

Harmonisation des techniques de mesure de la perméabilité au gaz en vue d'une exploitation *in situ*

J. Verdier¹, S. Multon¹, H. Cagnon¹, A. Nehme¹

¹ Université de Toulouse ; UPS, INSA ; LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions) ; 135, avenue de Rangueil ; F-31 077 Toulouse Cedex 04, France

RESUME La perméabilité est un indicateur de durabilité reconnu permettant d'évaluer entre autres l'étanchéité des ouvrages, notamment du nucléaire, pour lesquels les propriétés de confinement sont essentielles. Plusieurs techniques de mesure sont utilisées pour déterminer une valeur de perméabilité apparente, qui diffère selon la nature de la technique utilisée. La technique de mesure en surpression et régime permanent est la seule à faire l'objet d'une norme (XP-P18-463), la perméabilité obtenue par cette technique sera considérée ici comme perméabilité de référence. Les techniques en dépression (régime permanent ou transitoire) conduisent à une perméabilité supérieure du fait de la nature des écoulements non visqueux mis en jeu et/ou des gradients de pression évolutifs présents dans l'échantillon. L'objectif de l'article est de proposer une méthode d'harmonisation des techniques permettant de remonter à la perméabilité de référence quelle que soit la technique utilisée.

Mots-clefs : perméabilité au gaz, durabilité, étanchéité, dépression, mesure *in situ*

I. INTRODUCTION

Les centrales nucléaires double parois font régulièrement l'objet d'inspections afin de vérifier leur étanchéité en cas d'accident. Des incertitudes demeurent sur l'évaluation des fuites singulières et des mesures de perméabilité complémentaires sont souhaitées. Ainsi une technique de mesure *in situ* est nécessaire. Elle peut être basée sur la mesure au perméamètre Torrent TPT, mesure de surface en dépression et, régime transitoire qui s'écarte de la mesure normative et reste difficilement interprétable. Afin de pouvoir proposer une meilleure interprétation de l'essai *in situ*, une méthodologie de laboratoire a été développée. Celle-ci consiste à déterminer la perméabilité apparente de référence en surpression et régime permanent (CEMBUREAU) pour plusieurs bétons dans des états de saturation variables, puis de confronter cette valeur à celles obtenues en dépression et régime permanent, puis en dépression et régime transitoire, configuration qui se rapproche le plus de la mesure *in situ*. Finalement des corrélations sont proposées dans le but d'harmoniser les différentes techniques.

II. MATERIAUX ET METHODES

- Matériaux et conditionnement

Les formulations ont été choisies pour que les bétons étudiés couvrent une assez large gamme de porosité et soient représentatifs des bétons de sites du point de vue des transferts. Notre travail étant inscrit dans le cadre global du projet ENDE, le béton ENDE ($E / C = 0,52$, $fc28 = 46,8$ MPa, porosité = 15,2 %) formulé est celui utilisé sur Vercors (maquette de centrale nucléaire à l'échelle 1/3). Les deux autres bétons sont : un béton ordinaire (BO – $E/C = 0,64$, $fc28 = 40,2$ MPa, porosité = 18 %) et un béton à haute performance à base du CEM I (BHP – $E/C = 0,43$, $fc28 = 57,8$ MPa, porosité = 13,5 %). Cure de 60j en eau de chaux, perméabilité mesurée à : 60, 30 et 0% de Sr. Après la cure les échantillons sont saturés sous vide et préconditionnés pour atteindre les Sr cibles.

- Dispositifs de mesure en régime permanent

La perméabilité apparente de référence karef est obtenue avec le CEMBUREAU (Kollek, 1989) pour une pression d'entrée de 2 bars absolue. Le CEMBUREAU est également utilisée en dépression régime permanent (vide de 15mbar) afin d'évaluer l'effet de la pression motrice.

- Dispositifs de mesure en régime transitoire en conditions de flux maîtrisées

Pour étudier l'influence du régime d'écoulement, la cellule CEMBUREAU est utilisée en dépression mais cette fois en régime transitoire en faisant le vide dans le volume supérieur, puis en mesurant la vitesse de remontée de la pression dans le système (Sogbossi, 2019).

- Perméamètre *in situ* Torrent

Le perméamètre TPT double cloche tire un vide de 60s dans deux cloches concentriques. Ensuite on coupe l'alimentation de la cloche interne et on enregistre la remontée de pression en son sein, tout en équilibrant la pression de la cloche externe à la valeur de l'interne, ce qui permet de considérer un flux unidirectionnel dans la cloche interne (Torrent, 1992).

III. RESULTATS

- Perméabilités en régimes permanents : CEMBUREAU surpression ou dépression

En se basant sur la relation de Klinkenberg, un coefficient de prise en compte de la pression est utilisé (Sogbossi, 2019) pour relier karef aux perméabilités apparentes obtenues en dépression pour les divers états de saturation. Théoriquement de 0,56 il est illustré à la figure1.

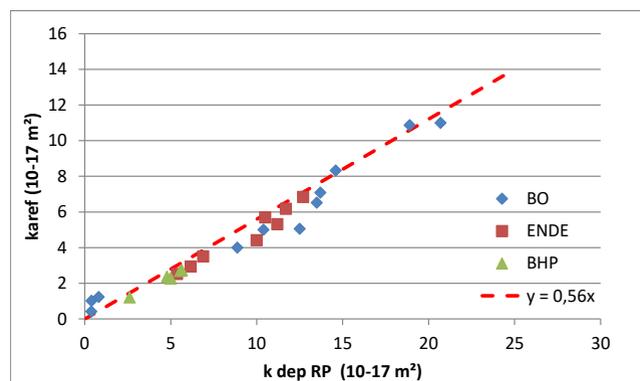


FIGURE 1. Perméabilité apparente au CEMBUREAU (karef) vs perméabilité apparente en dépression régime permanent P=15mbar

- Mesure en dépression : Régime permanent et régime transitoire après un $t_v = \text{TERPE}$

La Figure 2-a représente les perméabilités apparentes en 'dépression / régime permanent' en fonction des perméabilités obtenues en 'dépression / régime transitoire'. Le graphique montre la corrélation assez importante entre ces deux techniques. Les points sont quasiment tous situés sur la première bissectrice. Le régime permanent est vérifié par mesure du débit en parallèle avant arrêt du vide et analyse de la remontée de pression.

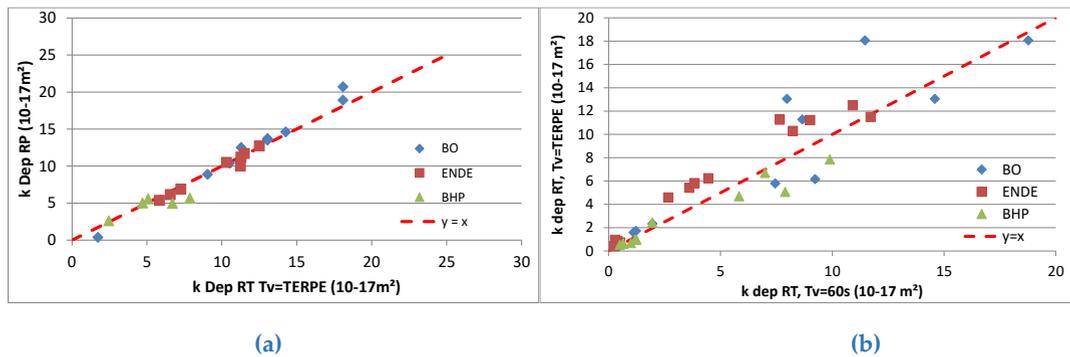


FIGURE 2. Perméabilité apparente en dépression régime permanent en fonction de la mesure en dépression régime transitoire avec $t_v = \text{TERPE}$ (a) et perméabilité calculée en dépression régime transitoire avec $t_v = \text{TERPE}$ en fonction des mesures obtenues pour un temps de vide de 60 s (b)

- Mesure en dépression : Régime transitoire après un $t_v = \text{TERPE}$ et un $t_v = 60\text{s}$

La Figure 2-b représente les valeurs de perméabilité calculées en dépression régime transitoire après un temps de vide égal au temps d'établissement du régime permanent en fonction des mesures obtenues pour un temps de vide t_v de 60 s. La courbe met en évidence certains écarts dont les plus importants se situent à 50% de la première bissectrice. Quand le séchage crée de la percolation supplémentaire, la différence de zone d'analyse en fonction de la durée de vide conduit à la mise en avant d'hétérogénéités locales qui peuvent créer de la dispersion.

- Mesure avec le TPT Torrent et en dépression Régime transitoire après un $t_v = 60\text{s}$

La dernière étape est de confronter la technique TPT de site à la plus proche en laboratoire c'est à dire en régime transitoire après un temps de vide de 60 s. La perméabilité estimée à partir du TPT (k_{TPT}) considère les vitesses de remontée de pression fournies par l'appareil TPT couplées aux équations proposées dans la thèse de Sogbossi. On obtient des perméabilités comparables à celles en dépression et régime transitoire avec une tendance à la surestimation. Outre le fait que la zone d'analyse n'est pas la même entre le Torrent (cylindre de 5 cm) et le CEMBUREAU (15 cm), ce qui peut conduire à des erreurs de représentativité liées à d'éventuelles hétérogénéités (taille des gros granulats...), la prise en compte de l'évolution de la pression dans l'épaisseur des échantillons en régime transitoire reste difficilement réalisable. Des flux parasites latéraux peuvent également intervenir dans la mesure TPT et impacter les écoulements. En première approche nous représentons à la figure 4, une correction de k_{TPT} par un facteur 0,6 pour prendre en compte cet excès de flux. Cette modification conduit à un nuage de points autour de la première bissectrice, les plus gros écarts observés dépassent légèrement les 50%, dispersion pouvant être observée en perméabilité sur deux éprouvettes issues d'une même gâchée de béton.

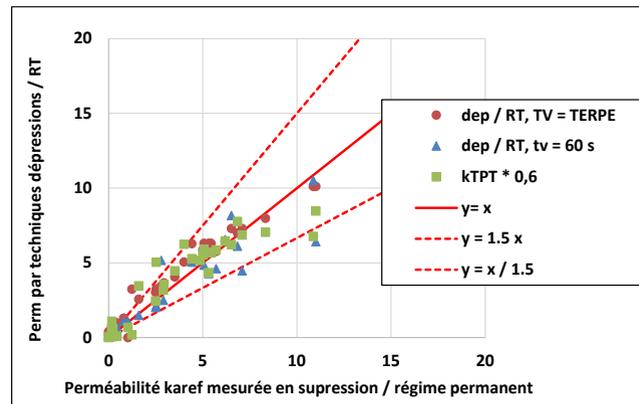


FIGURE 4. Perméabilités corrigées obtenues par les différentes techniques de mesure en dépression / régime transitoire en fonction de la perméabilité de référence obtenue en surpression / régime permanent

IV. BILAN, CONCLUSION

La figure 4 dresse un bilan de l'étude et représente la confrontation des perméabilités apparentes obtenues par différentes techniques en régime transitoire, et corrigées des effets de pressions et de profondeurs investiguées, à la perméabilité de référence désignée par la norme, obtenue en surpression et régime permanent. Même si la correction apportée à la mesure TPT doit être validée par ailleurs, les résultats sont plutôt encourageants et laissent entrevoir de nouvelles exploitations de la mesure *in situ* sur des épaisseurs plus importantes : cloches de dimensions variables, temps de mesure plus longs, prise en compte du profil de saturation.

V. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ANR ENDE pour son soutien financier ainsi que Vincent Garnier du LMA Aix Marseille pour le pilotage du projet

REFERENCES

- Kollek, J. J. (1989). The determination of the permeability of concrete to oxygen by the Cembureau method-a recommendation. *Materials and structures*, vol. 22, n°3, p. 225–230. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02472192>
- Sogbossi, H., Verdier, J. & Multon, S (2019). New approach for the measurement of gas permeability and porosity accessible to gas in vacuum and under pressure. *Cement and Concrete Composites*, Elsevier, 2019, 103, pp.59-70. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.04.032>
- Torrent, R. J. (1992). A two-chamber vacuum cell for measuring the coefficient of permeability to air of the concrete cover on site. *Materials and Structures*, vol. 25, n°6, p. 358–365. <https://doi.org/10.1007/BF02472595>