
Lois empiriques pour la transition granulométrique

Nicolas Forquet, Equipe EPURE, UR MAEP

22 juin 2017

Ce document a pour objectif de fournir quelques clarifications sur les lois empiriques régissant la transition granulométrique ainsi que leurs fondements théoriques.

Contexte

Dans le guide cadre pour un cahier des clauses techniques particulières [1], il est précisé « qu'à défaut de règles de l'art spécifiques on peut se référer aux règles de Terzaghi pour le dimensionnement des couches de transition ». Une recherche a donc été effectuée afin d'identifier les sources citées par Alain Liénard dans ces différents travaux [2, 3]. Ces documents géotechniques présentent la mise en œuvre de filtres et de drains utilisés pour les barrages remblais et les protections de berges et reposant sur les phénomènes d'entraînement et d'auto-filtration très largement étudiés depuis près d'un siècle.

Entraînement et rétention

Lorsqu'un milieu granulaire est soumis à un écoulement, sa structure tend à évoluer car les particules les plus fines sont entraînées. Pour empêcher la dégradation de ce matériau, on lui fait succéder, dans le sens de l'écoulement, un filtre dans le cas du

barrage ou une couche de transition dans le cas des filtres plantés. L'objectif de cette couche est double : (i) **stopper le phénomène d'érosion** et (ii) **maintenir une bonne perméabilité**.

Pour mieux comprendre le fonctionnement de la couche de transition, plaçons nous en-dessous du massif filtrant et observons comment les particules issues du massif filtrant et entraînées par l'écoulement sont retenues. La filtration dans un matériau granulaire est contrôlée par les resserrements connectant les différents pores. Si une particule traversant un pore est plus grosse que n'importe lequel des resserrements permettant de sortir de ce pore, elle y reste piégée quelque soit le gradient hydraulique. Dès lors, différents cas doivent être envisagés comme le montre la Figure 1. (A) Si l'on choisit une couche de transition avec des resserrements trop fins, toutes les particules érodées du filtre se retrouveront bloquées à l'interface. Cela peut conduire à une forte réduction de la conductivité hydraulique à cette même interface. (D) Si au contraire le réseau de resserrements forment des chemins plus larges que les plus grosses particules du filtre, toutes les particules érodées depuis le filtre seront entraînées rendant la couche de transition caduque. (B et C) Si une partie des resserrements sont assez larges pour laisser passer la fraction la plus fine des particules érodées, ces dernières peuvent s'échapper du matériau au début. Mais très vite des

particules plus grosses se retrouvent piégées dans le réseau de pores et réduisent la taille des resserrlements et donc améliorent la filtration (on parle alors d'auto-filtration). Progressivement une interface stable se met en place permettant de retenir les particules issues du filtre tout en maintenant une conductivité hydraulique suffisante.

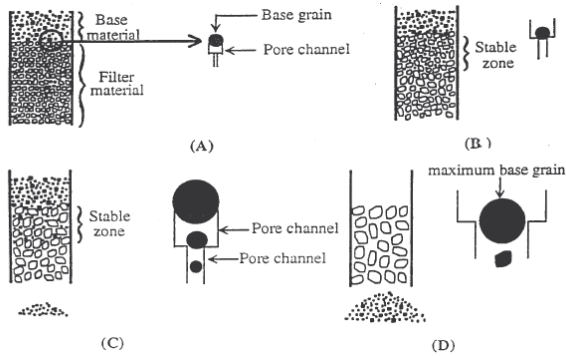


Figure 1 – Les différents cas de rétention particulaire à l'interface entre deux couches [9]

Un peu d'histoire

La première personne à avoir publié des règles granulométriques pour guider la mise en œuvre des filtres dans les barrages remblais fut le fameux Terzaghi [4]. Ce géotechnicien d'origine tchèque, connu également pour ses travaux sur la déformation des sols saturés, s'appuyant sur une approche à la fois théorique et empirique, proposa deux règles qui appliquées à la couche de transition donne :

- la couche de transition doit être assez fine pour éviter l'érosion de la couche filtrante et pour cela : $D_{15}/d_{85} \leq 4 - 5$
- Le couche de transition doit demeurer suffisamment perméable et pour cela : $D_{15}/d_{15} \geq 4$

Dans l'ensemble de la note, le D majuscule fait référence au diamètre maximum d'une fraction massique de la couche de transition tandis que le d minuscule fait référence au diamètre maximum d'une fraction massique de la couche filtrante. L'indice qui y est associé spécifie la valeur de la fraction massique. Par exemple, le D_{15} correspond au diamètre maximum des 15% en masse des grains les plus fins.

Par la suite, de très nombreuses études empiriques ont été menées afin de préciser ces critères. Raut [5] en présente une synthèse assez exhaustive dans son manuscrit de thèse mais nous ne nous intéresserons qu'à deux d'entre-elles. Tout d'abord, l'étude publiée par Karpoff [6] qui a conduit à l'établissement d'un critère unique sous la forme d'une double inégalité.

Pour du sable fin, il obtient :

$$5 \leq D_{50}/d_{50} \leq 10$$

Il s'agit de la formule qui a été reprise dans le guide cadre du CCTP. Or l'étude menée par Karpoff ne s'est pas limitée au sable fin et il obtient par exemple pour des roches concassées un intervalle différent :

$$9 \leq D_{50}/d_{50} \leq 30$$

. Raut [5] note également que cette étude a fait l'objet de nombreuses critiques suggérant que le d_{50} n'était pas suffisamment corrélé aux performances de la couche de transition. Pour finir, on peut citer les travaux de Sherard *et al.* [7] qui ont l'intérêt d'avoir porté sur des matériaux grossiers (9/25 avec moins de 15% de fines) et pour lesquels les auteurs suggèrent de restreindre le critère de Terzaghi : $D_{15}/d_{85} \leq 4$.

Que faut-il retenir pour les filtres plantés ?

Règles empiriques sur les fractions granulométriques

Cette note sur les critères granulométriques de la couche de transition intervient dans un contexte où les constructeurs et les maîtres d'œuvre font face à une pénurie de certains types de matériaux et s'interrogent sur la meilleure solution alternative à mettre en place et ce, notamment pour la couche de transition.

Sur le premier étage des filtres plantés de roseaux, le problème de la réduction de la perméabilité au niveau de la couche de transition semble négligeable et dès lors les règles de Terzaghi se résument au respect du critère d'uniformité et de l'inégalité : $D_{15}/d_{85} \leq 4$. Une valeur de 4 semble être la plus indiquée d'après les travaux de Sherard *et al.* [7]. En ce qui concerne la double inégalité de Karpoff, négliger le problème du maintien de la perméabilité revient à négliger le terme de gauche. Le choix du d_{50} ayant été critiqué et les valeurs reprises dans le CCTP étant celles obtenues pour une couche de transition en sable, il semble que ce critère soit moins performant pour estimer l'efficacité du phénomène d'auto-filtration.

En ce qui concerne le second étage des filtres plantés de roseaux, les remarques précédentes peuvent être reprises. Cependant, il semble pertinent de maintenir une réflexion autour du critère de perméabilité (l'inégalité $D_{15}/d_{15} \geq 4$ dans les règles de Terzaghi). Ceci peut s'avérer particulièrement important si il existe des doutes sur la qualité du lavage du matériau filtrant.

Sable uniforme et granulométrie continue

Les expériences de Terzaghi ont été effectuées sur des sables de granulométrie uniforme. C'est-à-dire que tous les grains ont une taille proche. C'est la raison pour laquelle leur validité est restreinte par le respect d'un critère sur le coefficient d'uniformité (CU) : $3 \leq CU \leq 6$. Mais il a été mis en évidence qu'avoir des particules de taille proche n'était pas le seul critère permettant de garantir l'efficacité d'une couche de transition. Il faut également que la granulométrie soit continue, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas de rupture de pente dans la courbe granulométrique. En effet, une rupture de pente traduit l'absence de particules de cette taille. Cela peut avoir deux conséquences : tout d'abord lors de la mise en œuvre du matériau une ségrégation peut se produire entre grains grossiers et grains fins (phénomène de la noix du Brésil) rendant inefficace la couche de matériau, ensuite si les particules les plus grosses ne sont présentes qu'en très faible nombre elles ne participent pas au phénomène d'auto-filtration rendant caduque le critère de Terzaghi. Lafleur [8] suggère qu'un diagramme en fréquence peut aider à détecter une telle situation plus facilement que la courbe granulométrique.

Enfin des travaux de recherche sont en cours [10] afin de proposer de nouveaux critères s'appuyant sur la distribution de taille de rétrécissement de pores (qui est la grandeur contrôlant la filtration) afin de s'affranchir des problèmes d'uniformité et du fait que la plupart des règles empiriques ont été obtenues sur des matériaux roulés.

Mémo : règle à respecter pour la couche de transition

Pour le premier étage :

- $D_{15}/d_{85} \leq 4$
- Matériaux uniforme : $3 \leq CU \leq 6$ & pas de rupture de pente brutale de la courbe granulométrique

Pour le deuxième étage :

- $D_{15}/d_{85} \leq 4$
- $D_{15}/d_{15} \geq 4$
- Matériaux uniforme : $3 \leq CU \leq 6$ & pas de rupture de pente brutale de la courbe granulométrique

Avril 2007.

- [2] Degoutte, G. *Petits barrages - Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. 1997. Editions du Cemagref.
- [3] Degoutte, G., Royet, P. *Aide mémoire de mécanique des sols*. 2009. Publications de l'EN-GREF
- [4] Terzaghi, K. *Der Grundbruch an Stauwerken und Seine Verhütung Forcheimer-Nummer*. 1922. Wasserkr, 17, pp. 445-449 ;
- [5] Raut, A.K. *Mathematical modelling of granular filter and constriction-based filter design criteria*. 2006. Thèse de doctorat de l'Université du Wollongong, Australie.
- [6] Karpoff, K. *The Use of Laboratory Tests to Develop Design Criteria for Protective Filter*. 1955. Proceedings 58th Annual Meeting ASTM, pp. 1183-1198.
- [7] Sherard, J., Dunningan, L., Talbot, J. *Basic Properties of Sand and Gravel Filters*. 1984. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 110(6) : 684-700.
- [8] Lafleur J. *Filter Testing of Broadly Graded Cohesionless Tills*. 1984. Canadian Geotechnical Journal 21 : 634-643.
- [9] Indraratna B., Locke M. *Analytical modeling and experimental verification of granular filter behaviour*. 2000. Keynote Paper, Filters and Drainage in Geotech. & GeoEnv. Eng., W. Wolski & J. Mlynarek (Eds.), Balkema, Rotterdam, pp.3-26.
- [10] Sjah, J., Vincens, E. *Determination of the constriction size distribution of granular filters by infiltration tests*. 2013. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics 37(10) : 1231-1246

Références

- [1] *Cadre guide pour un cahier des clauses techniques particulières (CCTP) Filtres plantés de roseaux*.