

Prise en compte de l'eau souterraine dans les normes

1 Introduction

1.1 Contexte

Près de dix années après leur parution (2003), les normes SIA 260 à 267 [1 à 4] ont été soumises à une révision partielle. Les versions révisées des normes SIA 267 Géotechnique [5] et SIA 267/1 Géotechnique – spécifications complémentaires [6] sont en vigueur depuis août 2013. La version révisée de la norme SIA 261 Actions sur les structures porteuses [7] est quant à elle d'application depuis juillet 2014. Au jour d'aujourd'hui (octobre 2014), seule la version allemande de ces documents normatifs est parue ; leur traduction française est en cours de finalisation. Pour cette raison, les articles cités dans ce texte pourraient quelque peu différer de leur formulation définitive dans la version française des normes.

Dans le cadre des révisions des normes SIA 261:2003 [2] et 267:2003 [3], une attention particulière a été portée à la prise en compte de l'eau souterraine et de ses actions sur les ouvrages. En effet, les membres de la commission Géotechnique CN 267 de la SIA ont constaté que des ingénieurs ne considéraient pas correctement les aquifères présents dans le terrain lors de l'étude et la réalisation de projets, avec des conséquences potentielles sur l'analyse structurale et le dimensionnement des ouvrages.

Lors de la révision de la SIA 267:2003, la question s'est posée de la rendre compatible avec l'Eurocode 7 Géotechnique [8]. La commission de norme géotechnique de la SIA a cependant renoncé à cet objectif, le travail associé sortant du cadre d'une révision partielle et l'Eurocode 7 faisant lui-même l'objet d'une révision (comprenant potentiellement une modification des formats de vérification).

Après énoncé des principaux problèmes de prise en compte de l'eau souterraine relevés lors de l'utilisation des normes SIA 261:2003 [2] et 267:2003 [3], ce document présente de façon synthétique les plus importantes modifications relatives à l'eau apportées dans la SIA 267:2013 [5] et dans la section 4 de la SIA 261:2014 [7]. Le contenu n'est donc pas exhaustif et le lecteur se référera aux documents normatifs pour prendre connaissance de l'ensemble des révisions faites.

1.2 Problèmes relevés lors de l'utilisation des normes

Une première source de problèmes réside dans l'utilisation et le mélange de termes inappropriés, ce qui se traduit par des formulations d'articles peu claires, voire erronées, en termes de mécanique des sols. En Français, il y a notamment des amalgames entre pression hydraulique, pression hydrostatique, résultante des pressions, force de percolation. A titre d'exemple, les pressions d'eau dans les terrains étaient systématiquement qualifiées d'hydrostatiques dans la version française de la SIA 267:2003 – au lieu de pression hydraulique -, comme si l'eau souterraine était toujours au repos (i.e. sans écoulement) ! En Allemand également, les termes « Wasserdruck, Auftrieb und Gesamtwasserdruck » ne sont pas toujours utilisés à bon escient.

Ces questions de vocabulaire peuvent être à l'origine d'une confusion entre les deux méthodes permettant d'évaluer les actions dues à l'eau sur/dans un volume de sol, à savoir :

- en tant que pressions d'eau s'exerçant sur les faces de ce volume, combinées avec le poids total du volume de sol considéré ;
- en tant que pression de courant (ou d'écoulement) dans le volume de sol, en combinaison avec le poids déjaugé de celui-ci.

Une ambiguïté peut également naître de l'utilisation d'une pression hydraulique résultante sur les parois de soutènement (e.g. Tableau 3 de la SIA 263:2003 et Figure 10 de la SIA 267:2003), ceci lors du calcul des contraintes effectives dans le sol de part et d'autre de la paroi.

A côté de ces questions d'ordre terminologique, l'influence des eaux souterraines sur les projets n'est pas suffisamment comprise et prise en considération [9, 10]. Au stade des reconnaissances, trop peu d'attention est portée à l'eau dans les sols et aux facteurs influençant son action sur les ouvrages : e.g. l'agencement des couches de sol, leur épaisseur, leur perméabilité, leur caractère anisotrope, ainsi que l'existence possible de plusieurs nappes avec différents potentiels. Il peut en résulter un modèle hydrogéologique simpliste

et non représentatif de la complexité de la situation, se traduisant par une mauvaise évaluation des actions sur les ouvrages et dans le terrain et dès lors potentiellement par des instabilités d'origine hydraulique (soulèvement de fond de fouille, renard hydraulique).

Le tableau 3 de la SIA 263:2003 et les articles associés présentent des cas simplifiés comme des situations usuellement rencontrées et couramment admises. En réalité, il s'agit de cas idéalisés relatifs à certaines conditions particulières ; de plus, la répartition de la pression hydraulique présentée pour le cas 4 du tableau 3 n'est pas du côté de la sécurité, en particulier pour la vérification des instabilités d'origine hydraulique.

Finalement, parmi les autres problèmes avérés et fréquents en pratique, on peut relever [9] :

- une mauvaise prise en compte et modélisation des instabilités d'origine hydraulique, en particulier le renard hydraulique ;
- le renoncement inapproprié à des solutions de rabattement des eaux souterraines ;
- la non-considération que l'écoulement d'eau diminue la résistance passive devant les parois de soutènement [10].

2 Modifications dans la section 4.4 de la SIA 261

La Norme SIA 261 faisant l'objet d'une révision partielle, une refonte complète de sa section 4.4 consacrée à la pression hydraulique n'était pas à l'ordre du jour. La structure de cette section a été conservée et les modifications ont porté sur les articles qui pouvaient manifestement poser des problèmes pour le dimensionnement des ouvrages.

Le chiffre 4.4.1.2 précisant les facteurs influençant l'action de l'eau sur les ouvrages a été réécrit, en insistant sur l'agencement des couches de sol et leur perméabilité ainsi que l'existence possible de plusieurs nappes avec différentes charges hydrauliques. Il est formulé comme suit : Pour déterminer les actions dues aux eaux souterraines, on prendra particulièrement en considération :

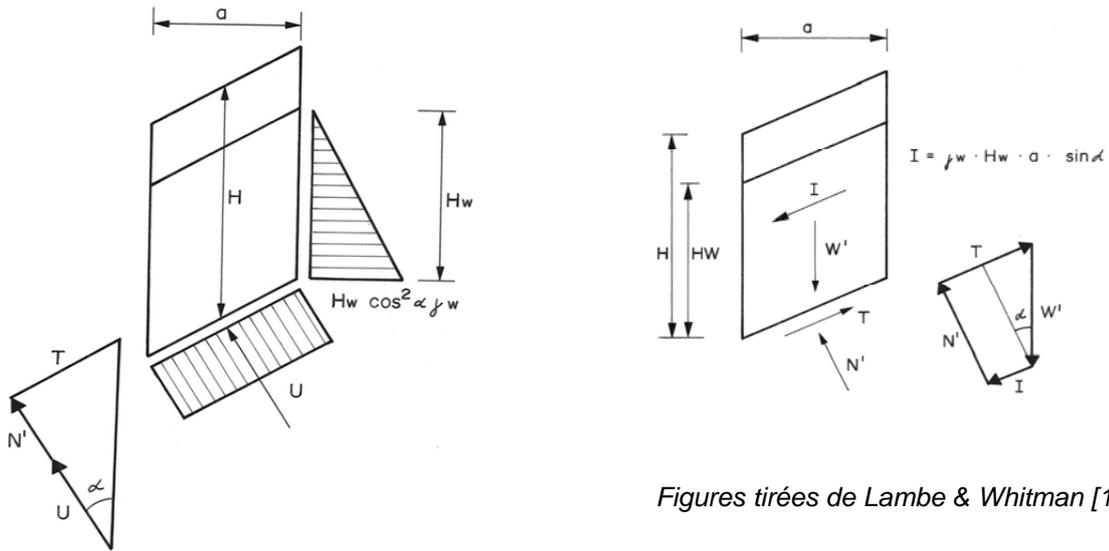
- la stratigraphie ainsi que la perméabilité des différentes couches
- la position des aquifères et leurs conditions de pression
- les effets de dispositifs constructifs tels que barrières, introductions d'eau ou drainages, en tenant compte des cas extrêmes
- Le refoulement des eaux souterraines dû à un ouvrage
- l'accumulation d'eaux souterraines dans un remblai plus perméable que le sol de fondation en place
- les modifications du régime des eaux souterraines consécutives au défrichage et à la réalisation de nouvelles plantations
- les effets des influences climatiques telles que précipitations ou gel sur le régime des eaux souterraines
- l'apport ultérieur d'eau, par exemple à la suite d'une crue, d'une inondation ou d'une rupture de conduite.

Pour éviter une confusion entre les deux méthodes envisageables pour évaluer les actions dues à l'eau (Figure 1), le principe de calcul est énoncé dans le chiffre 4.4.1.3 : L'action de l'eau peut être prise en compte de deux manières:

- en tant que pression d'eau, en combinaison avec le poids total du sol ;
- en tant que force de percolation, en combinaison avec le poids déjaugé du sol.

Sous le chiffre 4.4.3 traitant de la répartition de la pression hydraulique sur des ouvrages, 3 modifications méritent d'être soulignées :

1. Il est fait mention de l'importance de l'agencement des couches et du caractère anisotrope de la perméabilité dans l'estimation de la pression hydraulique (chiffre 4.4.3.1) : « L'hétérogénéité et l'anisotropie ($k_h > k_v$) des couches ainsi que la stratification du terrain influencent les pressions hydrauliques dans le sol ».
2. Il est stipulé que les divers cas présentés au tableau 3 sont des distributions simplifiées correspondant à des situations particulières (chiffre 4.4.3.2) : « La répartition de la pression hydraulique sera déterminée en tenant compte des indications du chiffre 4.4.1.2. Dans les cas idéalisés décrits dans le tableau 3, on peut appliquer la répartition simplifiée de la pression hydraulique qui correspond à la situation considérée ».
3. L'utilisation d'une pression hydraulique résultante sur les parois de soutènement est supprimée (ancien chiffre 4.4.3.3).



Figures tirées de Lambe & Whitman [11]

Calcul avec

- Poids volumique saturé
- Pressions d'eau

Calcul avec

- Poids volumique déjaugé
- Force de percolation

Figure 1 : Les deux approches de calcul envisageables pour évaluer les actions dues à l'eau sur/dans un volume de sol.

Cas	1	2	3	4
Ouvrage	Bâtiment dans la nappe phréatique	Paroi de soutènement dans la nappe phréatique	Paroi de soutènement dans la nappe phréatique	Paroi de soutènement dans la nappe phréatique
Sol de fondation	Quelconque	Pied de paroi encastré dans une couche imperméable de grande épaisseur	Homogène et anisotrope ($k_h > k_v$) ou hétérogène avec une couche perméable au pied de la paroi	Homogène et isotrope (cas rare)
Écoulement idéalisé	Pas d'écoulement	Pas d'écoulement dans la couche perméable: $i = 0$ Écoulement dans la couche imperméable située au pied de paroi.	Perte de charge uniquement à l'intérieur de la fouille : $i = (h_w + h_{w1}) / (t - h_{w1})$	Perte de charge constante le long des deux faces de la paroi : $i = (h_w + h_{w1}) / (h_w + 2t - h_{w1})$
Répartition idéalisée de la pression hydraulique				
Pression hydraulique maximale	$w_k = \gamma_{wk} h_w$	$w_{k/I} = \gamma_{wk} (t - h_{w1})$ $w_{k/II} = \gamma_{wk} (h_w + t)$	$w_{k/II} = \gamma_{wk} (h_w + t)$	$w_{k/III} = (1 + i) \gamma_{wk} (t - h_{w1})$

Figure 2 : Répartitions simplifiées de la pression hydraulique considérées dans le nouveau tableau 3 de la SIA 261:2014.

Le Tableau 3 de la SIA 261 (Figure 2) a subi diverses modifications :

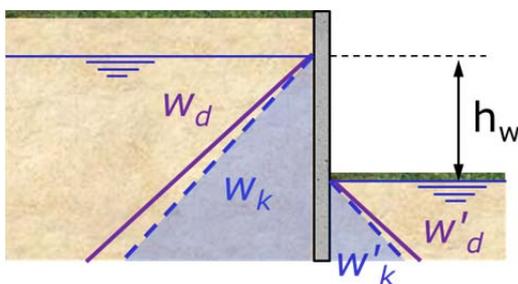
- Les hypothèses des divers cas sont précisées ;
- Le caractère idéalisé de l'écoulement et de la répartition de la pression hydraulique est mentionné ;
- Les pressions hydrauliques sur la paroi sont celles qui agissent de part et d'autre de celle-ci ;
- Le niveau d'eau à l'intérieur de la fouille ne coïncide plus avec le niveau du fond de fouille ;
- Le cas 4 relatif à un sol homogène et isotrope est indiqué comme rare. Il est bon de rappeler ici que l'idéalisation considérée pour les pressions s'exerçant sur l'écran n'est pas du côté de la sécurité.

3 Modifications dans la SIA 267

Afin que suffisamment d'attention soit portée à l'eau souterraine déjà au stade des reconnaissances, une nouvelle section intitulée « Eau dans le terrain de fondation » (Chiffre 3.4) a été ajoutée. Elle spécifie les exigences en termes de reconnaissances/essais :

- description des nappes aquifères et des conditions de pression ;
- description des écoulements (direction et gradient) ;
- exploitabilité des nappes souterraines ;
- possibles modifications de pressions interstitielles (causes naturelles ou anthropiques) ;
- qualité de l'eau (agressivité, caractéristiques chimiques), au besoin.

En ce qui concerne la terminologie, plus de cohérence a été assurée. Ainsi, le terme de pression hydrostatique utilisé dans la version française de la SIA 267:2003 a été corrigé en pression hydraulique lors de la révision. De même, tout comme dans la SIA 261:2014 (en particulier son tableau 3), la pression d'eau n'est plus utilisée et représentée en tant que pression hydraulique résultante. On peut le relever dans la figure 9 de la SIA 267:2013 (Figure 3) et l'article 12.5.2.1 correspondant.



Valeurs de calcul de la pression hydraulique:

- à gauche: $W_d = \gamma_F W_k$
- à droite: $W'_d = \gamma_F W'_k$

Les mêmes facteurs de charge γ_F doivent être utilisés des deux côtés de la paroi.

Exemple de diagramme de la pression hydraulique
Hyp. : fiche dans un horizon imperméable ($i = 0$)

Figure 3 : Valeur de calcul et répartition de la pression hydraulique pour la vérification de la sécurité structurale d'une paroi de soutènement (Figure 9 de la SIA 267:2013)

Plusieurs articles du chapitre 13 ont été réécrits pour préciser les éléments essentiels à considérer afin de se prémunir contre les instabilités d'origine hydraulique (soulèvement par poussée d'Archimède et entraînement de particules de sol par renard hydraulique), à savoir la nécessité d'une reconnaissance suffisante des conditions hydrogéologiques, la considération du caractère hétérogène et/ou anisotrope des terrains de fondation, l'utilisation appropriée de solutions de rabattement. Les principales modifications apportées sont les suivantes :

13.2 Principes

- La connaissance de l'eau souterraine et des conditions d'écoulement est une condition préalable pour l'évaluation correcte des états de contraintes dans le terrain de fondation.
- Le soulèvement d'un ouvrage ou d'une couche de terrain sous l'effet de la poussée d'Archimède et la remontée du sol sous l'effet de la force d'écoulement seront évités à l'aide de mesures hydrologiques et/ou constructives.

13.4 Analyse

- Lorsque le terrain est stratifié ou non homogène, il faut considérer que la réduction de la pression a lieu principalement dans les couches ou niveaux intraformationnels présentant la perméabilité la plus faible. La réduction de la pression dans les couches plus perméables peut en général être négligée.
- Si la position, l'épaisseur et la géométrie des couches et niveaux intraformationnels de faible perméabilité ne peuvent être déterminées avec suffisamment de fiabilité, il faudra généralement prendre des mesures constructives (par exemple, décompression). Les couches proches de la surface sont particulièrement critiques.
- Les différentes perméabilités, transversalement et parallèlement aux couches, doivent être prises en compte dans la modélisation.

A noter que l'utilisation d'un rabattement de la nappe pour réduire le danger d'instabilités d'origine hydraulique était déjà mentionnée dans l'article 13.6.3 de la SIA 267:2003 : « Il est généralement possible d'éviter

des ruptures de fond et des renards hydrauliques en décompressant la nappe phréatique au moyen de puits filtrants ou de wellpoints ».

La figure 10 de la SIA 267:2013 (Figure 4 ci-dessous) a été retravaillée en distinguant le soulèvement par poussée d'Archimède du risque de renard hydraulique. Une nouvelle situation de risque a été ajoutée (cas du centre dans la Figure 4) et les conditions d'application des divers cas précisées.

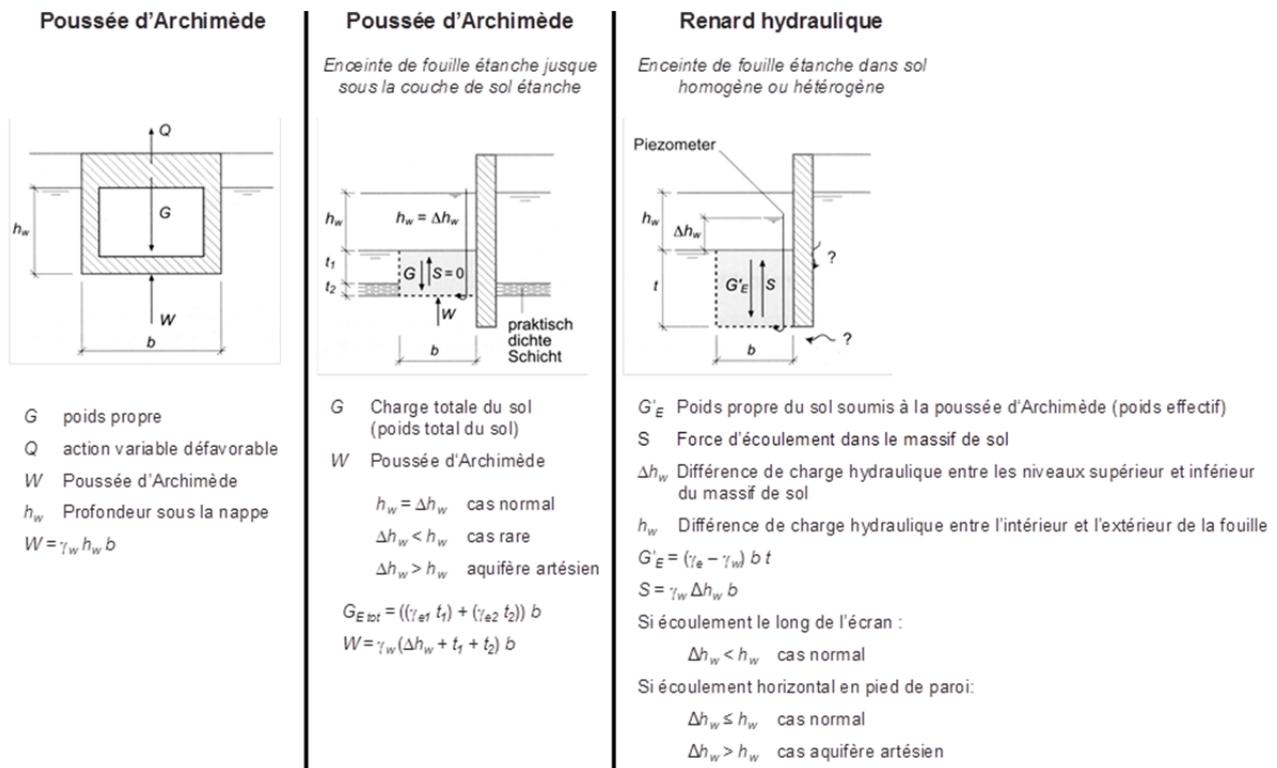


Figure 4 : Nouvelle Figure 10 de la SIA 267:2013.

Les formats de vérification de la stabilité hydraulique n'ont pas été modifiés :

- La sécurité relative à la poussée d'Archimède (cas de gauche et du centre de la Figure 4) est vérifiée à l'état limite type 1 selon l'équation suivante :

$$\gamma_{G,\text{sup}} W_k + \gamma_Q Q_k \leq \gamma_{G,\text{inf}} G_k \quad \text{avec } \gamma_{G,\text{sup}} = 1.05 \text{ et } \gamma_{G,\text{inf}} = 0.9 \text{ selon le tableau 1 de la SIA 260}$$

Dans le cas où des éléments de résistance sont pris en considération dans la vérification, celle-ci se fait à l'état limite type 2.

- La sécurité relative au renard hydraulique (cas de droite de la Figure 4) consiste à vérifier que la force de percolation de l'eau dans le massif de sol situé sous le fond de fouille est inférieure à son poids volumique déjaugé :

$$\gamma_{G,\text{sup}} S_k \leq \gamma_{G,\text{inf}} G'_{E,k}$$

avec $\gamma_{G,\text{inf}} = 0.9$ et $\gamma_{G,\text{sup}} = 1.6$ pour les sols limoneux et finement sableux et $\gamma_{G,\text{sup}} = 1.4$ pour les autres sols menacés de renard hydraulique.

La différence de sécurité entre les deux formats de vérification interpelle. Exprimée sous forme de facteur global de sécurité, elle est de $1.05/0.9 = 1.17$ pour le soulèvement par poussée d'Archimède, mais de $1.4/0.9 = 1.55$, voire même de $1.6/0.9 = 1.78$ pour les sols limoneux et finement sableux, pour le renard hydraulique. Une telle sécurité bien plus élevée vis-à-vis du renard hydraulique (cas de droite de la Figure 4) ne se justifie que difficilement par le seul risque d'entraînement des particules de sol (ELU type 1), mais tient probablement compte du fait que l'écoulement d'eau réduit fortement la contrainte verticale effective sous le niveau du fond de fouille (en l'absence de rabattement) et dès lors la résistance passive mobilisable devant la paroi de soutènement [10]. Ceci ne dispense cependant pas le géotechnicien de vérifier l'ELU type 2 externe de l'enceinte de fouille, en considérant l'écoulement de l'eau et la diminution de résistance passive associée.

4 Conclusion

La première version des normes SIA est entrée en vigueur en 2003. La pratique a montré que l'eau souterraine n'était pas toujours considérée de façon adéquate lors de l'étude et la réalisation de projets, avec parfois comme conséquence des instabilités hydrauliques. Bien que les normes ne puissent à elles seules résoudre le problème d'une mauvaise compréhension et modélisation des instabilités d'origine hydraulique, il était du devoir de la commission Géotechnique CN 267 de la SIA d'adapter un certain nombre d'articles relatifs à l'eau dans les sols dans le cadre de la révision des normes SIA 267 et SIA 261. S'agissant d'une révision partielle, les modifications/ajouts ont essentiellement porté sur les articles qui pouvaient poser des problèmes pour le dimensionnement des ouvrages.

Les principales modifications apportées se trouvent dans la section 4.4 de la SIA 261:2014 consacrée à la pression hydraulique ainsi que dans le chapitre 13 de la SIA 267:2013 dédié à la poussée d'Archimède et au renard hydraulique. Une nouvelle section (Chiffre 3.4) intitulée « Eau dans le terrain de fondation » a été ajoutée dans la partie de la SIA 267 consacrée aux reconnaissances. Le tableau 3 de la SIA 261:2014 et les figures 9 et 10 de la SIA 267:2013 ont également été retravaillés.

Ce document tente de présenter de façon synthétique les principales modifications apportées dans le cadre de la révision partielle des normes SIA 261:2003 [2] et 267:2003 [3] pour résoudre les plus importants problèmes de prise en compte de l'eau souterraine constatés dans la pratique. Le contenu n'est pas exhaustif et le lecteur se référera aux documents normatifs pour prendre connaissance de l'ensemble des révisions apportées.

Références

- [1] Swisscodes. Normes suisses sur les structures porteuses SIA 260 à 267 éditées par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, 2003.
- [2] SIA 261:2003, Actions sur les structures porteuses. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 261, 2003, 114 pp.
- [3] SIA 267:2003, Géotechnique. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 267, 2003, 102 pp.
- [4] SIA 267/1:2003, Géotechnique - spécifications complémentaires. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 267/1, 2003, 44 pp.
- [5] SIA 267:2013, Géotechnique. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 267, 2013, 110 pp.
- [6] SIA 267/1:2013, Géotechnique - spécifications complémentaires. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 267/1, 2013, 48 pp.
- [7] SIA 261:2014, Actions sur les structures porteuses. Norme suisse éditée par la Société suisse des Ingénieurs et des Architectes SIA, SN 505 261, 2014, 132 pp.
- [8] Eurocode 7, Calcul géotechnique - Partie 1 : Règles générales. Norme européenne éditée par le Comité Européen de Normalisation CEN/TC 250, EN 1997-1, 2004, 170 pp.
- [9] Lutz A., Labiouse V. Normes révisées SIA 267 Géotechnique et SIA 267/1 Géotechnique – spécifications complémentaires. Séminaire de formation 144203 de Compétences pour la construction : Norme révisée SIA 267 Géotechnique – Modifications et thèmes choisis, Yverdon-les-Bains, 18 mars 2014, 20 pp.
- [10] Steiner W., Labiouse V. Eaux souterraines et renard hydraulique. Séminaire de formation 144203 de Compétences pour la construction : Norme révisée SIA 267 Géotechnique – Modifications et thèmes choisis, Yverdon-les-Bains, 18 mars 2014, 18 pp.
- [11] Lambe T. W., Whitman R. V. Soil Mechanics. Wiley, New York, 1969, 553 pp.

Auteur V. Labiouse
Laboratoire de Mécanique des Roches LMR
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne EPFL
Station 18
1015 Lausanne (VD)