Proceedings of the XVII ECSMGE-2019
Geotechnical Engineering foundation of the future
ISBN 978-9935-9436-1-3
© The authors and IGS: All rights reserved, 2019
doi: 10.32075/17ECSMGE-2019-0103

XVII European Conference
ECSMGE 2019
Reykjavik
on Soil Mechanics
and Geotechnical Engineering

Apprentissage par projet du dimensionnement des murs de soutènement en béton armé pour des élèves-ingénieurs en Géotechnique et Génie Civil

Project based learning for the retaining wall design for geotechnical and civil engineering students

O. Jenck
Polytech Grenoble, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

D. Ricotier
Polytech Grenoble, Université Grenoble Alpes, Grenoble, France

RÉSUMÉ: Les méthodes d'enseignement par apprentissage par projet (APP) sont une forme de pédagogie active qui améliore la motivation et l'investissement des étudiants et conduirait à une acquisition plus durable des connaissances. Le principe est que le projet n'est pas précédé de cours magistraux, l'apprentissage se faisant sous forme de travail individuel et de restitution en groupe, avec pour objectif la résolution du problème posé. Au département Géotechnique et Génie Civil de Polytech Grenoble, ce type de pédagogie a été mis en place pour différents enseignements. Cette communication présente un projet orienté « métier », pour l'apprentissage du dimensionnement des murs de soutènement, qui allie les disciplines de la géotechnique et du béton armé. Ainsi, deux matières qui étaient précédemment enseignées de manière dé-corrélée sont intégrées dans un même projet, qui consiste à effectuer le dimensionnement d'un mur cantilever afin de satisfaire à la stabilité externe et interne de l'ouvrage, suivant les Eurocodes (7 et 2). Cela permet également aux étudiants de s'approprier le caractère multidisciplinaire inhérent à une situation concrète. Cette communication présente les modalités de la méthode APP, le sujet posé aux étudiants, puis dresse un bilan de cet enseignement.

ABSTRACT: Project based learning (PBL) is an active learning process which is said to improve the students' commitment and ensure a sustainable learning acquisition, through a team working on a professionally oriented project. In the Geotechnical and Civil Engineering Department of Polytech Grenoble (Engineering School of Grenoble Alps University) such projects have been established for several disciplines. This communication presents a project devoted to the learning of the design of retaining walls, integrating both the geotechnics and reinforced concrete disciplines. Thereby, these two disciplines, which were previously tough independently by different teachers, are integrated in a common project, consisting in the design of a cantilever retaining wall, to satisfy the external and internal stabilities following the Eurocodes (7 and 2). This also allows the students to come to terms with the multidisciplinary features of a real situation. This paper presents the project and its implementation, and then takes stock of the experience.

Keywords: Project based learning, active learning, retaining walls, reinforced concrete structures, geotechnical engineering

1 INTRODUCTION

En France comme ailleurs dans le monde, les méthodes alternatives d'enseignement se développent, notamment les méthodes de pédagogie active par Apprentissage Par Projet (APP), qui ont vu le jour il y a une quarantaine d'années au Canada. Cette forme de pédagogie a pour objectif de générer des apprentissages à travers la réalisation d'une étude concrète.

Les bénéfices des approches d'enseignement par pédagogie active sont réputés nombreux : ils augmentent la motivation des étudiants à apprendre, ils développent des compétences professionnelles d'ingénieurs dans les domaines de la gestion de projet et du travail collaboratif, etc. Les inconvénients reportés concernant les APP mentionnent que les étudiants auraient une compréhension moins rigoureuse des fondamentaux scientifiques, que ce type d'enseignement demande beaucoup de temps et qu'ils génèrent parfois des problèmes entre membres du groupe (Airey 2008).

Les APP peuvent être mis en place pour générer des apprentissages d'éléments scientifiques fondamentaux (Ricotier *et al.*, 2017) ou pour acquérir des connaissances et un degré d'expertise avancés (Delage *et al.*, 2006 ; Gavin, 2011). Le projet mis en place ici nécessite des connaissances préalables en mécanique des sols et en dimensionnement de structures en béton armé, et vise à former les étudiants sur le dimensionnement des murs de soutènement, à mi-parcours de leur formation en cycle ingénieur.

2 L'APPRENTISSAGE PAR PROJET

L'APP repose sur trois principes pédagogiques :
i) La motivation pour l'apprentissage (Saint-Onge 2008), en confrontant l'étudiant à un problème se rapprochant de ceux qu'il rencontrera dans sa vie professionnelle future,
ii) Le travail collaboratif en petit groupe, encadré et supervisé par un tuteur,
iii) La génération de compétences génériques liées à la résolution du problème (approche rationnelle et analytique d'une situation, recherche, structuration et intégration de différentes ressources et informations pour résoudre le problème), au travail de groupe et au travail individuel.

Lors des séances de travail en groupe, le tuteur n'est pas/plus un enseignant mais un « facilitateur ». Son rôle est de conduire les débats dans le groupe, questionner, faciliter et, au besoin, apporter son diagnostic pour permettre à chaque étudiant d'acquérir les connaissances et développer les compétences visées.

3 DIMENSIONNEMENT D'UN MUR DE SOUTENEMENT

Le projet consiste à dimensionner selon les normes Eurocodes un mur en T renversé en béton armé, retenant un massif de sol homogène. La géométrie et les données du problème sont délibérément relativement simples, afin que les étudiants puissent se focaliser sur les principes généraux de fonctionnement de l'ouvrage, la méthodologie de dimensionnement et l'application des normes (Eurocodes).

Il est demandé aux étudiants de i) déterminer la géométrie du mur (longueur de la semelle) afin d'assurer la stabilité externe de l'ouvrage ; ii) déterminer le ferraillage de l'ouvrage nécessaire afin d'assurer sa stabilité interne, suivant les normes d'application nationale des Eurocodes.

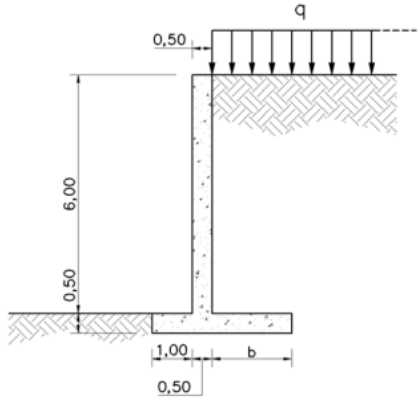


Figure 1. Coupe simplifiée du mur à dimensionner

La durée du projet étant relativement limitée (3 journées au total), la géométrie de l'ouvrage est initialement déjà partiellement fournie (épaisseur du mur, longueur du patin, mais la pertinence de ces valeurs devra être vérifiée par les étudiants lors du dimensionnement), et le massif de sol est homogène (on donne les valeurs caractéristiques de l'angle de frottement, de la cohésion et du poids volumique).

3.1 Pré-requis

Les étudiants concernés par cet APP sont en 2ème année d'école d'ingénieurs en Géotechnique et Génie Civil. Ils ont donc déjà des notions solides de mécanique des sols, de résistance des matériaux, de calcul des structures en béton armé, etc. et ont déjà dimensionné des ouvrages (en appliquant les principes des Eurocodes), notamment des fondations (stabilité externe) ainsi que des structures en béton armé type poutres et poteaux (stabilité interne).

Cet APP est proposé aux étudiants en fin de semestre 7, au cours duquel ils ont suivi des cours et travaux dirigés des deux matières Béton Armé et Ouvrages de Soutènement, sans avoir traité du cas particulier des murs en T-renversé, mais leur donnant les bases nécessaires à la compréhension (principe de calcul de ferraillage de structures « classiques », notions de poussée-butée des terres, dimensionnement des parois de soutènement).

3.2 Objectifs et contenu du projet

3.2.1 Jour 1 : Stabilité externe du mur – longueur de la semelle

Les étudiants ont comme objectif de déterminer la longueur de la semelle afin d'éviter le glissement de l'ouvrage sur sa base (ELU) et de limiter l'excentrement de la charge appliquée sur la fondation du mur, à l'ELU et l'ELS (le non-poinçonnement du sol de fondation étant considéré satisfait, cet aspect ayant déjà été traité dans les cours sur les fondations). Pour cela, ils doivent clairement comprendre les différents modes de rupture possibles de l'ouvrage, présenter le modèle de calcul (bloc monolithique) pour les vérifications demandées dans cette partie, puis effectuer les calculs en suivant la norme française d'application de l'EC7 pour les murs de soutènement (AFNOR, 2014). Pour la résolution (largeur du talon minimale nécessaire), ils sont guidés vers une utilisation du solveur du tableur (Excel ou autre).

3.2.2 Jour 2 : Stabilité interne - Ferraillage du voile

A partir du modèle géotechnique pertinent (actions du sol sur le voile), les étudiants doivent déterminer le ferraillage nécessaire du voile afin d'assurer la stabilité interne de cette partie de l'ouvrage. Pour cela, ils déterminent les sollicitations dans le voile (courbe des moments fléchissants et des efforts tranchants) à partir des données géotechniques puis tracent l'arrêt d'épure des barres afin de dimensionner le ferraillage vertical du côté des terres. Il est également demandé de déterminer le ferraillage transversal et horizontal, ainsi que de vérifier toutes les dispositions constructives (ferraillage minimal, etc.), d'après l'eurocode 2 (AFNOR, 2005).

3.2.3 Jour 3 : Stabilité interne - Ferraillage de la semelle

Lors de cette 3ème et dernière journée, les étudiants doivent calculer les sections d'armatures dans la semelle (patin et talon) et dessiner le plan de ferraillage de la totalité du mur. Les sollicitations dans la semelle sont déterminées à partir d'un modèle géotechnique (ils sont guidés vers l'utilisation du diagramme simplifié de Meyerhof pour la réaction du sol sous la semelle) et le dimensionnement est effectué à partir des sollicitations d'encastrement entre le patin et le voile et entre le talon et le voile.

Lors des jours 2 et 3, les étudiants sont clairement amenés à faire le lien entre les sollicita-

tions géotechniques sur l'ouvrage, le comportement de celui-ci (mode de déformation) et son dimensionnement pour en assurer la stabilité interne (calcul des sections d'acier et plan de ferraillage).

4 ORGANISATION DU PROJET

Le projet se déroule sur 3 journées dédiées au projet, les étudiants sont en groupe de 5 ou 6 étudiants, tuteurés par un enseignant. Les deux enseignants tuteurent chacun plusieurs groupes (3 ou 4).

4.1 Journée type

Une journée type se déroule ainsi :
8h30-9h : séance aller
9h-10h45 : travail individuel (1h45)
10h45-11h15 : séance retour et possibilité de poser des questions
11h15-11h45 : réponses aux questions
11h45-12h30 : pause méridienne
12h30-15h : travail individuel (2h30)
15h-16h : séance retour, rédaction de la réponse et présentation d'un groupe
16h-17h : correction (enseignants)

4.2 Travail en groupe, travail individuel, cours de restructuration

La séance « aller » est une courte séance de groupe, tuteurée, afin de s'approprier le sujet. Le travail de groupe permet de clarifier les objectifs, par la reformulation et l'identification des notions utiles (déjà acquises ou nouvelles).

Tout au long du projet, les étudiants sont guidés par un livret étudiant, qui indique les objectifs du jour, l'organisation de la journée, donne des informations pour mener un travail de groupe et individuel efficaces. Ce livret comporte également la grille d'évaluation (Fig. 3) du rendu de fin de journée (rendu sous forme de poster et de présentation orale), ce qui constitue un guide concernant les attentes en termes d'acquisition de connaissances et compétences et de livrable.

Les étudiants n'ont au préalable pas suivi de cours spécifiques sur le thème du projet. Ils sont amenés à acquérir les nouvelles connaissances par du travail individuel, dans l'objectif d'être capables de comprendre et d'effectuer le dimensionnement de l'ouvrage. Ils sont guidés vers la consultation de cours, d'ouvrages et de normes... il n'est pas fourni un document de cours unique relatif à ce projet et la recherche des informations pertinentes fait également partie du travail d'apprentissage.

La séance « retour » de fin de matinée permet la mise en commun du fruit du travail individuel. C'est l'occasion pour les étudiants d'argumenter et de justifier leur démarche, de s'expliquer mutuellement des notions, puis éventuellement de formuler des questions précises à l'attention des enseignants (sous forme écrite). Les réponses aux questions sont apportées sous forme d'un « cours de restructuration », devant tous les étudiants. Cela permet aux étudiants de finaliser leur projet, par du travail individuel suivi d'une mise en commun lors d'une séance retour.

4.3 Rendus des projets et évaluation

En fin de journée, chaque groupe réalise un poster (Fig. 2) et le remet à son tuteur. Un groupe est tiré au sort et présente son travail devant les autres groupes. La présentation de 10 minutes est suivie de 10 minutes de questions. Les groupes n'ayant pas présenté sont évalués uniquement sur leur poster. Les posters sont évalués et annotés le soir même par les tuteurs et envoyés aux étudiants par e-mail. L'évaluation des posters des 3 journées constitue la note de groupe. Les exigences portent également sur la pertinence des arguments avancés, la rigueur du langage utilisé (écrit ou oral), la qualité des illustrations et l'orthographe.

A la fin du 3ème jour, un QCM (Questionnaire à Choix Multiple) individuel permet d'attribuer une note individuelle.

La note finale de l'APP est la moyenne des notes du groupe et individuelle, et compte pour 20% dans les notes finales de chacune des Unités d'Enseignements Béton Armé et Ouvrages de Soutènement du semestre.

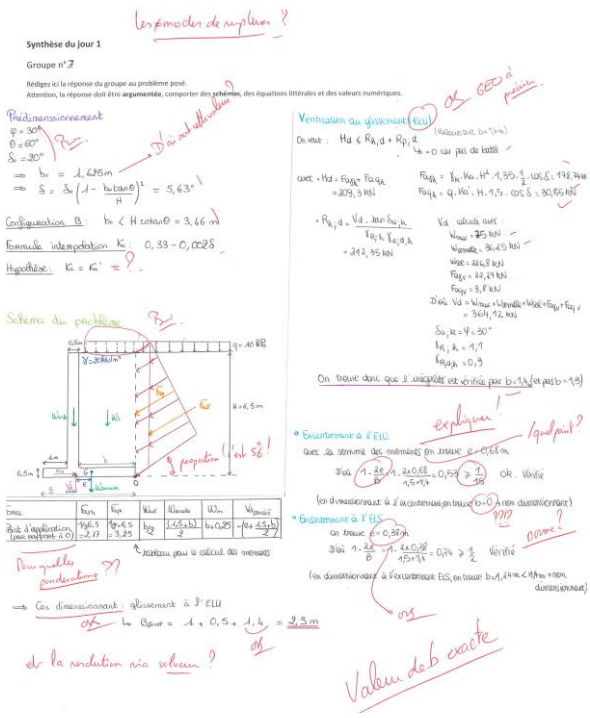


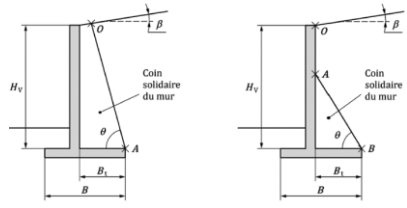
Figure 2. Poster annoté



Figure 3. Grille d'évaluation du poster

Question 8 :
La figure 8.5.2.1 est extraite de la norme NF P 94-281.

A ☐ Il est possible de choisir indifféremment la figure de gauche ou celle de droite.
B ☐ Sur ces figures, l'angle de frottement entre le sol et le coin solidaire du mur est égal à l'angle de frottement du sol.
C ☐ Le choix de la figure de droite ou de gauche dépend de l'élancement (hauteur par rapport à largeur) du mur.
D ☐ Il peut arriver que θ soit supérieur à 90°
E ☐ Ces figures correspondent au modèle du bloc monolithique à parement fictif vertical.



$$\theta = \frac{\pi}{4} + \frac{\varphi'}{2} + \frac{y-\beta}{2} \quad \text{avec } y = \arcsin\left(\frac{\sin\beta}{\sin\varphi'}\right)$$

Figure 8.5.1.2 Définition d'un plan fictif incliné et inclinaison δ_0 de la poussée

Figure 4. Exemple de QCM de fin de formation

5 BILAN

Cette communication présente une méthode d'apprentissage alternative au traditionnel schéma cours et exercices, portant sur le dimensionnement d'un type d'ouvrage géotechnique (mur de soutènement en T-renversé). L'Apprentissage Par Projet permet de rendre les étudiants acteurs de leur formation, augmente ainsi leur motivation et leur implication, ce qui conduit certainement à une acquisition plus sûre et plus durable de leurs connaissances.

Ce projet met également en évidence le lien entre la géotechnique et le calcul de structure (les sollicitations à prendre en compte pour le dimensionnement interne de l'ouvrage étant issues d'un modèle géotechnique pertinent) alors que ces deux disciplines étaient précédemment enseignées de manière dé-corrélée.

Ce type d'enseignement alternatif demande un grand investissement de la part du corps enseignant (montage et pilotage), mais procure une certaine satisfaction à voir les étudiants plus acteurs de leur formation et en situation d'apprentissage efficace, tout en renforçant la cohésion de l'équipe pédagogique.

6 REFERENCES

AFNOR, 2005. Eurocode 2 - Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments. Norme Française NF EN 1992-1-1 d'octobre 2005.

AFNOR, 2014. Justification des ouvrages géotechniques. Normes d'application nationale de l'Eurocode 7. Ouvrages de soutènement — Murs. Norme Française NF P 94-281 du 26 avril 204. 105p.

Airey, D.W. 2008. A project based approach to teaching Geotechnical Engineering. Education and Training in Geo-Engineering Sciences. Taylor and Francis Group, 357-362.

Delage, P., De Gennaro, V., Bernhardt, V., Simon, B. 2006. Un enseignement par projet de la géotechnique (Project oriented geotechnical teaching), *Revue Française de Géotechnique* **115**, 37-42

Gavin, K. 2011. Case study of a project-based learning course in civil engineering design. *European Journal of Engineering Education* **36**(6).

Ricotier D., Jenck O., Dias D., Oxarango L. 2017. Apprentissage par projet multidisciplinaire pour les élèves-ingénieurs en géotechnique et génie civil, afin d'acquérir des notions fondamentales. *19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, South Korea.*

Ricotier, D. 2017. Calcul des structures en béton selon l'Eurocode 2. Cours S7 et S8 du département Géotechnique et Génie Civil de Polytech Grenoble, Université Grenoble Alpes.

Ricotier, D. 2012. Dimensionnement des structures en béton selon l'Eurocode 2. Paris : Le Moniteur.

Saint-Onge M. 2008. Moi j'enseigne, mais eux apprennent-ils ? Chronique sociale, 123p. ISBN : 978-2-85008-721-9.