



HAL
open science

Un essai expérimental de mesure de pressions dans une fissure “ réaliste ” représentative d’une fissure dans une éprouvette en béton

Jean-Louis Tailhan, Giuseppe Rastiello, Jean-Claude Renaud, Claude Boulay

► **To cite this version:**

Jean-Louis Tailhan, Giuseppe Rastiello, Jean-Claude Renaud, Claude Boulay. Un essai expérimental de mesure de pressions dans une fissure “ réaliste ” représentative d’une fissure dans une éprouvette en béton. CFM2022 - 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2022, Nantes, France. pp.148-163. cea-04355702

HAL Id: cea-04355702

<https://cea.hal.science/cea-04355702v1>

Submitted on 20 Dec 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L’archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d’enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Un essai expérimental de mesure de pressions dans une fissure « réaliste » représentative d'une fissure dans une éprouvette en béton

J.-L. TAILHAN^a, G. RASTIELLO^b, J.-C. RENAUD^a, C. BOULAY^c

a. Université Gustave Eiffel, MAST-EMGCU, Marne la Vallée, France -
jean-louis.tailhan@univ-eiffel.fr, jean-claude.renaud@univ-eiffel.fr

b. Université Paris-Saclay, CEA, Service d'Études Mécaniques et Thermiques, Gif-sur-Yvette, France -
giuseppe.rastello@cea.fr

c. Anc. chercheur IFSTTAR, CME, Faverelles, France - claudepp.boulay@gmail.com

Résumé :

Évaluer des débits de fuite de fluides à travers les fissures des ouvrages en béton est essentiel dans de nombreux domaines (sûreté nucléaire, stockage de fluides, durabilité des ouvrages). Dans des travaux antérieurs, les auteurs ont proposé des procédures expérimentales pour étudier et mesurer les fuites d'eau [1, 2] et d'air [3] à travers des échantillons de béton fissurés dans les conditions de chargement d'un essai brésilien. Dans un travail récent [4], les auteurs ont proposé une analyse critique de leur propre configuration expérimentale de perméabilité à l'air en considérant un système de plaques parallèles idéalisées équipé de capteurs de pression à l'intérieur de la fissure. Ils ont montré que la calibration des modèles d'écoulement d'air nécessite la connaissance de la répartition des pressions à l'intérieur de la fissure et que la seule mesure des pressions dans les réservoirs amont et aval peut conduire à une mauvaise interprétation des résultats expérimentaux. Dans le présent article, une expérience similaire est réalisée sur une fissure dite « réaliste », c'est-à-dire représentative d'une géométrie de surface de fissure réelle. L'échantillon est constitué de deux blocs initialement solidaires. Le bloc inférieur est obtenu par un moulage précis d'une demi-éprouvette de fendage en béton. La surface de fissure moulée est ensuite légèrement graissée et le bloc est percé de quatre trous cylindriques de 2 mm de diamètre pour la mesure des pressions. Le bloc supérieur est coulé directement sur le bloc inférieur. Le matériau utilisé est un plâtre-résine blanc extra-fin. Ce matériau ainsi que la fine couche de graisse permettent une séparation parfaite des deux blocs le long de la fissure réaliste. L'ensemble s'adapte sur le dispositif expérimental déjà existant [4]. Les résultats obtenus montrent que la connaissance des pressions réelles aux sections d'entrée et de sortie de la fissure est encore plus importante que dans le cas du canal à plaques parallèles. Des effets non linéaires supplémentaires sont observés dans la relation entre le débit massique et le gradient de pression au carré en raison de la géométrie de la fissure. De plus, la géométrie de la fissure affecte fortement les mesures de pertes de charge aux sections d'entrée et de sortie. Ces résultats illustrent bien qu'il faut être attentif à l'interprétation des résultats expérimentaux sur des fissures réelles dans le béton en l'absence de mesures de pression à l'intérieur de la fissure. À la connaissance des auteurs, il n'existe pas de dispositifs expérimentaux de ce type.

Abstract :

Assessing fluid leakage rates through cracks in concrete structures is crucial in many fields (nuclear safety, fluid storage, durability of structures). In previous works, the authors proposed experimental procedures to study and measure water [1, 2] and air [3] leakage through cracked concrete specimens under the loading conditions of a Brazilian test. In a recent work [4], the authors proposed a critical analysis of their experimental setup for air permeability evaluation by considering an idealized parallel plate system equipped with pressure sensors inside the crack. They showed that the calibration of airflow models requires knowledge of the pressure distribution inside the crack. They also showed that pressure measurements in the upstream and downstream reservoirs only could lead to a misinterpretation of the results. In the present paper, a similar experiment is carried out on a so-called "realistic" crack, i.e., representative of a real crack surface geometry. The sample is made up of two blocks that are initially joined together. The lower block is obtained by precisely moulding a half concrete specimen obtained by diametrical splitting (Brazilian test). The moulded crack surface is then lightly greased, and the block is drilled with four cylindrical holes, 2 mm in diameter, for pressure measurement. The upper block is cast directly on the lower one. The material used is an extra-fine white plaster resin. This material and the thin layer of grease allow a perfect separation of the two blocks along the realistic crack. The existing experimental device by [4] is then used. The results obtained show that the knowledge of the real pressures at the inlet and outlet sections of the crack is even more crucial than in the case of parallel plate channels. Additional nonlinear effects are observed in the relationship between mass flow rate and squared pressure gradient due to the geometry of the crack. In addition, the geometry of the crack strongly affects the head loss measurements at the inlet and outlet sections. These results clearly illustrate that it is necessary to be attentive to the interpretation of the experimental results on real cracks in the concrete in the absence of pressure measurements inside the crack. To the best of the authors' knowledge, there are no experimental devices of this type.

Mots clefs : Transfert de fluide, Perméabilité à l'air, Fissure plane idéalisée, Fissure réaliste, Pertes de charge.

1 Introduction

L'estimation des débits de fuites de fluides au travers de fissures dans les structures en béton est un sujet fondamental pour le nucléaire, le stockage de fluides, ou la durabilité des structures. C'est la raison pour laquelle, différentes études ont vu le jour depuis quelques décennies [5, 6]. La plupart d'entre-elles ont porté leur attention sur la quantification de propriétés de transfert dans le contexte particulier d'une fissure localisée dans un béton (cf. [1, 7, 8, 9, 10] pour les liquides, et [9, 3, 11, 12, 13, 14] pour les gaz). Les travaux présentés dans la présente contribution trouvent leurs origines dans de premières investigations menées sur des écoulements d'eau liquide à travers une fissure [15, 1, 2], adaptées ensuite à l'écoulement de gaz [3]. Leur objectif était l'étude de l'écoulement d'un fluide à travers une fissure « active », c'est à dire chargée mécaniquement, et dont l'ouverture était contrôlée et mesurable pendant l'essai. Le dispositif (décrit plus en détail à la section 2.2) était également équipé de moyen de mesure des pressions du fluide considéré. Cependant, ces mesures étaient réalisées aux points de contrôle des pressions dans le circuit, à savoir aux niveaux d'un régulateur amont et d'une pompe à vide aval, amont

et aval étant compris ici « par rapport à l'éprouvette de béton fissuré ». En outre, un capteur différentiel de pression permettait de mesurer la différence de pression entre l'entrée et la sortie de l'éprouvette, avec des prises de mesure situées dans les chambres d'alimentation/évacuation amont et aval de la fissure. Malheureusement, ce dispositif, conçu initialement pour un circuit de fluide liquide, s'est avéré inadapté au cas du gaz car incapable de permettre une mesure convenable du « gradient de pression au carré », quantité fondamentale de la théorie de écoulement d'un gaz, y compris en conditions de quasi-incompressibilité. En outre, il était impossible de s'affranchir de pertes de charges singulières liées aux différents changements de sections (élargissements-rétrécissements brusques) et subies par le fluide dans son écoulement. En conséquence, les résultats obtenus à l'époque rendaient impossible la vérification des lois théoriques.

Une étude spécifique [4] a permis de démontrer la nécessité de mesurer les pressions de gaz au plus près (à savoir à l'intérieur) de la fissure si l'on veut éviter d'intégrer dans les résultats les pertes de charges singulières induites par la géométrie même du dispositif. L'éprouvette de béton y avait été remplacée par deux demi-blocs métalliques permettant de définir un espace d'écoulement idéalisé plan-plan en remplacement de la fissure initiale. L'un des deux blocs avait été équipé de quatre trous cylindriques régulièrement espacés dans le sens de l'écoulement et raccordés à quatre capteurs de pression. Les mesures réalisées ont permis de vérifier que (1) la relation entre le gradient de pression au carré et le débit était non linéaire si les pressions étaient mesurées comme dans le dispositif classique, et que (2) cette relation recouvrait sa linéarité si les pressions étaient mesurées au sein de la fissure plane. Cette dernière configuration corroborant la théorie.

Ce travail se propose de présenter une adaptation du dispositif utilisé dans l'étude spécifique précédente au cas d'une fissure « réaliste ». La méthode de fabrication de l'éprouvette testée est présentée sur la base d'un processus de moulage de surface de fissure réelle. Le spécimen est conçu pour s'ouvrir en deux blocs le long de cette surface, et les pressions sont mesurables dans le chemin de la fissure. La méthodologie est mise en œuvre dans deux scénarios. Premièrement, celui d'une fissure plane pour vérifier la cohérence des résultats avec [4] et valider la procédure. Ensuite, celui d'une fissure « réaliste » pour comparer avec le cas précédent et étudier l'effet de cette géométrie particulière sur les paramètres d'écoulement.

2 Méthode

2.1 Fabrication des éprouvettes

Mesurer des pressions dans une fissure réelle est une idée particulièrement délicate à mettre en œuvre techniquement, et pose en fait deux problèmes majeurs :

- il est difficile de prévoir à l'avance un dispositif de mesure des pressions de fluide dans un échantillon de béton sans savoir exactement où se situera la fissure ;
- une connaissance précise de la géométrie de la fissure pendant l'essai est presque impossible ou du moins difficile à obtenir. Le processus de fissuration dans un matériau hétérogène comme le béton peut conduire à des fissures très complexes d'un point de vue géométrique. Le déplacement relatif des deux lèvres de fissure peut être sensiblement différent d'un endroit à l'autre. Sa mesure en tout point nécessite des moyens spécifiques, et la définition d'une ouverture moyenne reste une question délicate.

Pour cette raison, comme une étape vers l'étude des fissures réelles, ce travail s'est concentré sur ce que l'on appelle ici une fissure « réaliste ». On pourrait la définir comme un espace dont la géométrie se

rapproche le plus possible de celle d'une fissure réelle. Néanmoins, cette géométrie doit rester idéalement maîtrisée : son encombrement est connu (longueur et largeur), ainsi que la distance entre ses faces opposées. On impose cependant les contraintes suivantes :

- la fissure réaliste doit être une reproduction fidèle d'une surface de fissure dans un bloc de béton fendu ;
- elle doit être initialement fermée et aucun écoulement de fluide ne doit pas être possible dans cet état ;
- son ouverture doit se produire pour une charge très faible ;
- une fois ouverte, les deux surfaces opposées (idéalement similaires) doivent se déplacer parallèlement l'une à l'autre.

Le principe de fabrication des éprouvette est le suivant. La solution consiste d'abord à prendre l'empreinte d'une surface fissurée réelle (figure 1-1). On utilise pour cela une demie éprouvette de fendage. Afin d'obtenir une grande précision sur le rendu de la rugosité de surface et des irrégularités de la fissure, on peut utiliser du silicone RTV (vulcanisation à température ambiante et réticulation par polycondensation). Ce type de produit présente également l'avantage d'avoir un très faible retrait. Des formes en silicone RTV de joints latéraux d'étanchéité sont insérées dans l'empreinte (figure 1-2). Cette dernière sert ensuite de fond de moule pour la fabrication du bloc inférieur de l'éprouvette de test (figure 1-3). Le bloc est coulé à l'aide d'un plâtre résine. Il s'agit d'un plâtre fin assez résistant utilisé dans le domaine des loisirs créatifs. Il a l'avantage d'avoir également un faible retrait, et, compte tenu de sa finesse, de recréer fidèlement les détails de la surface de fissure. En outre, nous avons remarqué que la reprise de coulage sur ce type matériau possédait une faible résistance à la traction (séparable « à la main »). Une fois démoulé, le bloc inférieur est percé de 4 trous verticaux de 2 mm de diamètre. Du joint cylindrique souple du même diamètre y est inséré (le joint sert de protection pendant le coulage du bloc supérieur, afin d'éviter que le plâtre ne bouche ces trous, figure 1-4). La surface de la fissure est légèrement graissée et le bloc supérieur est coulé (figure 1-5). Les joints cylindriques de protection sont enlevés ainsi que les formes des joints latéraux. Un produit de scellement est enfin injecté dans les espaces réservés (figure 1-6). Ce produit¹ a été choisi pour sa haute adhérence au support, sa capacité à résister à la pression et sa très grande déformabilité. Après démoulage de l'éprouvette, les faces inférieures et supérieure peuvent être éventuellement rectifiées pour garantir un bon niveau de planéité et de parallélisme entre-elles.

2.2 Dispositif expérimental

Les deux blocs, inférieur et supérieur, reconstitués selon la procédure décrite précédemment et séparés par la surface de reprise de coulage représentant la fissure réaliste, constituent l'éprouvette testée. Elle est utilisée avec le montage expérimental développé et amélioré dans [15, 1, 3, 4]. Ce dispositif (figure 2-(a)) consiste en deux chambres, amont et aval, prenant en sandwich l'éprouvette. L'étanchéité entre les chambres et l'éprouvette est assurée au moyen de joints annulaires plats de 2mm d'épaisseur et de faible raideur. Un système à vis de maintien permet de conserver une pression suffisante des joints plats contre les faces de l'éprouvette, garantissant un bon niveau d'étanchéité lors de la mise en pression du fluide dans le circuit d'air. Le contrôle des pressions d'air (filtré) se fait à l'amont et/ou à l'aval par l'intermédiaire d'un régulateur (à l'amont) et d'une pompe à vide (à l'aval). La pompe à vide permet d'imposer une pression minimale de 30 mbars. Deux débitmètres² permettent de mesurer le débit massique de fluide en amont et en aval de l'éprouvette et permettent de vérifier si d'éventuelles fuites se

1. Sikaflex® Pro-11 FC.

2. Bronkhorst, EL-Flow Select F-111AC-50K-AAD-33V, échelle 1...50 nl/min.

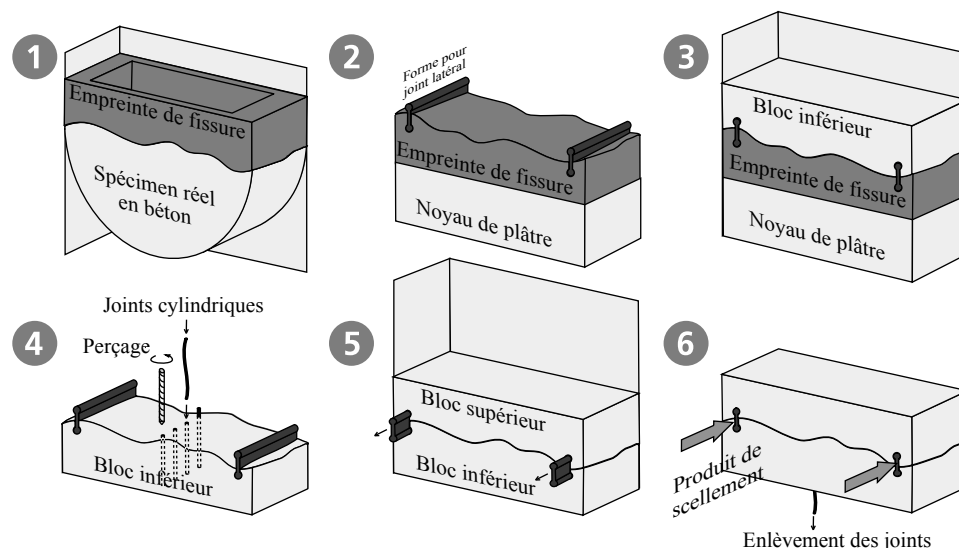


FIGURE 1 – Étapes de la fabrication des éprouvettes.

produisent. Un capteur différentiel de pression mesure en outre le différentiel de pression entre les deux chambres. Un système de refroidissement du fluide³ est positionné en avant de la chambre amont et permet de maintenir constante la température du gaz. Une vérification de cette stabilité de la température dans l'écoulement peut être faite grâce à des thermocouples positionnés dans les chambres.

L'éprouvette est alors interposée et collée entre deux prismes métalliques et l'ensemble est pris en sandwich, comme décrit précédemment. La phase de collage est particulièrement délicate à réaliser. Le prisme métallique inférieur est muni de quatre trous cylindriques de même diamètre que ceux usinés dans le bloc de plâtre inférieur de l'éprouvette. Ces trous sont reliés à quatre orifices sur lesquels on peut brancher quatre capteurs de pression⁴. La localisation des prises de pression au sein de la fissure réaliste est indiquée figure 2-(b). L'étanchéité latérale du circuit de fluide, dans la fissure, est assurée par les joints coulés en place lors de la fabrication de l'éprouvette (étape 6, figure 1). La distance entre ces joints est de 90 mm, définissant ainsi précisément la largeur de l'écoulement (figure 2-(b)). La longueur de l'écoulement dans la fissure est prise égale à l'épaisseur de l'éprouvette, soit, 50 mm. Enfin, quatre capteurs LVDT sont positionnés deux par deux sur chaque face latérale de l'éprouvette et pontent la fissure réaliste. La moyenne des mesures des déplacements donne ainsi l'ouverture de la fissure.

En résumé, les quantités mesurées sont : la pression au niveau du régulateur, la pression dans la pompe à vide, le différentiel de pression entre les deux chambres, les (4) pressions dans la fissure, le débit massique amont, le débit massique aval, les températures de fluide dans les chambres, les déplacements relatifs entre les deux demi blocs de plâtre, inférieur et supérieur, de l'éprouvette.

2.3 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale a été intégralement empruntée à [4]. Les principales étapes sont rappelées ci-dessous :

- Une pré-compression d'environ -25 kN est appliquée à l'échantillon, et un test de détection d'éventuelles fuites est effectué (la pression amont est montée à 2 bars) ;

3. Tube hélicoïdal plongé dans un bain thermostaté maintenu à une température de 22°C.

4. Gems Sensors & Controls, Compact Low-Pressure OEM Pressure Transmitters, Série 3500, pression maximale de 4 bar, <https://fr.rs-online.com/web/p/capteurs-de-pression/8968474/>.

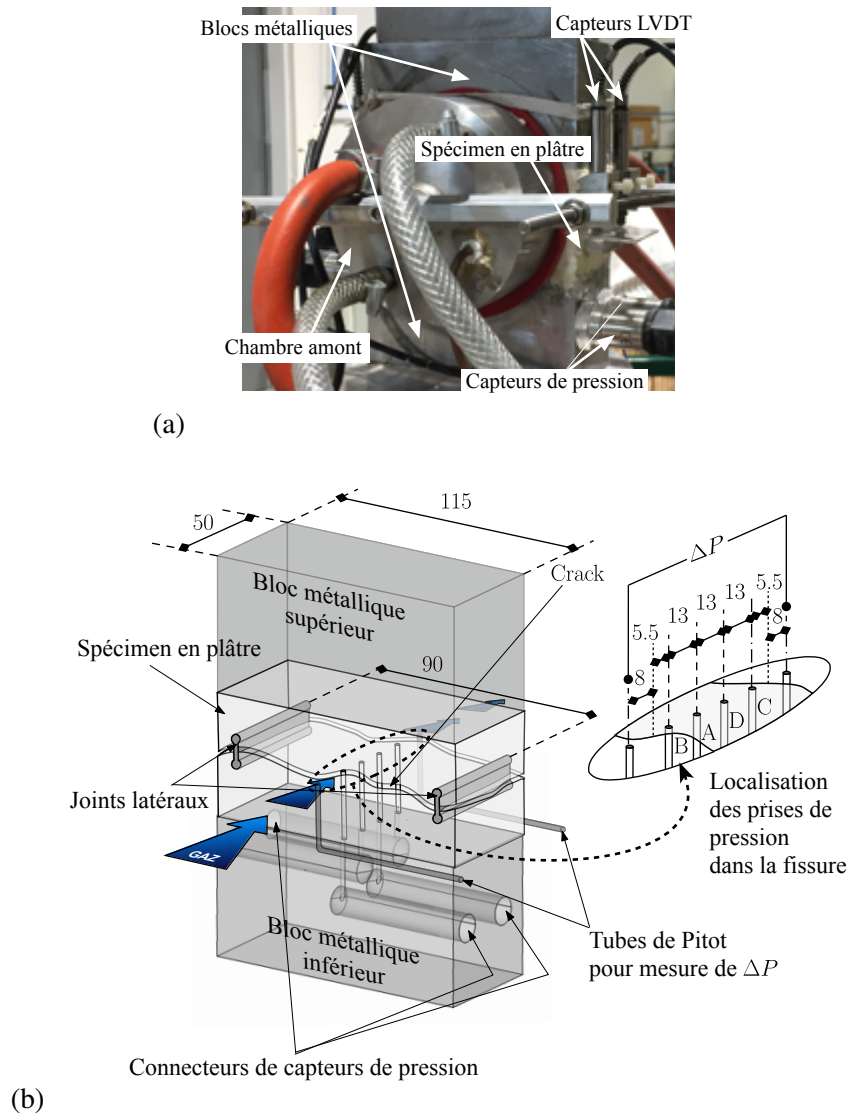


FIGURE 2 – Dispositif expérimental.

TABLE 1 – Incréments de la moyenne des 4 LVDTs pour la définition du plateau de chargement et configuration des conditions de pressions correspondantes (Ces conditions sont détaillées dans le tableau 2).

Increments (μm)	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100	112.5	125	150	200
Cond. n°	1	1	1	1&2	1	1	1	1&2	1	1	1&2	1
Idealized crack (μm)	3	15	28	40	53	65	78	90	103	115	140	190
Realistic crack (Test 1- μm)	-	-	13	25	37	50	63	75	87	100	125	175
Realistic crack (Test 2- μm)	-	-	13	25	39	51	63	76	88	101	126	176

TABLE 2 – Ratios de pressions imposés pour les conditions n°1 et n°2 du tableau 1.

Cond. n°	P_1 (bars)	P_2 (bars)	P_1/P_2	Cond. n°	P_1 (bars)	P_2 (bars)	P_1/P_2
1	1	0.83	1.2	2	1.2	1	1.2
	1	0.67	1.5		1.4	1	1.4
	1.2	0.8	1.5		1.6	1	1.6
	1.2	1	1.2		1.8	1	1.8
	1.5	1	1.5		2	1	2

- Mise à 0 des capteurs de déplacements ;
- La presse est pilotée par la moyenne des 4 LVDT ; cette valeur est alors augmentée continûment jusqu'à un plateau maintenu constant ; pendant ce plateau, différentes mesures de pressions et de débit sont réalisées ;
- l'étape précédente est reproduite plusieurs fois, à différents niveaux de plateau, jusqu'à une valeur maximale.

Les différentes valeurs de plateau ainsi que les conditions de pression imposées lors de ces paliers sont indiquées dans les tableaux 1 et 2.

Deux types différents d'éprouvettes sont réalisés. Le premier type comporte une fissure plane⁵ et le second une fissure réaliste⁶, ce dernier étant réalisé conformément à la méthodologie précédemment détaillée. Le processus de fabrication de l'échantillon à fissure plane est plus simple car il ne nécessite aucune empreinte de fissure réelle et certaines étapes de la fabrication sont donc inutiles.

3 Résultats

Trois essais ont été effectués, un avec une fissure plane idéalisée (plaque parallèle) et deux avec une fissure réaliste. On remarquera sur la figure 3 la qualité de la reproduction de la surface réelle d'une fissure par moulage. Le premier essai doit être comparé aux résultats rapportés dans [4] pour des écoulements d'air à travers un canal à plaques parallèles entre deux blocs d'acier, pour valider le protocole expérimental. Les deux autres sont à comparer avec le test de fissure idéalisée pour révéler l'effet de la géométrie du chemin de fissure sur l'écoulement.

L'évaluation de l'ouverture de fissure (w) est réalisée à l'aide d'un post-traitement, développé dans [4]. La difficulté est de déterminer l'initiation de l'ouverture, qui est évaluée lorsque la valeur moyenne des

5. Fabrication d'une seule éprouvette.

6. Fabrication de deux éprouvettes.

mesures des LVDT et la mesure du déplacement vérin évoluent ensemble linéairement. C'est aussi l'instant qui correspond à une inflexion marquée de la charge appliquée, qui de valeurs négatives importantes (pré-compression initiale) devient légèrement positive (ouverture de fissure)⁷. disparaître. Cette technique est à nouveau utilisée ici. L'intéressé lecteur est renvoyé à la référence pour plus de détails. La fissure les ouvertures correspondant aux pas LVDT imposés sont rapporté dans le tableau 1 pour tous les tests.



FIGURE 3 – Courbes $P_B - P_C$ vs. ΔP . La relation entre ces deux différentiels de pression illustre les pertes de charges cumulées entre l'entrée et la sortie de la fissure.

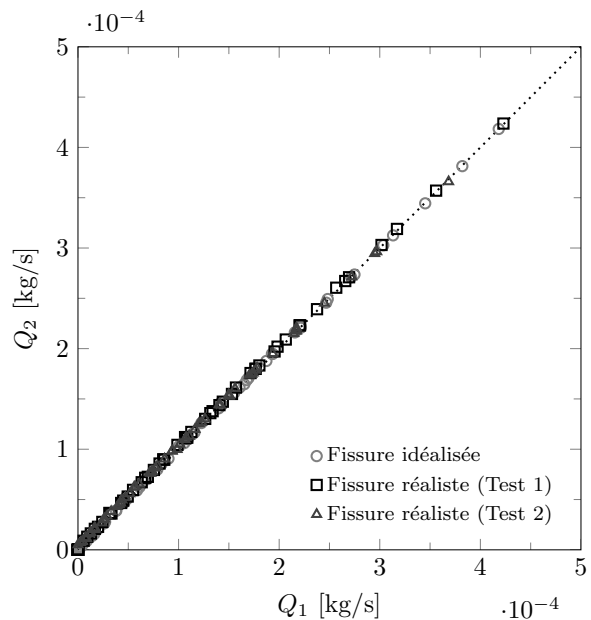


FIGURE 4 – Comparaison des débits massiques amont Q_1 et aval Q_2 .

La figure 4 montre les mesures de débits massiques amont et aval (réalisées simultanément pendant les essais). Les points forment une ligne droite de pente très proche de l'unité. Cette figure montre l'absence de fuites de gaz parasites dans tous les tests, et l'efficacité des joints latéraux coulés dans les blocs de plâtre. Il est donc très raisonnable de considérer que le débit massique (Q) est bien conservé dans l'expérience :

$$Q = Q_1 \approx Q_2 \quad (1)$$

3.1 Fissure plane idéalisée

Dans le cadre d'un écoulement isotherme de fluide quasi-incompressible, en négligeant les effets de raréfaction, le gradient macroscopique de pression au carré peut s'écrire comme la somme d'un terme correspondant à la quasi-incompressibilité de l'écoulement et un second représentant les effets de compressibilité [16, 11, 17] :

$$\frac{P_i^2 - P_j^2}{l} = 2rT \left[\frac{4fQ}{bw_h^2} \left(\frac{Q}{bw} \right) + \frac{1}{l} \ln \left(\frac{P_i}{P_j} \right) \left(\frac{Q}{bw} \right)^2 \right] \quad (2)$$

avec P_i la pression de fluide proche de l'entrée de la fissure, P_j celle proche de la sortie, l et b la longueur et la largeur de l'écoulement respectivement, $r = R/M$ (M étant la masse molaire du gaz

7. La très faible valeur positive est très certainement liée au serrage des joints plats d'étanchéité sur les faces de l'éprouvette. La raideur des joints latéraux coulés en place étant beaucoup plus faible.

et R la constante des gaz parfaits), $w_h = 2w$ l'ouverture hydraulique. Le coefficient de Fanning (f) pouvant également s'exprimer par l'inversion de cette formule sous la forme :

$$f = \frac{b^2 w_h^3}{16 r T Q^2} \frac{P_i^2 - P_j^2}{l} - \frac{w_h}{l} \ln \left(\frac{P_i}{P_j} \right) \quad (3)$$

La figure 5-(a) illustre la relation débit massique en fonction du gradient macroscopique de pression au carré; la figure 5-(b) donne l'évolution de fR_e en fonction de R_e (R_e étant le nombre de Reynolds de l'écoulement). La valeur théorique du coefficient de Fanning pour un tel écoulement ($fR_e = 24$ est représentée par la droite horizontale en pointillés). Pour ces résultats, les pressions ont été mesurées aux points B et C indiqués figure 2-(b).

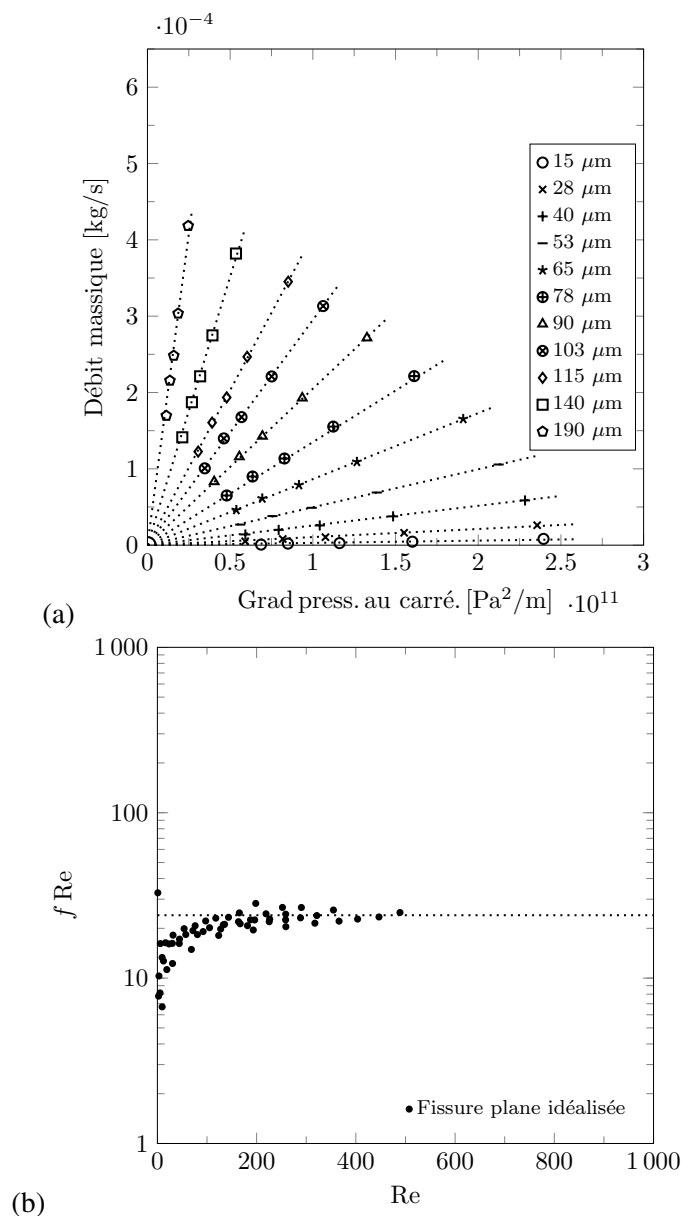


FIGURE 5 – Résultats obtenus pour l'essai sur fissure plane idéalisée

3.2 Fissure réaliste

Deux tests sur des fissures réalistes (notés Test 1 et Test 2 sur la figure 6) ont été réalisées dans les mêmes conditions expérimentales : même orientation de la géométrie de fissure dans l'espace et mêmes conditions de pressions). Malheureusement, dans chacun des deux test, l'un des trous de mesure de pression interne à la fissure s'est bouché lors du collage de l'éprouvette sur les blocs métalliques. Cependant, les trous bouchés ne sont pas aux mêmes endroits. Par conséquent, il est possible de reconstruire raisonnablement le profil de pression à l'intérieur de la fissure en superposant les mesures des deux tests.

La figure 6 donne ces profils pour trois ouvertures de fissures et pour les deux essais réalisés.

De même que pour l'essai sur fissure plane idéalisée, la figure 7-(a) montre la relation entre le débit massique et le gradient macroscopique de pression au carré, et la figure 7-(b) donne l'évolution du coefficient de Fanning (f) en fonction du nombre de Reynolds (Re).

4 Discussion

4.1 Concernant le test avec fissure plane idéalisée

La première constatation que nous avons faite est que les résultats obtenus dans cet essai sont parfaitement similaires (en forme et en valeur) avec ceux publiés dans [4]. Ce qui permet la validation de la méthodologie de fabrication des éprouvettes en plâtre (dans l'essai de [4], les deux blocs métalliques définissait un espace d'écoulement plan-plan, les plans étant parallèles et rectifiés).

L'ensemble de ces résultats corrobore assez bien la théorie et ses hypothèses. Le flux de gaz est quasi-incompressible, et une loi linéaire représente avec une bonne approximation la relation débit massique en fonction du gradient macroscopique de pression au carré. De plus, le coefficient de Fanning est proche de sa valeur théorique ($f = 24/Re$) au moins pour les ouvertures de fissures supérieures à environ 50 à 60 μm .

4.2 Concernant le test avec fissure réaliste

La figure 6 donnant les variations de pression dans la fissure pour différentes ouvertures, conduit à faire les remarques suivantes :

- les profils de pression internes à la fissure réaliste ne sont pas linéaires. Une légère non-linéarité est visible ;
- pour un ensemble donné de conditions de pression imposées, la non-linéarité augmente avec l'ouverture de la fissure ;
- pour une ouverture de fissure donnée, plus le (carré du) gradient de pression est grand, plus la non-linéarité est élevée.

Cette non-linéarité peut être liée soit à la compressibilité du fluide, soit à l'effet de la géométrie, soit aux deux causes simultanément. La première est certaine car elle s'observe aussi dans le cas de la fissure plane [4]. La seconde est plus difficile à vérifier car les différences en termes de non-linéarité des profils de pression ne sont pas évidentes entre la fissure plane et la fissure réaliste. Néanmoins, cette non-linéarité reste suffisamment faible pour considérer comme raisonnable l'utilisation de la relation (2) exprimée aux points de mesure B et C (cf. figure 2) pour évaluer un gradient de pression macroscopique

au sein de la fissure réaliste. Notez que seul le test 1 permet d'évaluer ce gradient (P_C n'étant pas mesurable dans le test 2).

On note également, que la comparaison des courbes figure 5-(a) et figure 7-(a) conduit à remarquer la forte non-linéarité du comportement dans le cas d'un écoulement en fissure réaliste. Non-linéarité d'autant plus marquée que l'ouverture de fissure est importante et le débit élevé. Cet aspect est clairement lié à la géométrie perturbée de la fissure réaliste.

Une comparaison plus fine entre les deux cas montre également que, pour les petites ouvertures et au même gradient de pression au carré, les débits sont plus importants au sein de la fissure réaliste que dans la fissure plane. Pour les grandes ouvertures, la tendance s'inverse. Ces tendances sont également confirmées par la comparaison des figures 5-(b) et 7-(b). Le coefficient de Fanning des petites fissures réalistes est inférieur à celles des petites fissures planes indiquant que les frottements dans l'écoulement au niveau des parois de la fissure sont comparativement réduits, et le débit massique y est donc plus important. Pour les fissures planes, on sait que la valeur limite de 0,001 pour le nombre de Knudsen, auquel les effets de raréfaction ainsi que les glissements aux parois se produisent, est atteinte pour des ouvertures inférieures à environ $50 \mu\text{m}$. Dans le cas de la fissure réaliste, la mesure du déplacement relatif des deux blocs de plâtre séparés est toujours une surestimation de l'ouverture réelle de fissure rencontrée par le flux. En conséquence, le nombre de Knudsen peut être très localement sous-estimé.

Pour les fissures avec des ouvertures plus grandes, la comparaison des figures 5-(b) et 7-(b) montre que le phénomène de frottements sur les parois sont plus importants dans le cas réaliste que celui de la fissure plane. Des considérations sur la géométrie réaliste de la fissure peut expliquer cela. Les irrégularités géométriques de la surface interviennent plus probablement sous forme de rugosité lorsque l'ouverture est plus grande, tendant à augmenter considérablement le facteur de frottement. Ceci explique les valeurs plus élevées observées sur ces figures.

4.3 Considérations sur les pertes de charge

Le dispositif actuel ne permet pas d'évaluer directement les pertes de charge en entrée et en sortie de la fissure (c'est à dire entre les chambres et la fissure). Pour autant, il est certain que de telles pertes existent et peuvent potentiellement être non négligeables. L'examen des figures 6 montre bien la chute de pression entre le régulateur et l'entrée de la fissure, ainsi qu'entre la sortie de fissure et la pompe à vide. En outre, la variation du différentiel de pression ΔP (mesure entre les deux chambres) et la mesure de l'écart de pression $P_B - P_C$ (entre l'entrée et la sortie de la fissure) montre également que ces deux quantité n'évoluent pas de la même manière (figure 8). Cela indique clairement que, si aucune précaution n'est prise, la mesure du gradient de pression au carré à partir de prise de mesure dans les chambre peut induire un biais flagrant dans les résultats.

5 Conclusion

Un dispositif expérimental pour la mesure de pressions de gaz dans une fissure réaliste est proposé. Une fissure réaliste est basée sur une reproduction fidèle de la géométrie d'une fissure réelle, obtenue par moulage, mais avec quelques paramètres géométriques qui peuvent être mieux contrôlés. En particulier, les dimensions globales (longueur et largeur) et la distance entre les faces opposées de la fissure ouverte sont connues. En ce sens, une fissure réaliste reste une simplification d'une fissure réelle.

Dans cette expérience, il est possible de mesurer directement les pressions de gaz à l'intérieur même de la fissure. Cet aspect est d'une importance cruciale puisqu'il a été démontré dans [4] que les pertes de charge aux sections d'entrée et de sortie de la fissure induisent un biais préjudiciable et une mauvaise interprétation des résultats.

Grâce à ce dispositif expérimental, l'effet de l'irrégularité de la surface d'une fissure sur les caractéristiques de l'écoulement peut être analysé. Pour une fissure plane, il a été montré que la mesure des pressions le long du flux conduit à des résultats qui vérifient raisonnablement la théorie. Une géométrie de fissure réaliste induit des modifications significatives des résultats puisque la relation entre le débit massique et le gradient de pression au carré devient non linéaire. Les effets de la raréfaction des gaz, combinés à d'autres phénomènes qui doivent encore être clarifiés, semblent renforcés pour des fissures fines (réalistes) et réduire considérablement le coefficient de Fanning. Dans le cas de fissures plus ouvertes, les irrégularités de surface agissent beaucoup plus comme des effets de rugosité, augmentant le frottement aux parois, comparativement aux fissures planes.

Étant donné qu'un chemin de fissure dans le béton est principalement influencé par l'hétérogénéité du matériau, sa géométrie a des caractéristiques aléatoires. Cet aspect devrait être étudié plus en profondeur. En outre, la notion de fissure réaliste restant une simplification de la réalité d'une fissure, la question de la représentativité de cet essai doit encore être approfondie.

Remerciements

G. Rastiello a été soutenu par l'Institut SEISM (<http://www.institut-seism.fr>).

Références

- [1] G. Rastiello, C. Boulay, S. Dal Pont, J.-L. Tailhan, and P. Rossi, Real-time water permeability evolution of a localized crack in concrete under loading, *Cement and Concrete Research*, 56 :20–28, 2014.
- [2] G. Rastiello, S. Dal Pont, J.-L. Tailhan, P. Rossi, On the threshold crack opening effect on the intrinsic permeability of localized macrocracks in concrete samples under brazilian test conditions, *Mechanics Research Communications*, 90 :52–58, 2018
- [3] J.-L. Tailhan, G. Rastiello, J.-C. Renaud, C. Boulay, G. Antony. Projet MACENA WP3 – task 1.3 – livrable 2017, 2018.
- [4] J.-L. Tailhan, G. Rastiello, J.-C. Renaud, C. Boulay, Critical analysis of an experimental setup to estimate gas permeability through an active crack, *Nuclear Engineering and Design*, 370 :110915, 2020
- [5] M. Hoseini, V. Bindiganavile, and N. Banthia, The effect of mechanical stress on permeability of concrete : A review, *Cement and Concrete Composites*, 31(4) :213–220, 2009.
- [6] A. Agrawal, A comprehensive review on gas flow in microchannels, *International Journal of Micro-Nano Scale Transport*, 2(1) :1–40, 2011.
- [7] K. Wang, D.C. Jansen, S.P. Shah, and A.F. Karr, Permeability study of cracked concrete, *Cement and Concrete Research*, 27(3) :381–393, 1997.
- [8] C.-M. Aldea, S.P. Shah, and A. Karr, Permeability of cracked concrete, *Materials and Structures*, 32(5) :370–376, 1999.

- [9] V. Picandet, A. Khelidj, and H. Bellegou, Crack effects on gas and water permeability of concretes, *Cement and Concrete Research*, 39(6) :537–547, 2009.
- [10] A. Akhavan, F. Rajabipour, Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars, *Cement and Concrete Research*, 42(2) :313–320, 2012.
- [11] K. Suzuki, T. Takiguchi, H. Hotta, N. Kojima, M. Fukuhara, and K. Kimura, Experimental study on the leakage of gas through cracked concrete walls, in : IASMiRT, 1989.
- [12] T. Suzuki, K. Takiguchi, and H. Hotta, Leakage of gas through concrete cracks, *Nuclear Engineering and Design*, 133(1) :121–130, 1992.
- [13] U. Greiner, W. Ramm, Air leakage characteristics in cracked concrete, *Nuclear Engineering and Design*, 156(1) :167–172, 1995.
- [14] M. Ezzedine El Dandachy, M. Briffaut, F. Dufour, and S. Dal Pont, An original semi-discrete approach to assess gas conductivity of concrete structures : Semi-discrete approach to assess concrete hydraulic conductivity, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 41(6) :940–956, 2017.
- [15] C. Boulay, S. Dal Pont, P. Belin, Real-time evolution of electrical resistance in cracking concrete, *Cement and Concrete Research*, 39(9) :825–831, 2009.
- [16] S.H. Rizkalla, B.L. Lau, and S.H. Simmonds, Air leakage characteristics in reinforced concrete, *Journal of Structural Engineering*, 110(5) :1149–1162, 1984.
- [17] S.F. Choquette, M. Faghri, E.J. Kenyon, and B. Sunden, Compressible fluid flow in micron sized channels, pages 25–32, 1996.

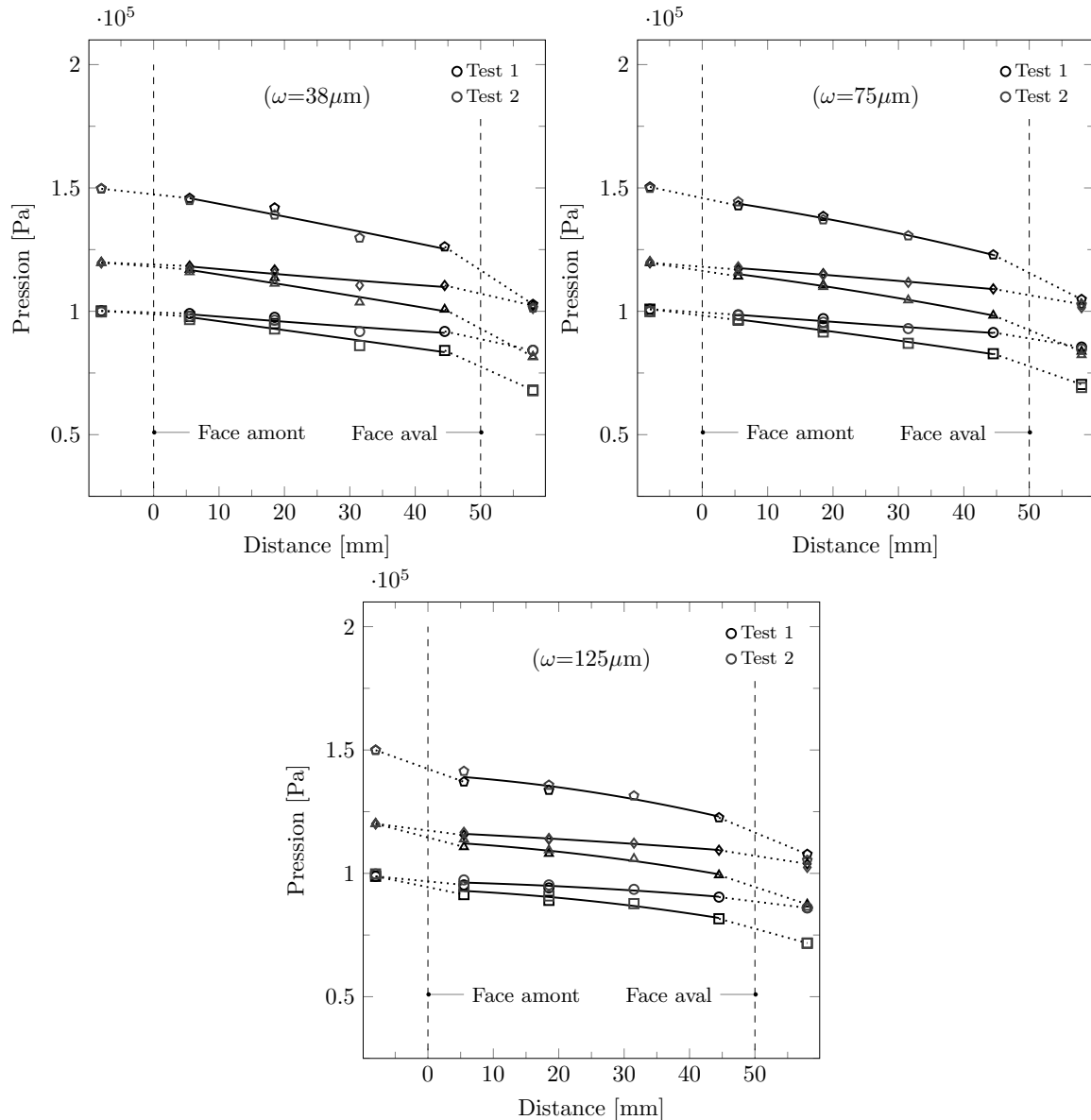


FIGURE 6 – Distribution de pressions à l’intérieur de la fissure réaliste. Les profils sont reconstruits par superposition des résultats des deux tests 1 et 2 réalisés. Chaque sous-fissure correspond à une ouverture de fissure et à différents gradients de pression (cond. n° 1 du tableau 2). Les distances sont mesurées à partir des faces amont et aval de l’éprouvette (représentées par les lignes verticales en pointillés). Les points situés à gauche de la face amont et à droite de la face aval correspondent aux pressions imposées au niveau du régulateur (gauche) et de la pompe à vide (droite).

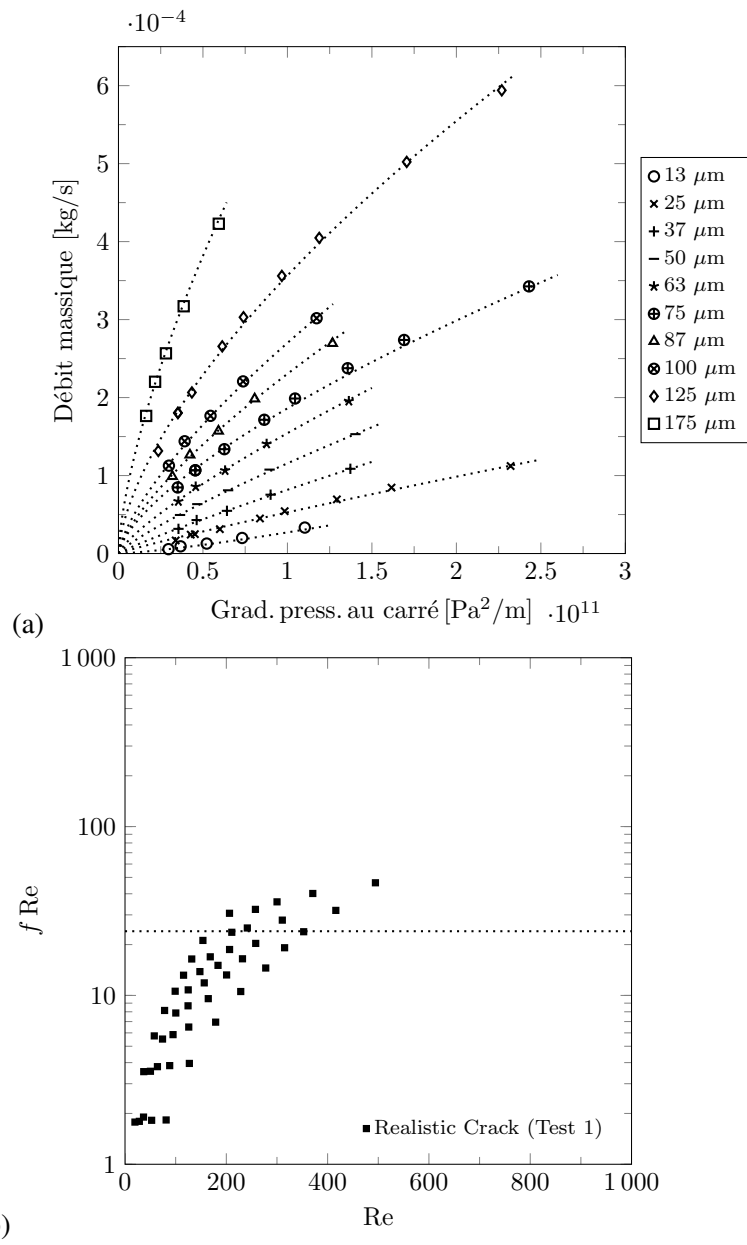


FIGURE 7 – Résultats obtenus pour l’essai sur fissure réaliste (test 1).

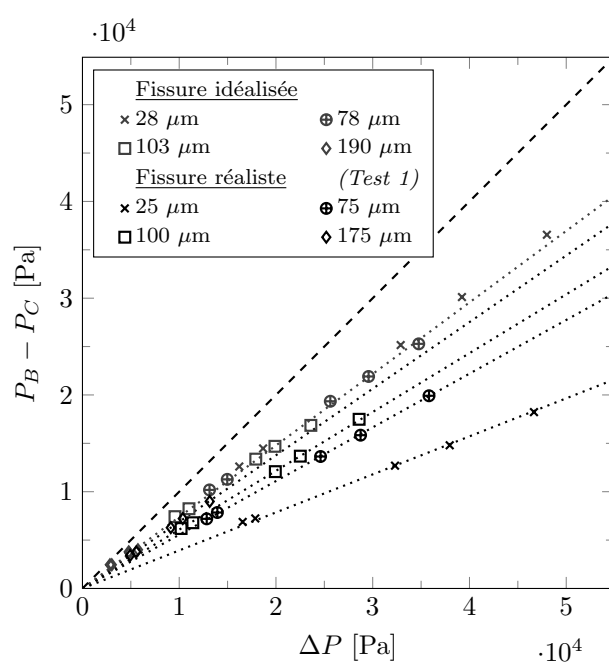


FIGURE 8 – Courbes $P_B - P_C$ vs. ΔP . La relation entre ces deux différentiels de pression illustre les pertes de charges cumulées entre l'entrée et la sortie de la fissure.