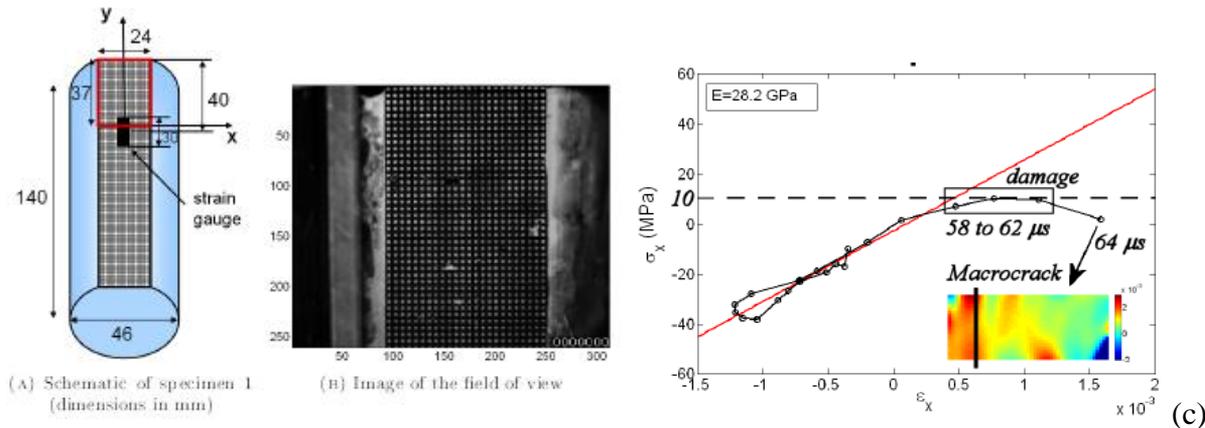


Figure 8. (a, b) Grille déposée sur l'échantillon. (c) courbe contrainte-déformation déduite de la méthode des champs virtuels. La formule de Novikov donne une résistance de 15.2 MPa tandis que cette méthode de dépouillement donne une résistance de 10 MPa (Pierron and Forquin, 2012).

Pour conclure, les essais d'écaillage permettent une caractérisation fine du comportement en traction dynamique des géomatériaux à l'aide d'une instrumentation spécifique. De plus une étude post-mortem de l'essai permet de caractériser les mécanismes d'endommagement dans les matériaux testés. Ces données expérimentales permettent de construire une modélisation du comportement dynamique de ces matériaux [Forquin et Erzar, 2010; Erzar et Forquin, 2014].

5. ESSAIS DE COMPRESSION QUASI-OEDOMETRIQUE DYNAMIQUE

L'essai de compression dit « quasi-œdométrique » constitue une alternative possible aux essais triaxiaux. Pour cet essai, une éprouvette cylindrique est placée dans une cellule de confinement. Sous l'effet d'un chargement de compression axial, l'échantillon tend à se dilater selon la direction radiale et exerce une pression sur la paroi interne de la cellule de confinement. L'augmentation des contraintes axiale et radiale se traduit par une augmentation du niveau de pression hydrostatique au cours de l'essai. C'est pourquoi cet essai permet de déduire la variation de résistance avec le niveau de pression. La cellule de confinement est généralement constituée d'un métal à haute limite élastique. Ainsi, l'échantillon est sollicité dans un état proche d'une déformation uniaxiale. D'où le nom que porte l'essai (compression quasi-œdométrique). La figure 9 montre l'instrumentation utilisée sur la cellule de confinement. Les jauges de déformation placées sur la surface extérieure de la cellule en acier sont utilisées pour évaluer le niveau de contrainte et de déformation radiales dans l'échantillon. Pour ce faire des simulations numériques de la cellule de confinement soumise à une rampe de pression sont menées en tenant compte de la hauteur variable de la pression appliquée (h_{press}) due au raccourcissement de l'échantillon et en tenant compte du comportement plastique de la cellule de confinement. Ces simulations numériques permettent de construire une relation entre les contraintes et déformations radiales de l'échantillon et la déformation orthoradiale extérieure de la cellule [Forquin et al., 2008 ; 2010].

Cette méthode expérimentale a été appliquée dans le cas d'essais aux barres de Hopkinson, réalisés au LMS sur un micro-béton MB50 soit séché, soit saturé en eau [Forquin et al, 2010]. Les échantillons de micro-béton humide ont été laissés immergés pendant plusieurs mois avant essai tandis que les bétons séchés ont été placés sous étuve à une température proche de 100°C pendant plusieurs jours. Les essais dynamiques ont fait apparaître une différence notable de comportement entre les échantillons secs et les échantillons humides : alors que les échantillons secs indiquent une

augmentation continue de résistance avec le niveau de pression hydrostatique, les échantillons humides présentent une saturation de résistance à environ 170 MPa, même pour des pressions atteignant 1 GPa (Fig. 9b). En outre, les échantillons secs laissent apparaître une compaction plus importante (Fig. 9c). Les essais quasi-statiques sur échantillons humides ont permis d'expliquer ce phénomène : les essais réalisés sur béton sec ont donné des résultats proches des essais dynamiques, ce qui implique une faible influence de la vitesse de déformation sur le comportement des bétons en compression confinée tandis que les essais quasi-statiques les plus lents ont manifesté un comportement presque identique à celui des bétons secs accompagné d'une expulsion de l'eau libre au cours de l'essai.

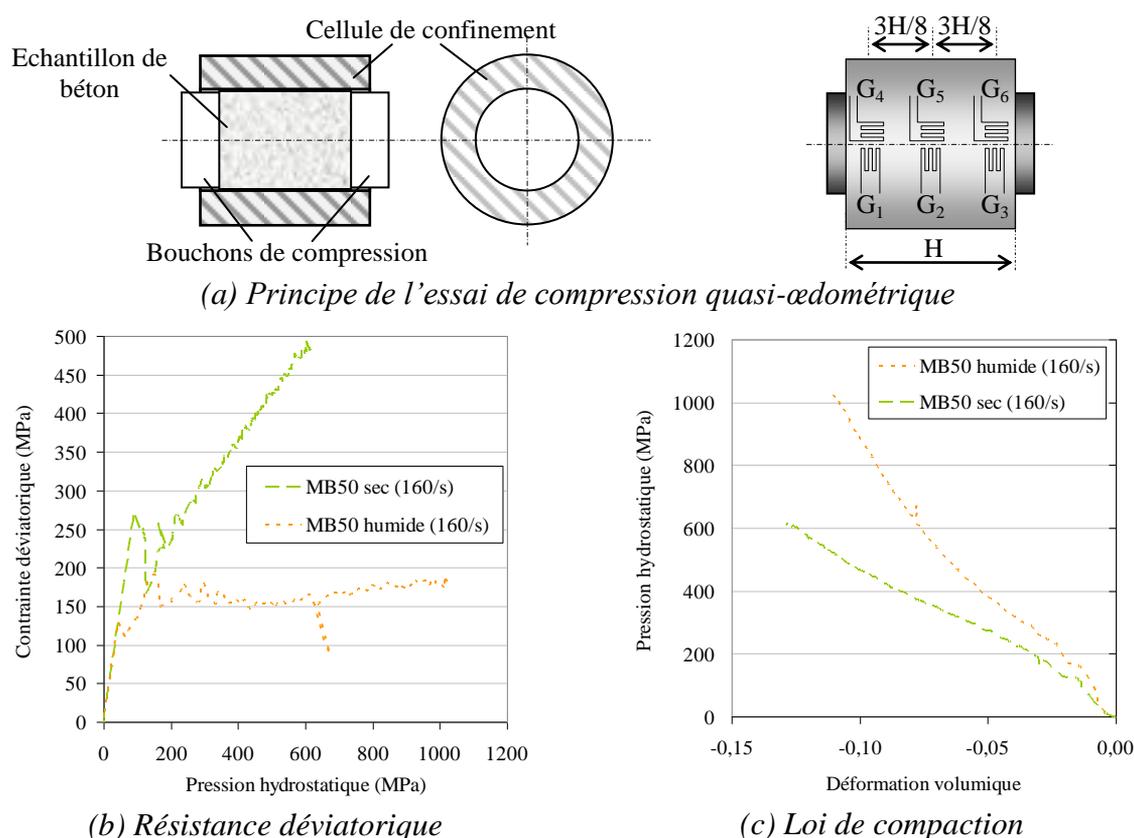


Figure 9. Comportement déviatorique et sphérique du micro-béton MB50 sec et humide.

Ainsi ces différentes expérimentations ont permis de montrer que la différence de comportement dynamique entre bétons secs et humides s'expliquait principalement par une augmentation de pression interstitielle au sein des échantillons saturés en eau [Forquin et al., 2009]. Des conclusions similaires ont été obtenues au cours d'essais de compression triaxiale quasi-statique pour lesquels l'échantillon est enfermé dans une enveloppe imperméable [Vu et al., 2009].

6. ESSAIS D'IMPACT DE LABORATOIRE

Deux types d'essais ont été conçus pour étudier l'endommagement des bétons sous impact : des essais d'impact sur la tranche à l'aide de projectiles cylindriques et des essais de cratérisation par impact sur la tranche à l'aide de projectiles biseautés. La première configuration expérimentale est présentée sur la Figure 10 : le carreau et son système de confinement dynamique subissent l'impact sur la tranche d'un projectile cylindrique en alliage d'aluminium ou en acier. Une onde divergente de compression envahit la cible, ce qui génère un chargement de traction dynamique dans la direction orthoradiale. Ce chargement conduit à une fragmentation dynamique du carreau constituée de nombreuses fissures orientées radialement. En configuration ouverte, le carreau est filmé à l'aide de la caméra ultra-rapide. Les essais réalisés en configuration sarcophage montrent une densité de fissuration importante dans les carreaux impactés.

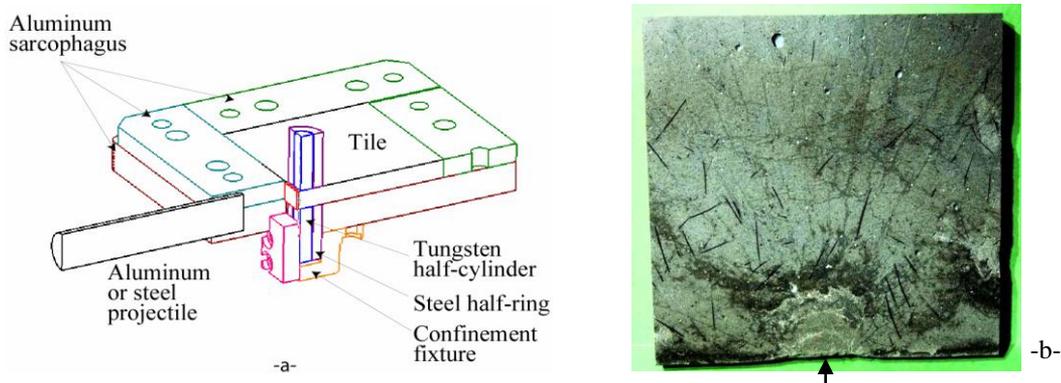


Figure 10. Essai d'impact sur la tranche réalisé sur béton ultra-haute performance (Ductal®). (a) Schéma du montage expérimental, (b) Endommagement d'un BUHP suite à l'impact d'un projectile en aluminium à une vitesse de 88 m/s [Forquin et Hild, 2008].



Figure 11. Essai de cratérisation par impact sur la tranche réalisé sur béton ultra-haute performance (Ductal®) : montage expérimental mis en œuvre au laboratoire 3SR et pénétration finale du projectile dans 2 cibles avec fibres orientées différemment ($V_{impact} = 68$ m/s).

La deuxième méthode expérimentale (essais de cratérisation par impact sur la tranche à l'aide de projectiles biseautés) a été spécialement développée pour favoriser le phénomène de cratérisation, tout en limitant la fragmentation générée par impact : le carreau est soumis à un système de confinement latéral qui empêche le développement de fissures radiales. L'impact de projectile en acier de masse 280 g à une vitesse d'environ 68 m/s conduit à une profondeur de pénétration et à une cratérisation fortement influencées par l'orientation des fibres. Ces essais sont conçus pour être confrontés ultérieurement aux prévisions de simulations numériques, ce qui permet de valider ou d'invalider une modélisation du processus d'érosion dans les géomatériaux sous impact.

7. CONCLUSION

Au cours des vingt dernières années les problématiques en rapport avec le comportement dynamique des géomatériaux (bétons, BHP, BUHP, roches, glaces de grêlon) se sont multipliées, ce qui a généré un fort besoin en terme de caractérisation expérimentale dynamique et de modélisation. Cependant en raison de certaines propriétés spécifiques aux géomatériaux (faible déformation à rupture, sensibilité à la pression de confinement, faible ténacité, difficultés d'usinage...) les méthodes expérimentales traditionnelles (essais SHPB de compression dynamique, de traction dynamique, de torsion dynamique) peuvent s'avérer inadaptées pour ces matériaux. C'est pourquoi, des méthodes expérimentales spécifiques doivent être envisagées. Ces méthodes peuvent être classées selon 4 catégories en fonction de l'objectif recherché. La première catégorie concerne les méthodes classiquement dédiées à la caractérisation du comportement mécanique de ces matériaux, la seconde concerne celles mises en œuvre pour l'étude des mécanismes d'endommagement sous chargement dynamique, la troisième celles permettant d'identifier un paramètre spécifique (par exemple une population de défauts ou une vitesse de propagation de fissure) et enfin celles dont l'exploitation

n'est possible qu'à travers la comparaison avec des résultats numériques pour la validation de modèle (approche inverse). Les essais d'écaillage, de compression quasi-oedométrique, d'impact sur la tranche ou de cratérisation par impact donnent une illustration de la diversité et de la complémentarité de ces méthodes expérimentales.

REFERENCES

- Bischoff P. H. et Perry S. H. (1991) "Compressive behaviour of concrete at high strain rates", *Materials and Structures* 24, pp. 425-450.
- Chen W., Luo H. (2004) "Dynamic compressive responses of intact and damaged ceramics from a single split Hopkinson pressure bar experiment", *Exp Mech* 44(3)
- Erzar, B., Forquin, P. (2010) "An experimental method to determine the tensile strength of concrete at high rates of strain", *Exp Mech.* 50 (7): 941-955.
- Erzar B., Forquin P. "Experiments and mesoscopic modelling of dynamic testing of concrete", *Mechanics of Materials*, 43, pp. 505–527, 2011.
- Erzar B., Forquin P. (2014) "Analysis and modelling of the cohesion strength of concrete at high strain-rates", *Int. J. Solids Struct.*, 51(14), pp. 2559–2574
- Forquin. P. (2003) "Endommagement et fissuration de matériaux fragiles sous impact balistique, rôle de la microstructure", Thèse de doctorat, ENS Cachan
- Forquin. P. (2010) "Comportement de matériaux fragiles sous sollicitations dynamiques, approches expérimentales et modélisation", Habilitation à Diriger des Recherches, Université de Lorraine
- Forquin P., Safa K., Gary G. (2010) "Influence of free water on the quasi-static and dynamic strength of concrete in confined compression tests", *Cement Concrete Res.*, 40(2), pp. 321-333.
- Forquin P., Gary G., Gatuingt F. (2008) "A testing technique for concrete under confinement at high rates of strain", *Int. J. Impact Eng.*, 35 (6), pp. 425-446.
- Forquin, P., Erzar, B. (2010) Dynamic fragmentation process in concrete under impact and spalling tests. *Int. J. Fract.* 163 (1-2): 193-215.
- Forquin P., Hild F. (2008) "Dynamic Fragmentation of an Ultra-High Strength Concrete during Edge-On Impact Tests", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 134 (4):302–315.
- Frew D.J., Forrestal M.J., Chen W. (2001) Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar", *Exp Mech* 42(1).
- Hild, F., Forquin, P., Silva, A.R.C. (2003) "Single and Multiple Fragmentation of Brittle Geomaterials" *Rev. Franç. Gén. Civil* 7 (7-8), 973-1003.
- Klepaczko, J.R., Brara, A. (2001) "An experimental method for dynamic tensile testing of concrete by spalling", *Int. J. Impact Eng.* 25, 387-409.
- Kutter, H.K., Fairhurst, C. (1971) "On the Fracture Process in Blasting", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 8, 181-202.
- Li Q.M., Reid S.R., Wen H.M., Telford A.R. (2005) "Local impact effects of hard missiles on concrete targets", *Int J. Impact Eng.* 32, 224-284.
- Pierron F., Forquin P. (2012) "Ultra high speed full-field deformation measurements on concrete spalling specimens and stiffness identification with the Virtual Fields Method", *Strain*, 28(5), pp. 388-405, 2012.
- Pontiroli C., Buzaud E., Erzar B. (2012) "Caractérisation du béton r30a7, rôle des paramètres matériau sur le comportement à la pénétration". PEA CODYMA, CEA-Gramat, technical report T2012-00110.
- Schuler, H., Mayrhofer, C., Thoma, K. (2006) "Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates", *Int. J. Impact Eng.* 32, 1635–1650.
- Song B., Chen W. (2004) "Loading and unloading split Hopkinson pressure bar pulse shaping techniques for dynamic hysteretic loops", *Exp Mech* 44(6)
- Vu X.H., Malécot Y., Daudeville L., Buzaud E. (2009) "Experimental analysis of concrete behavior under high confinement: effect of the saturation ratio", *Int J Solids Struct.* 46:1105–1120.
- Weerheijm J. (1992) "Concrete Under Impact Tensile Loading and Lateral Compression", PhD Thesis, Delft University of Technology.