

**Zeitschrift:** Swiss bulletin für angewandte Geologie = Swiss bulletin pour la géologie appliquée = Swiss bulletin per la geologia applicata = Swiss bulletin for applied geology

**Herausgeber:** Schweizerische Vereinigung von Energie-Geowissenschaftlern; Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie

**Band:** 28 (2023)

**Heft:** 1-2

**Artikel:** Rétrocalculs des paramètres géotechniques par modélisations

**Autor:** Tissières, Pascal / Prieur, Patricia

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1051719>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 02.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Rétrocalculs des paramètres géotechniques par modélisations

Pascal Tissières<sup>1</sup>, Patricia Prieur<sup>1</sup>

## Mots-clés

Modèles numériques, lois de comportement des sols, tassement secondaire de remblais.

## Résumé

Les modélisations numériques sont des outils indispensables pour le calcul de déformations de structures complexes comme des remblais. Il est donc nécessaire de choisir la loi de comportement des sols adaptée au problème traité. Malgré les prouesses des logiciels disponibles sur le marché pour les calculs par éléments finis, il ne faut jamais perdre de l'esprit que l'ordre de grandeur des résultats des modèles doit être connu par des calculs simplifiés. Nous abordons aussi la problématique du tassement secondaire de remblais non saturés en eau.

## Zusammenfassung

Die numerische Modellierung ist ein wesentliches Werkzeug zur Berechnung von Verformungen komplexer Strukturen wie Böschungen. Es ist daher notwendig, das Gesetz des Bodenverhaltens zu wählen, das an das behandelte Problem angepasst ist. Trotz der auf dem Markt erhältlichen Software für Finite-Elemente-Berechnungen sollte nie vergessen werden, dass die Größenordnung der Modellergebnisse durch vereinfachte Berechnungen bekannt sein muss. Wir befassen uns auch mit dem Thema der Sekundärverdichtung von ungesättigten Verfüllung.

## 1 Introduction

Notre contribution s'attache à montrer les enjeux et limites des modélisations numériques qui sont des instruments incontournables de l'ingénieur-géologue.

Quand il s'occupe de stabilité de terrain et de fondations, l'ingénieur-géologue est appelé à vérifier deux situations au sens des normes SIA 260 à 267 :

- la sécurité ou analyse structurale,
- l'aptitude au service.

## 2 Sécurité structurale

Les autres conférenciers de la journée de conférence du 31 mars 2023 ont débattu de l'analyse structurale avec beaucoup de compétence et de détails. Sans reprendre ici leurs développements, rappelons simplement qu'il s'agit de comparer une action extérieure, majorée par des facteurs partiels à une résistance de la structure, minorée par d'autres facteurs partiels. Tous ces calculs se font dans le mode des valeurs de dimensionnement ou de design (indice d). Ce sont donc de classiques calculs statiques mettant en équilibre des forces et parfois des moments. Les logiciels disponibles sur le marché pour les calculs de sécurité structurale sont nombreux et variés. En Suisse, le logiciel Larix développé par Cubus est souvent utilisé, à côté de Slide de Rocscience/Canada, de Talren (F) et d'autres.

**Axiome n° 1** : *il est important de rappeler aux ingénieurs-géologues l'importance de la statique; une introduction sur la notion d'équilibre des forces et des moments devrait être ac-*

<sup>1</sup> bureau d'ingénieurs et géologues Tissières SA, Rue des Prés-de-la-Scie 2, 1920 Martigny, bureau@tissieres-sa.ch

quise par chaque personne travaillant dans le domaine de la géologie technique.

### 3 Aptitude au service

L'aptitude au service est un domaine moins familier des ingénieurs-géologues. Il intervient fréquemment dans les cas d'expertise en lien avec des dommages aux bâtiments. Au stade du projet, les contraintes de service sont choisies de manière suffisamment basse pour éviter des problèmes de grandes déformations des sols. La vérification de l'aptitude au service s'écarte fondamentalement de celle de la sécurité structurale : on prend en compte les charges de service quant à la structure et les valeurs prudentes appelées caractéristiques des paramètres géotechniques des sols : ce ne sont donc pas expressément des valeurs de dimensionnement.

Ces vérifications permettent de déterminer si les déformations calculées sont compatibles avec les structures. Les sols se déforment sous contraintes dans le domaine élastique, puis dans le domaine plastique. Rappelons que le sol est par définition un matériau où les déformations sont rarement réversibles : celles-ci sont alors plastiques.

Les calculs élastiques sont basés sur la loi de Hooke (contrainte  $\sigma$  = déformation spécifique  $\varepsilon$  multipliée par le module d'élasticité  $E$ ) ou sur diverses distributions des contraintes dans le sol (Boussinesq, etc., voir Vuillet & al., 2016, p. 471). En revanche, les calculs plastiques sont plus complexes : ils nécessitent de définir comment le sol se déforme de manière continue jusqu'à la rupture selon sa loi de comportement. Les calculs plastiques sont effectués par des logiciels développés par exemple par les sociétés Bentley-System-Plaxis (USA) ou Zace-Z\_Soil (CH).

**Axiome n° 2 :** *un sol est un arrangement de grains qui se déforme essentiellement dans le*

*domaine plastique, donc de manière irréversible ; un calcul élastique est judicieux si on est conscient que les résultats du calcul sont quasiment irréversibles (exception notoire : argiles pures).*

### 4 Choix des paramètres géotechniques

Les paramètres géotechniques sont obtenus soit par des essais, soit par expérience, soit par rétrocalculs. Il a été rappelé le 31 mars 2023 que l'intuition reposant sur l'expérience est une approche à ne pas négliger. Les limites des essais ont aussi été rappelées lors de ces conférences : variabilité spatiale; représentativité d'échantillons dont la granulométrie est très étendue, comme la moraine; échantillons remaniés par la technique de prélèvement sur le terrain et par la mise en place dans les moules d'essais. C'est pourquoi l'axiome n° 3 ne doit jamais être oublié. L'expression en allemand est reprise ici parce qu'elle est plus percutante qu'en français; il faudrait la traduire par une périphrase.

**Axiome n° 3 :** *eine Messung ist keine Messung; et son corollaire : mieux vaut ne pas faire d'essai qu'un seul ; il faut donc au minimum trois essais !*

Le rétrocalcul de situations en cours de chantier est une étape malheureusement souvent négligée : il existe toujours un talus, une excavation en cours, etc. sur lesquels il est possible de faire un rétrocalcul de stabilité donnant des valeurs spécifiques à la situation dont il faut faire les vérifications de sécurité structurale ou d'aptitude au service (Fig. 1). On obtient ainsi, simplement par observation de la situation existante, des configurations utilisables pour les rétrocalculs. Ceux-ci vont donner un angle de frottement interne et surtout une cohésion calant à la réalité du chantier.

**Axiome n° 4 :** *tout chantier donne des situations de stabilité où des rétrocalculs peuvent*



Fig. 1 : Talus permettant de faire des rétrocalculs (Martigny, alluvions de la Dranse, vers 1990, photo Patrimoines de Martigny).

être faits pour définir les paramètres géotechniques réels.

## 5 Calculs plastiques

Les calculs plastiques sont basés sur la résolution des équations aux dérivées partielles par discrétisation d'un plan ou d'un espace en polygones appelés éléments finis ; les dérivées partielles sont ramenées à un système d'équations linéaires pour chaque nœud.

L'ingénieur-géologue doit choisir la loi de comportement qui soit la mieux adaptée aux sols. Actuellement, c'est le modèle de sol avec rigidité croissante qui est le plus apprécié (Hardening Soil Model, HSM); en voici les caractéristiques (Fig. 2) :

- dans le plan déformation spécifique  $\varepsilon$ -contrainte déviatorique ou de cisaillement  $q$ , le module d'élasticité moyen  $E50$  sert de base de calcul, et non pas un mo-

dule d'élasticité réduit par des facteurs partiels;

- en cas de décharge, le module d'élasticité  $E_{unreload/reload}$ ,  $E_{ur}$  est plus grand que  $E50$ ;
- lors de la recharge, le logiciel utilise le nouveau module  $E_{ur}$  plus rigide que le  $E50$ ;
- la loi est définie jusqu'à la rupture, grâce à une série de paramètres théoriques souvent difficiles à cerner. Les manuels d'utilisation des logiciels sont d'ordinaire suffisamment explicites à ce propos pour que l'ingénieur-géologue puisse faire ses choix de manière éclairée (OBRZUD, R. & TRUTY, A., 2013; Plaxis 2012). D'autres paramètres sont issus des essais triaxiaux, comme le coefficient de Poisson  $\nu$ .

**Axiome n° 5 :** *tout calcul de déformations se pratique avec un module d'élasticité le plus réaliste possible et non un module réduit par des facteurs partiels.*

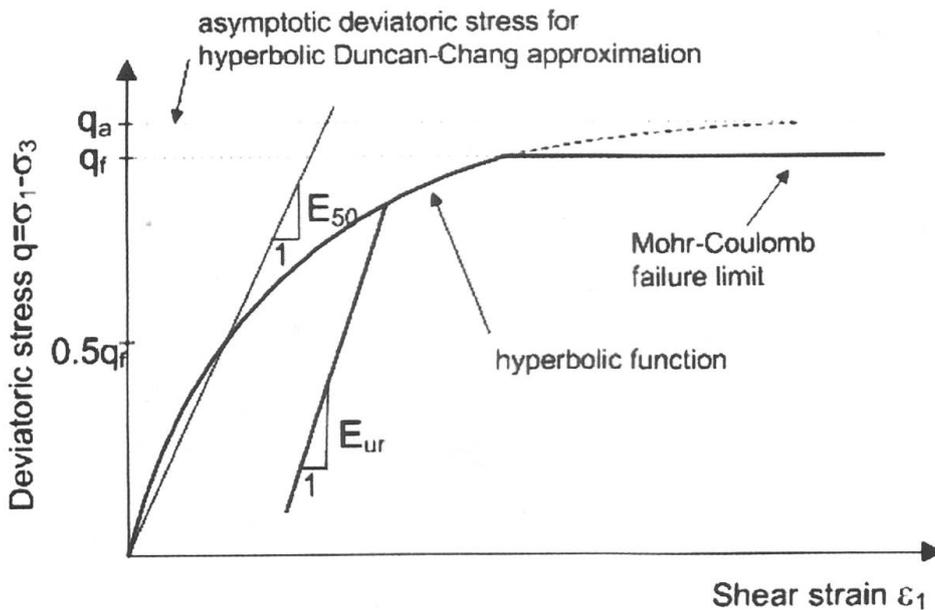


Fig. 2 : Loi de comportement du sol avec une rigidité croissante définie par un essai triaxial (OBRZUD & TRUTY, 2013, p.13)

## 6 Calage du modèle par éléments finis

Lorsque l'on entame des calculs par éléments finis, il est primordial de connaître l'ordre de grandeur des résultats attendus. Il n'est évidemment pas possible de faire une confiance aveugle aux modélisations numériques. Un calcul à la main est donc nécessaire pour estimer l'ordre de grandeur des déformations. Le mode de calcul à la main surestime d'ordinaire les déformations, car le sol peut se déformer latéralement sans aucune contrainte.

**Axiome n°6 :** toute sortie de calcul doit être vérifiée parallèlement par un calcul à la main donnant l'ordre de grandeur des résultats.

## 7 Tassement de remblais non saturés en eau

Nos diverses mesures de tassement de remblais non saturés en eau mettent en évidence qu'un sol se déforme d'abord de manière instantanée puis différée dans le temps par réarrangement de ses grains. Ce tassement sous contraintes effectives constantes est appelé tassement secondaire (Vuillet & al., 2016, p.323). Le réarrangement des grains est

induit par la modification de la viscosité des couches d'eau adsorbée. Cette modification de la tension superficielle de l'eau est facilitée par les apports d'eaux pluviales qui s'infiltrant dans le sol.

**Axiome n°7 :** en milieu non saturé, les déformations sont immédiates puis se poursuivent de manière différée par tassement secondaire, c'est-à-dire par réarrangement des grains du sol sous contraintes effectives constantes suite à la modification de la tension superficielle.

## Bibliographie

- Obrzud, R. & Truty, A., 2013: The Hardening Soil Model, A Practical Guidebook, Z\_SoilPC 100701 report revised 31.01.2013, Zace Services Ltd, Lausanne, 203 p.
- Plaxis 2012: Plaxis 2D, Tutorial Manual.
- Vuillet, L., Lyesse, L. & Zhao, J., 2016 : Traité de Génie civil, vol. 18, Mécanique des sols et des roches avec écoulements souterrains et transferts de chaleur, 603 p.