

Effet de voûte pour la stabilité hydraulique des fonds de fouille

Vault effect for the hydraulic stability of an excavation

Jean-Pierre MAGNAN¹, Grégory MEYER^{1,*}

¹ EGIS Géotechnique, Guyancourt, France

*gregory.meyer@egis-group.com

RÉSUMÉ : L'excavation des terrains pour l'exécution d'ouvrages profonds doit tenir compte de la pression des eaux souterraines, qui peut provoquer le soulèvement du fond de fouille. Parmi les techniques mises en œuvre, à défaut d'un rabattement de la nappe pour diminuer la pression de l'eau sous le fond de fouille, qui peut s'avérer environnementalement problématique, l'utilisation de l'effet de voûte dans une couche peu perméable et suffisamment résistante permet de reporter la pression de l'eau déstabilisatrice sur les bords latéraux de la fouille. Cet article décrit la méthode de calcul pour les voûtes cylindriques et sphériques, son développement mathématique et son application à un cas concret sur la gare de Mairie d'Aubervilliers de la ligne 15 Est du Grand Paris Express, qui a permis de s'affranchir du pompage de plusieurs milliers de mètres cubes d'eau. Les équations sont basées sur la formulation des efforts dans un tube creux, puis une coupole, en introduisant la résistance mécanique interne du matériau.

ABSTRACT: Excavation of ground for deep construction works must consider groundwater pressure, which can cause the bottom of the excavation to heave. Among the techniques used, in the absence of groundwater lowering to reduce the water pressure under the bottom of the excavation, which can be environmentally problematic, the use of the vault effect in a low-permeability and sufficiently resistant layer allows the destabilizing water pressure to be transferred to the side edges of the excavation. This article describes the calculation method for cylindrical and spherical vaults, its origin, and its application to a specific case at the Mairie d'Aubervilliers station on line 15 East of the Grand Paris Express, which made it possible to avoid pumping several thousand cubic meters of water. The equations are based on the formulation of forces in a hollow tube, then a dome, introducing the internal resistance of the material.

Mots-clés: effet voûte ; UPL ; stabilité.

1 INTRODUCTION

Dans certaines situations, le fond d'une fouille peut être instable sous l'effet des pressions d'eau. La présence d'une couche de terrain peu perméable et résistante en dessous du fond de fouille peut assurer la stabilité au soulèvement du terrain par mobilisation d'un effet de voûte, qui reporte les efforts de soulèvement sur les parois latérales de la fouille.

La position de la voûte, sa géométrie et son épaisseur ne sont *a priori* pas connues. La partie du bouchon où se développe la voûte (appelée arc actif ou voûte active) transfère aux parois latérales la partie des pressions d'eau qui n'est pas équilibrée par la pesanteur. L'effort sur les appuis croît avec la pression à équilibrer.

Dans le cas d'une excavation de grande longueur, la forme de la voûte peut être assimilée à une section cylindrique d'épaisseur e , de rayon intérieur R_0 et de rayon extérieur R_1 (Figure 1). Pour une fouille cylindrique, la forme de la voûte devient sphérique. Le

cas d'une voûte cylindrique est traité en premier, puis les calculs sont développés pour une voûte sphérique.

L'ouvrage étudié concerne le fond de fouille de la gare Mairie d'Aubervilliers (MAU) sur la ligne 15 du Grand Paris Express (GPE). Cette ligne circulaire autour de la capitale, d'une longueur de 75 km, est conçue pour transporter 1,5 million de passagers par jour. Les travaux sur cette ligne sont divisés en plusieurs sections, dont la section 15E-2, qui comprend la construction d'un tunnel de 5,5 km, de trois nouvelles gares (dont MAU) et de quatre puits de service (pour la ventilation et l'évacuation des passagers), actuellement en cours de construction.

La pression d'eau sous la dalle de Calcaire Grossier (avec une base plus glauconieuse réputée moins perméable) est de l'ordre de 391 kPa (par rapport au niveau d'équilibre attendu à l'extérieur de la fouille).

Le poids des terres entre le fond de fouille et la surface d'application de la pression hydraulique n'est pas suffisant pour compenser la poussée ascendante (246 kPa avec considération d'un coefficient de sécurité sur les poids volumiques). La présente étude

s'intéresse à l'excédent de pression non équilibré par la force de pesanteur et à sa reprise par frottement le long des parois moulées. Compte tenu de la largeur $2B$ de la gare (entre 20,3 et 31,3m), il est nécessaire de vérifier si un effet de voûte peut se développer dans la dalle de calcaire pour reporter les efforts du centre de la fouille vers les bords. Dans le cas contraire, même si le frottement de la dalle sur la paroi était suffisant pour stabiliser les bords de l'excavation, cela pourrait ne pas être le cas au milieu de la fouille et provoquer une rupture du fond de fouille d'origine hydraulique.

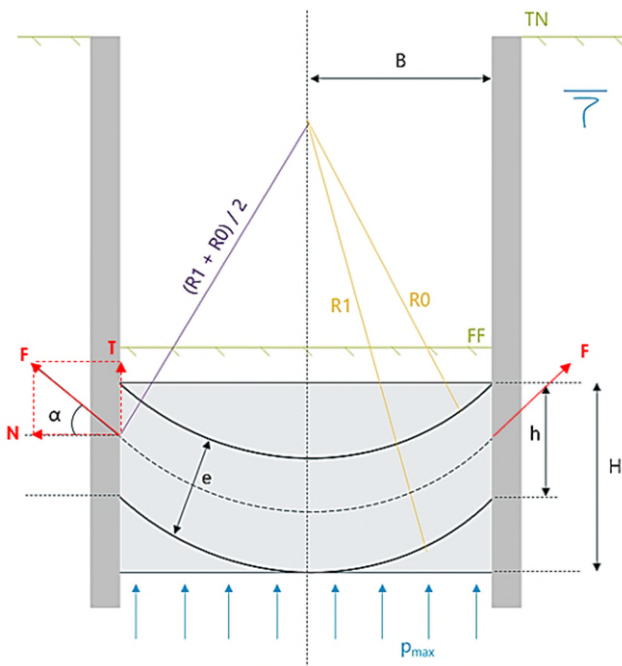


Figure 1. Schéma de principe de l'effet voûte étudié

2 CARACTÉRISATION DU MASSIF CALCAIRE

La géologie en Ile-de-France est de type sédimentaire avec une majorité de sols déposés dans le Bassin Parisien. La couche de Calcaire Grossier est assez atypique et est parfois constituée d'un matériau rocheux tendre à friable, quelquefois coquillé. Sur l'ouvrage étudié, cette couche a été reconnue par sondages carottés, pressiométriques, résistances à la compression (en laboratoire) et tomographie sismique entre forages. Cela a conduit à retenir une résistance à la compression de 19,2 MPa dans le massif sain (c'est-à-dire sans tenir compte de la fracturation) et 3,4 MPa à partir d'une analyse menée selon la mécanique des roches (type RMR Rock Mass Rating et GSI Geological Strength Index), basée sur le RQD (Rock Quality Designation), l'observation des carottes (figure 2) et les mesures géophysiques. Les vitesses sismiques de compression V_P mesurées par

tomographie sismique se situent aux alentours de 3300 m/s en moyenne, à comparer à la vitesse de 6500 m/s proposée par l'AFTES (2003) dans le rocher sain. La caractérisation de la perméabilité du Calcaire Grossier inférieur n'a pas été mesurée compte tenu de l'épaisseur relativement faible de cette couche, mais il est admis régionalement qu'elle constitue un écran moins perméable que l'encaissant sus-jacent, d'où les problèmes de pressions hydrostatiques qui s'accumulent à sa base.



Figure 2. Photographie de carottes dans le Calcaire Grossier (MAU-EXE-SC08819).

3 CAS DES VOÛTES CYLINDRIQUES

La ligne de pression représentée en tireté sur la figure 1 matérialise le transfert des forces vers l'extérieur de l'arc. La pression qui doit être reprise par l'effet de voûte n'est pas égale à la pression de l'eau sous le bouchon peu perméable. Elle est égale à cette pression moins le poids des matériaux sus-jacents. On doit déterminer par le calcul la force F et ses projections T et N appliquées sur les bords de la fouille, pour vérifier que la résistance des parois (résistance horizontale et résistance au cisaillement vertical) est suffisante et que la contrainte dans la voûte reste inférieure à la résistance à la compression du matériau (à laquelle on doit appliquer un coefficient de sécurité).

La profondeur de la voûte n'a pas d'effet sur sa résistance. En revanche, si on l'abaisse dans le terrain, le poids des sols augmente plus vite que la pression de l'eau, donc la situation la plus défavorable est celle où la voûte est proche de la surface du fond de fouille.

La force F dans la voûte est déduite de la formule de calcul des tubes d'épaisseur e et de rayon moyen R_{moyen} , soumis à une pression interne p_i et une pression externe p_e , qui est utilisée notamment pour l'essai pressiométrique et pour le calcul approché des barrages-voûtes (CFBR, 2018) :

$$F = e \sigma_{\theta\theta} = (p_i - p_e) R_{\text{moyen}} \quad (1)$$

La contrainte exercée dans la voûte par le chargement du tube (chargement extérieur p_e égal à

l'excédent de pression interstitielle, le chargement intérieur p_i étant alors nul) est donnée par la formule (2), et doit être inférieure à la résistance à la compression du matériau R_c , divisée par un coefficient de sécurité γ_{Rc} . On en déduit ainsi l'épaisseur minimale e de la voûte qui permet d'assurer sa résistance :

$$\sigma_{max} = \frac{p_e R}{e} < \frac{R_c}{\gamma_{Rc}} \text{ soit } e > \frac{\gamma_{Rc} p_e R}{R_c} \quad (2)$$

Pour un cylindre tronqué par la présence de parois (figure 3), l'angle d'incidence α correspond à l'inclinaison de la force F sur l'horizontale (égale à l'angle du rayon sur la verticale à partir du centre du cercle). L'angle α est *a priori* quelconque. Il conditionne le rayon R et les valeurs de la force F (et ses projections N et T). Selon la résistance à la compression du terrain, l'épaisseur e nécessaire pour assurer la stabilité de la voûte pourra ou non être obtenue dans le bouchon. On définit également le paramètre auxiliaire H , qui représente la hauteur de l'arc par rapport à sa corde.

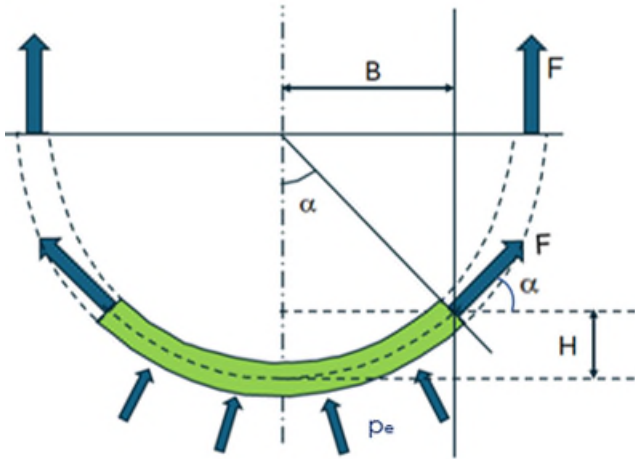


Figure 3. Voûte tronquée par une paroi

Pour un cercle de rayon R (figure 4), on peut écrire les relations $B = R \sin \alpha$ et $H = R (1 - \cos \alpha)$. À partir des relations $N = F \cos \alpha$, $T = F \sin \alpha$ et $F = p_e R$ (équation (1)), on détermine $N = p_e B / \tan \alpha$ et $T = p_e B$. L'épaisseur de la voûte doit donc vérifier la condition suivante, fonction de la résistance à la compression de la voûte, déduite de l'équation (2) :

$$e > \frac{\gamma_{Rc} p_e B}{R_c \sin \alpha} \quad (3)$$

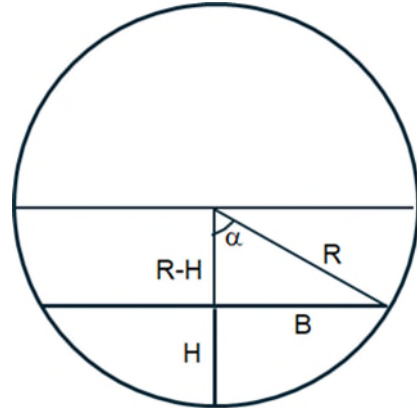


Figure 4. Considérations géométriques pour un cercle de rayon R

Une deuxième condition concerne le frottement de la voûte sur l'appui latéral, qui doit être inférieure à la résistance au cisaillement dont nous admettons qu'elle est égale à la moitié de la résistance à la compression simple, soit $R_c / 2$, avec le même facteur partiel γ_{Rc} . On écrit cette condition sous la forme :

$$\tau_{max} = \frac{T}{e / \cos \alpha} = \frac{p_e B \cos \alpha}{e} < \frac{R_c}{2 \gamma_{Rc}} \quad (4a)$$

$$\text{soit } e > \frac{2 \gamma_{Rc} p_e B \cos \alpha}{R_c} \quad (4b)$$

La première condition est toujours la plus restrictive. La hauteur minimale du bouchon où se développera l'effet de voûte est égale à $H + e$, soit :

$$H + e = B \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} + e \quad (5)$$

Si l'on choisit de minimiser l'épaisseur totale occupée par la voûte, il faut trouver l'angle α qui minimise la valeur de $H + e$ et donc la fonction $f(\alpha)$ à partir de (3) :

$$f(\alpha) = \frac{H + e}{B} = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha} + \frac{\gamma_{Rc} p_e}{R_c \sin \alpha} \quad (6)$$

La dérivée de cette fonction est égale à :

$$\begin{aligned} \frac{df(\alpha)}{d\alpha} &= \frac{\sin^2 \alpha - [(1 + \gamma_{Rc} p_e / R_c)] \cos \alpha + \cos^2 \alpha}{\sin^2 \alpha} \\ &= \frac{1 - (1 + \gamma_{Rc} p_e / R_c) \cos \alpha}{\sin^2 \alpha} \end{aligned}$$

Elle s'annule pour :

$$\alpha = \arccos\left(\frac{1}{1+\gamma_{Rc}p_e/R_c}\right) \quad (7)$$

Des valeurs de α , H/B , e/B et $(H+e)/B$ sont données dans le Tableau 1.

Tableau 1. Valeurs caractéristiques pour les voûtes cylindriques

$\gamma_{Rc} p_e / R_c$	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45
α min (degrés)	17,75	24,62	29,59	33,56	36,87	39,72	42,21	44,42	46,40
cos α	0,952	0,909	0,870	0,833	0,800	0,769	0,741	0,714	0,690
sin α	0,305	0,417	0,494	0,553	0,600	0,639	0,672	0,700	0,724
H/B	0,156	0,218	0,264	0,302	0,333	0,361	0,386	0,408	0,429
e/B	0,164	0,240	0,304	0,362	0,417	0,470	0,521	0,572	0,621
$(H+e)/B$	0,320	0,458	0,568	0,663	0,750	0,831	0,907	0,980	1,050

Les paramètres utilisés pour le calcul de la voûte doivent respecter les règles suivantes :

- La pression exercée par l'eau sous le bouchon est calculée à partir des études d'écoulements dans le terrain. On lui enlève la contrainte verticale totale due au poids des terres au-dessus du bouchon et au poids du bouchon puisque l'équilibre est étudié à sa base. La norme NF P 94-282 (AFNOR, 2009) demande de pénaliser les forces résistantes (les poids de terrain) d'un facteur 0,90 (voire 0,95 en phase travaux) et de conserver les valeurs des forces déstabilisatrices (pression d'eau) sans pondération. La pression p_e est donc la différence entre $0,90 s_{vo}$ (ou $0,95 s_{vo}$) et la pression u de l'eau au niveau de la base du bouchon, ou de la base de la voûte (à vérifier en fin de calcul) ;
- Les forces de résistance mécanique sont la résistance à la compression R_c du matériau du bouchon et la résistance au cisaillement au contact entre la voûte et les parois latérales, que l'on rattache aussi à la résistance à la compression simple R_c . Le facteur de réduction issu des normes est égal à 1,4 sur ces grandeurs ;
- Si l'on veut aller au bout des inconnues ou incertitudes, on peut aussi tenir compte des erreurs de positionnement des structures, qui peuvent être importantes en cas de déviation des outils de forage. Cette incertitude est portée par la demi-largeur B de l'excavation ;
- On admet que la valeur de la résistance à la compression du matériau du bouchon a été évaluée avec prudence et représente son comportement réel incluant la fracturation du massif.

4 APPLICATION À LA GARE MAU

En utilisant les hypothèses et formules décrites précédemment, avec $p_e = 246$ kPa, $R_c = 3,4$ MPa et $\gamma_{Rc} = 1,4$, on obtient $\gamma_{Rc} p_e / R_c = 0,101$, un angle d'incidence minimal de $\alpha = 24,77$ degrés et les paramètres $H/B = 0,220$ et $e/B = 0,242$.

Pour la partie étroite de la gare ($B = 10,15$ m), on trouve une voûte d'épaisseur $e = 10,15 \times 0,242 = 2,45$ m avec une hauteur totale $H + e = 10,15 \cdot (0,220 + 0,242) = 4,68$ m.

Pour la partie élargie de la gare ($B = 15,65$ m), on obtient une voûte d'épaisseur $e = 15,65 \times 0,242 = 3,78$ m et une hauteur totale $H + e = 7,22$ m.

Les voûtes calculées ont donc une extension limitée par rapport à l'épaisseur du bouchon de Calcaire Grossier (16,25m en moyenne), ce qui valide cette solution.

5 AUTRES VÉRIFICATIONS

Les développements précédents ont pour objectif de déterminer l'épaisseur de voûte nécessaire pour justifier la résistance à la compression du bouchon selon sa poussée induite horizontale (équation (3)) puis par suite équation (7)) et la résistance au cisaillement sur les parois du bouchon (équation (4b) non dimensionnante). Il est également nécessaire de vérifier que la contrainte horizontale effective mobilisable en butée est suffisante pour reprendre la réaction normale sur l'écran, c'est-à-dire que $N / (H + e) < \sigma'_H$ auquel un coefficient de sécurité de 1,5 ou 1,9 normatif est appliqué.

Enfin, l'effort de la voûte sur les parois doit être intégré aux calculs de stabilité de l'écran dans les calculs aux coefficients de réaction ou numériques.

6 MODÉLISATIONS NUMÉRIQUES

Une modélisation numérique aux éléments finis en 2D a été menée en incrémentant la poussée hydrostatique sous la base du bouchon (en rose sur la figure 5). L'effet voûte est alors visible en regardant l'orientation des contraintes effectives principales, en estimant une géométrie où les vecteurs contraintes restent colinéaires.

L'angle d'incidence de cette voûte est d'environ 26 degrés pour une épaisseur de 5,3m pour une largeur $2B = 20,3$ m ce qui est tout à fait comparable aux calculs analytiques réalisés précédemment.

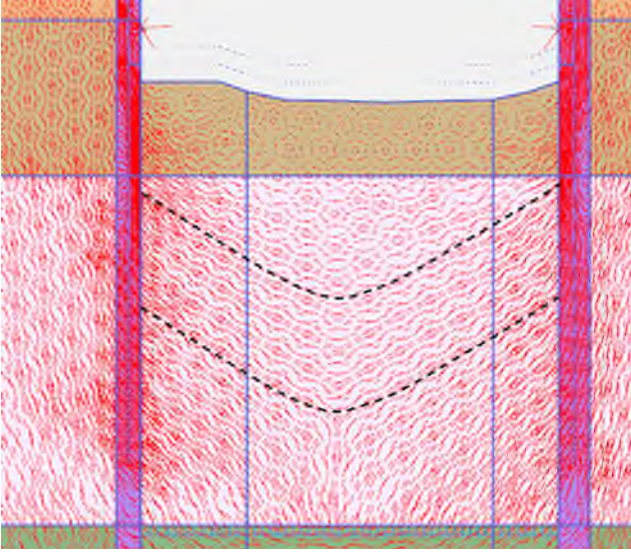


Figure 5. Modélisation numérique de l'effet voûte (orientation des contraintes)

7 CAS DES VOÛTES SPHÉRIQUES (COUPOLES)

Le cas des voûtes sphériques est traité comme celui des voûtes cylindriques. Elles concernent typiquement les fouilles circulaires. On considère que la partie de la voûte qui reprend les pressions d'eau a la géométrie indiquée sur la figure 6.

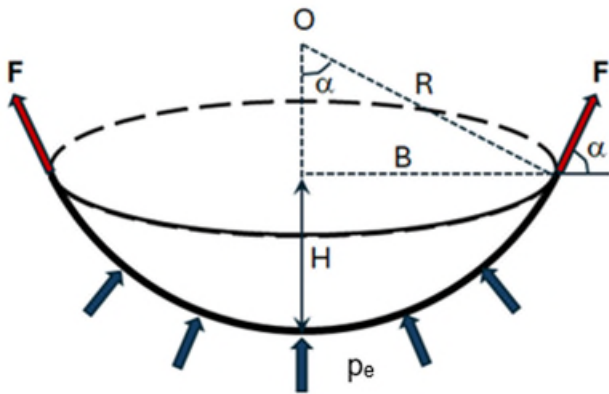


Figure 6. Géométrie de la calotte sphérique

La contrainte s dans la sphère d'épaisseur e est liée à la pression p_e par la relation :

$$F = e \sigma = \frac{1}{2} R p_e \quad (8)$$

On note que la pression dans la calotte sphérique est la moitié de celle dans la voûte cylindrique. Les relations géométriques sont les mêmes que pour la voûte cylindrique. On obtient donc : $N = 0,5 p_e R \cos \alpha = 0,5 p_e B / \tan \alpha$, et $T = 0,5 p_e R \sin \alpha = p_e B / 2$.

Il faut que l'épaisseur e de la voûte soit suffisante pour que la contrainte σ_{\max} soit supportable (inférieure à la résistance à la compression simple du matériau de la voûte, supposé isotrope). Avec les notations définies précédemment, la résistance à la compression mobilisable et le frottement du bord de la voûte fournissent les conditions suivantes sur l'épaisseur de la voûte :

$$e > \frac{\gamma_{Rc} p_e R}{2 R_c} \quad (9a)$$

$$\text{et } e > \frac{\gamma_{Rc} p_e R \cos \alpha \sin \alpha}{R_c} \quad (9b)$$

Le premier critère est toujours plus exigeant que le second. Si l'on choisit de minimiser l'épaisseur totale occupée par la voûte dans le bouchon $(H+e)$, la dérivée de la fonction $f(\alpha) = (H+e)/B$ s'annule pour :

$$\alpha = \arccos \left(\frac{1}{1 + \gamma_{Rc} p_e / 2 R_c} \right) \quad (10)$$

Les valeurs de α , H/B , e/B et $(H+e)/B$ sont identiques aux valeurs de la voûte cylindrique (Tableau 1) si l'on remplace la première ligne $(\gamma_{Rc} p_e / R_c)$ par $(\gamma_{Rc} p_e / 2 R_c)$. Le développement qui en découle montre que, toutes choses égales par ailleurs, une voûte sphérique est environ 1,4 fois plus fine qu'une voûte cylindrique pour assurer la stabilité d'une fouille de même largeur $2B$.

8 CONCLUSIONS

Lorsqu'un fond de fouille n'est pas stable vis-à-vis des pressions hydrostatiques qui s'appliquent sous un horizon moins perméable, faire travailler une couche indurée en voûte peut permettre de s'affranchir d'un pompage lourd et incertain de la nappe sous-jacente, ou du frettage des terrains. L'intérêt d'utiliser la résistance mécanique d'un bouchon de matériau rocheux a été démontrée dans le présent article, avec une mise en œuvre sur un exemple concret du Grand Paris Express. De nombreux documents traitent des voûtes maçonnées dans la construction, mais le développement mathématique proposé permet une vérification simple et rapide de cette solution dans le domaine de la géotechnique.

Les travaux de terrassement de la gare étudiée dans cet article sont prévus pour 2026-2027, ce qui permettra de conforter les calculs mis en avant. L'auscultation topographique du fond de fouille ainsi que la mise en œuvre d'extrusomètres dans le Calcaire Grossier permettrait de contrôler le comportement de la dalle étudiée.

Les auteurs tiennent à remercier le Groupement IRIS dans lequel s'inscrit cette étude, pour leur collaboration proactive.

9 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AFNOR, NF P 94-282 (2009). Justification des ouvrages géotechniques – norme d'application nationale de l'Eurocode 7 – Ouvrages de soutènement.

AFTES (2003). Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains – GT1R1F1.

Recommandations provisoires pour la justification du comportement des barrages-voûtes (2018). Guide CFBR (Comité Français des barrages et réservoirs).