

VULNERABILITE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES A TRAVERS L'EROSION INTERNE. MODELISATION D'UN ECOULEMENT DIPHASIQUE ERODANT DANS UN MILIEU POREUX

A. CHETTI, A. HAZZAB, K. KORICHI

Laboratoire de modélisation et méthode de calcul,
Université Dr. Moulay Tahar de Saida BP 138 Ennasr Saida 20002 Algérie

Reçu le 29 Décembre 2009 – Accepté le 27 Avril 2011

Résumé

L'érosion interne est l'une des causes principales de rupture des ouvrages hydrauliques. Elle peut être développée sous forme de deux phénomènes fondamentaux à savoir le renard hydraulique et la suffusion, ils diffèrent par leurs conditions aux limites géométriques et hydrauliques, le risque de rupture est en conséquence différent. Le premier phénomène est le plus dangereux et le plus rapide, s'il n'est pas immédiatement stoppé, il conduit très rapidement à la rupture. Dans le second, la perméabilité du milieu est lentement modifiée et après une phase de développement ininterrompue, il peut y avoir rupture. En se basant sur une loi d'écoulement type Darcy et une loi d'érosion de Papamichos et enfin une loi d'évolution de la viscosité de fluide (relation d'Einstein), nous proposons une première approche de modélisation de la suffusion, par la mise en évidence de l'évolution dans le temps de la porosité moyenne de la matrice solide du milieu poreux, de la concentration du fluide en particules érodées, ainsi que l'évolution de la masse des particules érodées, tout en mettant en évidence l'influence de la variation des paramètres mécaniques et hydrauliques du sol sur cette évolution tel que le coefficient d'érosion, la porosité maximale ...etc. La résolution numérique du problème est réalisée par la méthode des différences finies. L'échantillon étudié est discrétisé en un ensemble de couches élémentaires. La couche élémentaire est référencée par l'indice j et l'instant par l'exposant i . Pour la discrétisation, on a adopté le schéma explicite décentré.

Les résultats de simulation indiquent que le phénomène de suffusion est fortement lié aux paramètres mécaniques et hydrauliques du sol à savoir le coefficient d'érosion, la porosité finale ϕ_{max} .

Mots clés : Renard hydraulique, suffusion, loi de Darcy, Equations de Navier Stokes, différences finies, concentration, particules érodées.

Abstract

Internal erosion is one of the main causes rupture of hydraulic works. It can be developed under form of two basic phenomena: piping erosion and suffusion, they differ in their geometrical and Hydraulic boundary conditions. The risk of rupture is consequently different. The first phenomenon is the most dangerous and fastest, if it is not immediately stopped; it leads (drove) very quickly to the failure. In the second, the permeability of the medium is slowly modified and after an uninterrupted phase of development, there (can) may be rupture. Relying on a Darcy flow and law erosion of Papamichos and a law of evolution of the viscosity fluid (Einstein relation), we propose a first approach for modeling the suffusion by the description of the evolution in time of the average porosity of the matrix solid porous medium, the concentration of fluid particles eroded, as well as the evolution of the mass of particles eroded, while highlighting the influence of changes in hydraulic and mechanical parameters of the ground on this development as that the coefficient of erosion, the maximum porosity ... etc. The numerical solution of the problem is done by the method of finite differences. The sample is discretized into a set of elementary layers. The basic layer is referenced by the index j and the time by exposing i . For the discretization, we adopted the explicit scheme decentered. The simulation results indicate that The suffusion phenomenon is strongly related to hydraulic and mechanical parameters of soil like the erosion coefficient and the final porosity ϕ_{max} .

Our work is based on the realization of a software using Matlab to study the static or dynamic, linear and rotary electric machines and more particularly the squirrel cage induction motor. These machines are the most common versions of classic electrical machines in every energy system. In this paper, we focus on the implementation of the LEC_RBR software developed in Electrotechnic Laboratory of Constantine for the determination of the electrical and the magnetic quantities in the squirrel cage induction motor.

Key words: Piping erosion, suffusion, Darcy law, Navier Stokes equations, finite difference, concentration, eroded particle.

التآكل الداخلي هو أحد الأسباب الرئيسية لانحيار المنشآت الهيدروليكية. حيث يمكن أن يحدث ذلك من خلال ظاهرتين أساسيتين ألا وهما :
أو ما يسمى بمنفذ الثلج المائي (Renard hydraulique) ، و ثانيهما ظاهرة إنجراف الجسيمات الدقيقة من كتلة الأرض المشكلة للمنشأة أو ما يسمى بـ Suffusion حيث أن هاتين الظاهرتين و إن تشابهتا في فعل التآكل الداخلي للمنشأة إلا أنهما يختلفان في ظروف و مراحل تطور كل من ههما، الأولى تعد الأخطر و الأسرع، إن لم تتخذ إجراءات أنبية لوقفا فقد يتطور الأمر إلى حد انحيار المنشأة . الظاهرة الثانية تعتبر أبداً حيث أن نفاذية الوسط تتغير شيئاً فشيئاً و بعد فترة متواصلة من النحت يتم افراغ الوسط جزئياً أو كلياً من حبيباته الدقيقة إلى أن يحدث الإنحيار الكلي.
نقدم كافتراح أولي نموذجاً رقمياً لظاهرة Suffusion يدرس التطور الزمني لكل من مسامية الوسط، تركيز السائل من حيث الجسيمات الدقيقة المنجرفة، و أخيراً كتلة الجسيمات الصلبة المنجرفة المنحوتة مع الأخذ بعين الإعتبار تأثير تغير كافة الخصائص الميكانيكية و الهيدروليكية لنوع الأرض المشكلة للمنشأة على سبيل المثال لا الحصر: الحد الأقصى للمسامية.....

الحل الرقمي للمسألة أنجز بطريقة الفوارق المحدودة. عينة التربة المعنية بالدراسة قسمت إلى مجموعة من الطبقات الابتدائية، و كل i فيما يخص التقسيم اعتمدنا على طريقة البيان الظاهر اللامركزي.

الرقمية تبين أن ظاهرة Suffusion مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بالخصائص الميكانيكية و الهيدروليكية و هما ، و المسامية النهائية ϕ_{max} .

الكلمات المفتاحية: المحرك غير المتزامن ذو قصص السنجاب , *Matlab* , (LEC_RBR)

L'histoire des barrages est marquée par des accidents qui témoignent de la violence dévastatrice de l'eau. La seconde moitié du dix-neuvième et le vingtième siècle ont été jalonnés de divers cas de ruptures de barrages catastrophiques.

L'érosion interne est l'une des principales causes de rupture d'ouvrages en terre, elle est définie comme étant la migration des particules détachées sous l'action d'un écoulement d'infiltration dans le sol ou dans l'ouvrage, ce qui modifie les propriétés mécaniques et hydrauliques du matériau, notamment la perméabilité de l'ouvrage en terre. La modification de cette caractéristique intrinsèque a pour conséquence, une perte d'étanchéité ou une surpression interstitielle. Un tel désordre de ce milieu poreux peut être le facteur déclenchant d'une rupture d'ouvrage.

Les sols les plus vulnérables à la suffusion sont les sols à granulométrie étalée. Dans ces milieux les éléments fins sans cohésion sont transportés en premier, et ainsi, le sol s'appauvrit en fines et devient plus perméable. Par conséquent, les vitesses de percolation deviennent de plus en plus agressives et entraînent finalement la déstabilisation des particules cohésives. Le processus peut se poursuivre impunément pendant des années, ou même des dizaines d'années, jusqu'à laisser place à un sol squelettique dans lequel les débits de fuite deviennent suffisamment importante pour exiger une intervention immédiate pour éviter le risque de rupture. Parfois, la structure très appauvrie en fines s'effondrera sur elle même. Pour se prévenir de ce risque potentiel, un filtre exécuté suivant les critères de bonne conception, reste le meilleur moyen pour lutter contre la suffusion, ce filtre doit assurer deux rôles essentiels: Bloquer la migration des particules fines éventuellement entraînées par l'écoulement d'infiltration et permettre le drainage des eaux souterraines, pour éviter l'augmentation des pressions interstitielles. Donc il doit avoir une granulométrie étroite.

Cependant, il existe peu de modèles numériques permettant de décrire l'érosion interne des milieux poreux. D'où la nécessité de la présente étude, dont l'objectif est de modéliser le phénomène de la suffusion.

Pour l'étude de ce phénomène il s'agit de connaître d'une part le gradient hydraulique et la vitesse critique à partir desquels la suffusion est initiée et d'autre part la loi de transport des particules fines.

Les essais sont effectués soit à débit constant, soit à gradient hydraulique constant. Les essais à débit constant ne sont pas représentatifs de la réalité d'un barrage, car sur site, le gradient hydraulique varie peu (niveau amont quasi-constant).

Toutefois dans les essais à débit constant, la perméabilité du milieu diminue légèrement et régulièrement avec le temps. Le colmatage progressif dans le milieu provoque certainement une augmentation de la pression dans les zones où il y a blocage. Lorsque cette pression est suffisamment élevée, des particules de plus en plus importantes sont arrachées et transportées vers des couches avales ou évacuées à l'extérieur de la matrice de sol.

Par contre, dans les essais à charge constante, le processus d'érosion, est accompagné d'une chute de perméabilité plus importante indiquant la formation de zones de blocage et de colmatage dans le milieu. Pour un même débit d'écoulement initial, la perméabilité du milieu sollicité hydrauliquement à débit constant reste toujours supérieure à celle mesurée dans l'essai à charge constante, S. Alhaddad et al. [1]

1. MODELE MATHEMATIQUE DE LA SUFFUSION : APPROCHE MACROSCOPIQUE

Dans cette première approche de modélisation, on s'intéresse seulement à la modélisation monodimensionnelle de la migration des particules fines. Cette approche nous permet de s'affranchir de la discontinuité du sol à l'échelle des grains. L'équation de Navier Stokes est donc inapplicable telle quelle est en milieu poreux, puisqu'on connaît pas assez précisément ce qui se passe à l'échelle des pores au niveau des pressions et vitesses. On utilise donc une loi macroscopique reliant pression, vitesse, et force extérieure à l'échelle du VER. Il s'agit d'une loi expérimentale (loi de Darcy [02] en milieu poreux Fig. 1). Celle-ci est couplée à une loi d'érosion et une loi de comportement rhéologique.

1.1. Hypothèses et variables du modèle

L'échantillon initial (supposé isotrope) est représenté comme un volume élémentaire représentatif (VER), composé de deux phases distinctes et continues : La phase solide et le fluide (figure 1). Les volumes V_s et V_f représentent respectivement le volume de solide et le volume d'eau.

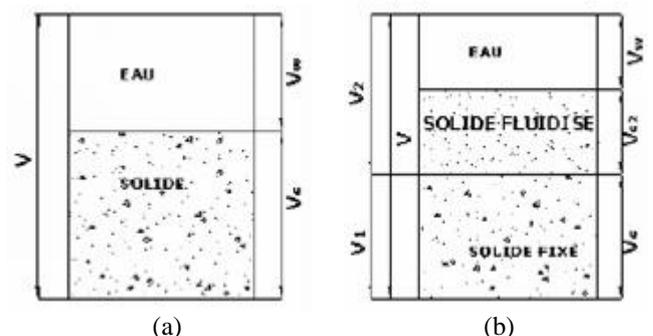


Figure 1 : Volume élémentaire représentatif (VER)

- (a) Représentation initiale
- (b) Représentation au cours de l'érosion

Avec l'initiation de l'érosion, le VER se transforme en trois phases:

- 1) Les particules solides de volume V_s
- 2) Le fluide f de volume V_f
- 3) Le solide fluidisé de volume V_{sf} (cf figure 1b).

Le volume des vides contient le fluide et le solide fluidisé ($V_v = V_f + V_{sf}$).

Les variables du modèle sont :

a) Porosité

$$\emptyset = \frac{V_v}{V} = \frac{V_f + V_{sf}}{V} \quad (1)$$

b) Concentration volumique solide globale (la compacité)

$$G = \frac{V_s}{V} = 1 - \emptyset \quad (2)$$

c) Concentration volumique du solide fluidisé

$$C = \frac{V_{sf}}{V_v} = \frac{V_{sf}}{V_f + V_{sf}} \quad (3)$$

d) Vitesses particulières

$$v_s = 0 \text{ (la matrice solide est supposée rigide)} \quad (4)$$

$$v_f = \frac{q_f}{(1 - C)\emptyset} \quad (5)$$

$$v_{sf} = \frac{\beta q_{sf}}{\emptyset C} \quad (6)$$

Avec :

- v_s : Vitesse de la phase solide ($m.s^{-1}$).
- v_f : Vitesse particulière du fluide ($m.s^{-1}$).
- v_{sf} : Vitesse particulière du solide fluidisé ($m.s^{-1}$).
- q_f : Vitesse de filtration de l'eau ($m.s^{-1}$).
- q_{sf} : Vitesse de filtration du solide fluidisé ($m.s^{-1}$).
- β : Coefficient de transport (traduisant la mobilité des particules solides par rapport au fluide)

Dans notre cas on suppose que $\beta = 1$, c'est-à-dire que :

$$V_{sf} = v_f \quad (7)$$

Et l'équation (6) peut s'écrire :

$$q_{sf} = \emptyset C v_{sf} \quad (8)$$

e) Vitesse de filtration du mélange fluide+particules ou vitesse de Darcy : q

Par définition la vitesse de Darcy ou vitesse de filtration du mélange fluide+particules est définie comme suit :

$$q = \emptyset(v_f - v_s) = \emptyset v_f \quad (9)$$

f) Densités partielles :

- Phase solide :

$$\frac{m_s}{V} = \rho_s \frac{V_s}{V} = \rho_s (1 - \emptyset) \quad (10)$$

- Phase fluide:

$$\frac{m_f}{V} = \rho_f \frac{V_f}{V} = \rho_f \frac{\emptyset \cdot V - V_{sf}}{V} = \rho_f (1 - C)\emptyset \quad (11)$$

- Phase solide fluidisé:

$$\frac{m_{sf}}{V} = \rho_s \frac{V_{sf}}{V} = \rho_s \frac{C \cdot \emptyset \cdot V}{V} = C \cdot \emptyset \cdot \rho_s \quad (12)$$

g) Densité du mélange:

$$\rho = \frac{m_f + m_{sf}}{V} = \emptyset \rho_f + C\emptyset(\rho_s - \rho_f) \quad (13)$$

1.2. Equations de bilan

L'équation de conservation de la phase solide s'écrit :

$$\frac{\partial(\emptyset \cdot \rho_s)}{\partial t} + \nabla(\rho_s \cdot v_s) = j \quad (14)$$

Où j : débit massique d'érosion par unité de volume [$kg.m^{-3}.s^{-1}$]

La vitesse et la masse volumique des grains de la phase solide étant supposées constantes, ainsi l'équation précédente se simplifie en :

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial t} = \frac{j}{\rho_s} \quad (15)$$

L'équation de conservation de la phase solide fluidisé s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{m_{sf}}{V} \right) + \nabla \left(\frac{m_{sf}}{V} \cdot v_{sf} \right) = j \quad (16)$$

En tenant compte de l'équation (12) et (8), l'équation précédente devient :

$$\frac{j}{\rho_s} = \frac{\partial}{\partial t} (C \cdot \emptyset) + \nabla (C \cdot \emptyset \cdot v_{sf}) = \frac{\partial}{\partial t} (C \cdot \emptyset) + \nabla (q_{sf}) \quad (17)$$

On retranchant les termes de l'équation (15) des termes de l'équation (17), on obtient l'équation de variation de la porosité en fonction du flux des particules érodées :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\emptyset(C - 1)] + \frac{\partial q_{sf}}{\partial x} = 0 \quad (18)$$

En tenant compte des équations (7), (8) et (9) l'équation précédente s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\emptyset(C - 1)] + \frac{\partial(\emptyset q)}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

Supposons que le débit fluide ne change pas le long de l'échantillon, on obtient, ainsi, l'équation de continuité du débit de filtration du mélange q (vitesse de Darcy) :

$$\frac{\delta q}{\delta x} = 0 \quad (20)$$

D'où l'équation (19) devient :

$$\frac{\partial}{\partial t} [\emptyset(C - 1)] + q \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad (21)$$

2. LOIS DE COMPORTEMENT

2.1. Loi d'écoulement

Sous un gradient i , le débit d'écoulement Q à travers une section A d'un milieu poreux peut être exprimé par la loi de Darcy [2] :

$$Q = k.A.i \quad (22)$$

où

k : Perméabilité hydraulique (m/s)

On peut définir une vitesse de Darcy ou vitesse de filtration :

$$q = \frac{Q}{A} = k.i \quad (23)$$

Le coefficient de perméabilité hydraulique k dépend de la nature du milieu poreux (porosité, forme et taille des pores, ...), mais aussi du fluide. Pour éliminer cette dépendance, une perméabilité intrinsèque peut être définie, telle que :

$$q = (K.\gamma/\mu)i \quad (24)$$

Où :

K : Perméabilité intrinsèque (m^2).

μ : Viscosité dynamique du mélange fluide-solide ($Kgm^{-1}s^{-1}$)

γ : Poids volumique du mélange solide-fluide ($N.m^{-3}$)

$i=constant$: dans notre cas il s'agit d'un essai à gradient hydraulique constant.

La formulation proposée par Kozeny-Carman (Barnichon [3]) permet de tenir compte de la variation de la perméabilité en fonction de la porosité ϕ :

$$K = C_k \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (25)$$

Avec:

C_k : Constante liée à la perméabilité intrinsèque initiale K_0 et la porosité initiale ϕ_0 par :

$$C_k = K_0 \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \quad (26)$$

D'où :

$$K = K_0 \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (27)$$

D'où :

$$q = K_0 \frac{\gamma}{\mu} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (28)$$

Par ailleurs :

$$K_0 = k_0 \frac{\mu_0}{\gamma_0} \quad (29)$$

Avec :

μ_0 : Viscosité initiale du mélange solide-fluide

γ_0 : Poids volumique initial du solide-fluide

Soit :

$$q = k_0 \frac{\mu_0 \gamma}{\gamma_0 \mu} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} \quad (30)$$

2.2. Loi d'érosion

Papamichos et al. [4] ont exprimé le débit massique par unité de volume (j) sous la forme :

$$\dot{m} = \lambda_p \rho_s (1-\phi) q \quad (31)$$

Avec :

λ_p : Coefficient empirique de Papamichos (m^{-1})

q : Vitesse de filtration (vitesse de Darcy) du mélange solide-fluide (m/s).

On substitue l'équation (15) dans (31) on obtient :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = \lambda_p (1-\phi) q \quad (32)$$

2.3. Loi de comportement rhéologique : Loi d'Einstein

La concentration du fluide interstitiel évolue au cours de l'érosion. Il importe de prendre en compte l'évolution de sa viscosité. La modification de cette viscosité est un phénomène complexe. Pour un fluide peu concentré de particules sphériques en mouvement lent, la relation d'Einstein [5] permet de relier l'évolution de la viscosité à la concentration de la solution :

$$\mu = \mu_0 (1 + 2.5.C) \quad (33)$$

Ainsi, l'équation (30) devient :

$$q = k_0 \frac{\gamma}{\gamma_0} \frac{1}{(1+2.5C)} \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} i \quad (34)$$

Sachant que :

$$\gamma = \gamma_f + C(\gamma_s - \gamma_f) \quad (35)$$

Avec :

γ : Poids volumique du mélange solide-fluide

γ_f : Poids volumique du fluide

γ_s : Poids volumique des particules solides

C : Concentration volumique

D'où l'équation (34) s'écrit :

$$q = k_0 \left[\frac{(\gamma_s/\gamma_f - 1)C + 1}{(1+2.5)} \right] \frac{(1-\phi_0)^2}{\phi_0^3} \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} i \quad (36)$$

Pour l'érosion de particules argileuses, le coefficient 2,5 pourrait être affiné dans une autre approche pour prendre en compte des fluides concentrés (Migniot [6]).

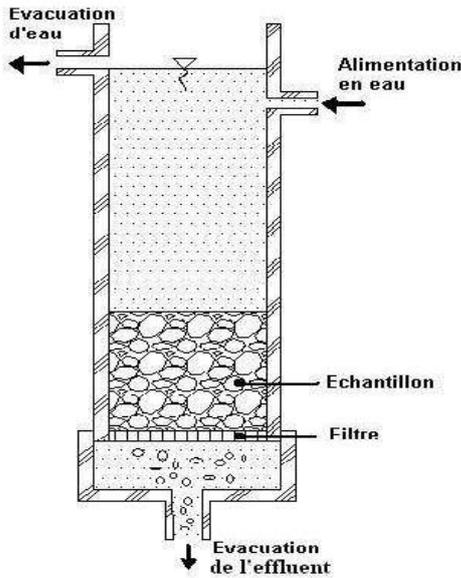


Figure 2 : Schéma d'un montage expérimental

3. DEFINITION DU SYSTEME A RESOUDRE

A partir des équations précédentes des lois d'écoulement, d'érosion et de comportement rhéologique, on obtient un système de deux équations différentielles à deux inconnues (la porosité ϕ et la concentration C des particules dans le fluide).

$$\begin{cases} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \lambda_p (1 - \phi) q \\ \frac{\partial}{\partial t} [\phi(1 - C)] = q \frac{\partial C}{\partial x} \end{cases}$$

Avec:

$$q = k_0 \left[\frac{(\gamma_s/\gamma_f - 1)C + 1}{(1 + 2.5C)} \right] \frac{(1 - \phi_0)^2}{\phi_0^3} \frac{\phi^3}{(1 - \phi)^2} i$$

4. RESOLUTION NUMERIQUE

La résolution numérique du problème est réalisée par la méthode des différences finies. L'échantillon étudié est discrétisé en un ensemble de couches élémentaires. La couche élémentaire est référencée par l'indice j et l'instant par l'exposant i .

On a deux conditions initiales : Initialement, la porosité est égale à la porosité initiale :

$$\phi(0, x) = \phi_0$$

Initialement, la concentration de solide du fluide sur toute la hauteur de l'échantillon est nulle (le fluide étant de l'eau claire) :

$$C(0, x) = C_0 = 0$$

Les conditions aux limites sont : En tête d'échantillon, pas de solide fixe ni fluidisé dans le fluide injecté :

$$\phi(t, 0) = 1; \quad C(t, 0) = 0$$

La concentration du solide dans le fluide à l'exutoire est égale à la concentration de la dernière couche :

$$C(t; H^+) = C(t; H)$$

Pour la discrétisation, on utilisera le schéma explicite décentré:

$$\begin{cases} \phi_j^{i+1} = \phi_j^i + \lambda \cdot \Delta t \cdot q_j^i (1 - \phi_j^i) \\ C_j^{i+1} = 1 - \frac{\phi_j^i}{\phi_j^{i+1}} (1 - C_j^i) - \frac{\Delta t \cdot q_j^i}{\Delta x \cdot \phi_j^{i+1}} (C_j^i - C_{j-1}^i) \\ q = k_0 \left[\frac{(\gamma_s/\gamma_f - 1)C_j^i + 1}{(1 + 2.5C_j^i)} \right] \frac{(1 - \phi_j^i)^2}{\phi_j^{i3}} \frac{\phi_j^{i3}}{(1 - \phi_j^i)^2} i \end{cases}$$

5. RESULTATS ET COMMENTAIRES:

5.1. Effet de la variation des paramètres du modèle

5.1.1. L'effet de la variation du coefficient d'érosion

L'influence de la variation du coefficient d'érosion sur la convergence du modèle, est traitée à travers la variation instantanée de la porosité, de la concentration et de la masse cumulée du solide érodée. Cette influence est étudiée en tenant compte de la valeur maximale de la porosité, identifiée par Bendahmane [7] :

$$\phi_{max} = 0.33002.$$

La masse érodée cumulée est calculée par :

$$m = \rho_s \int_0^t C \cdot V \cdot dt$$

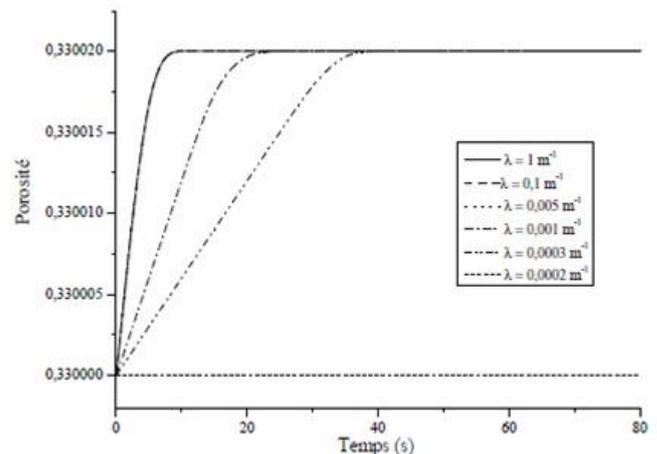


Figure 3 : Évolution de la porosité moyenne en fonction du temps pour différentes valeurs de λ

La figure 4 montre que pour les valeurs de λ inférieures à 0.0003 m⁻¹, on obtient une concentration nulle (la courbe d'évolution instantanée de la concentration pour $\lambda = 0.0002$ m⁻¹), et par la suite il n'y a pas de variation de porosité (figure 3) : La courbe d'évolution instantanée de la porosité pour $\lambda = 0.0003$ m⁻¹ est une valeur critique, au-dessous de laquelle il n'y a pas d'érosion.

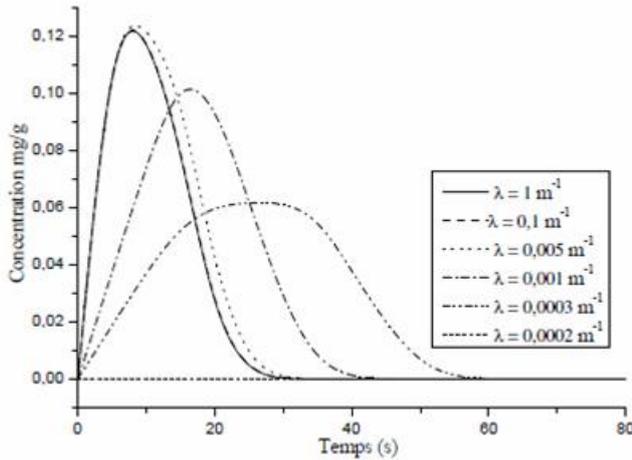


Figure 4 : Évolution de la concentration du solide fluidisé en fonction du temps pour différentes valeurs de λ

On constate une bonne convergence de la concentration et de la masse érodée finale, pour des valeurs de comprises entre $3 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ et 10^{-1} m^{-1} .

On remarque que le coefficient d'érosion n'a pas d'influence significative sur la masse érodée cumulée. Sauf sur la durée pour atteindre la masse érodée finale qui est constante pour n'importe quelle valeur de λ (figure 5).

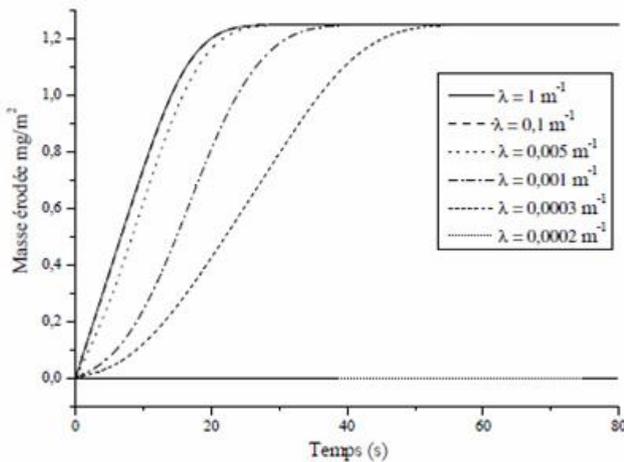


Figure 5 : Évolution de la masse érodée pour différentes valeurs de λ

Toutefois, on note que lorsque le coefficient d'érosion, dépasse la valeur 10^{-1} m^{-1} , les courbes d'évolution instantanée de la concentration deviennent confondues (figure 4: Pour $\lambda = 10^{-1} \text{ m}^{-1}$ et $\lambda = 1 \text{ m}^{-1}$). Donc, au-delà d'une valeur 10^{-1} m^{-1} , le coefficient d'érosion n'a plus d'influence sur l'évolution de la concentration du solide fluidisé et par conséquent sur la masse érodée (figure 4 et 5).

Cela peut être expliqué par le fait que le modèle établi est bien adapté au phénomène de la suffusion qu'est un phénomène relativement lent. C'est-à-dire qu'il apparaît sous une condition de cinétique d'érosion plus modérée que celle du phénomène de renard par exemple. Celui-ci est plus rapide, et il est décrit par des lois catégoriquement différentes de celle de la suffusion.

6.1.2. Effet de la variation de la porosité maximale ϕ_{\max}

L'influence de la variation de la porosité maximale ϕ_{\max} , c'est à dire la porosité finale, sur la convergence du modèle est traitée à travers la variation instantanée de la porosité, de la concentration et de la masse cumulée du solide érodé.

D'après Bendahmane [7], la porosité maximale (finale) peut être déterminée expérimentalement en fonction de la masse érodée finale, tout en supposant la constance du volume de l'échantillon. On a jugé utile d'étudier l'influence de la variation de cette porosité maximale ϕ_{\max} , sur l'évolution instantanée de la concentration en solide fluidisé, et sur la masse cumulée du solide érodé.

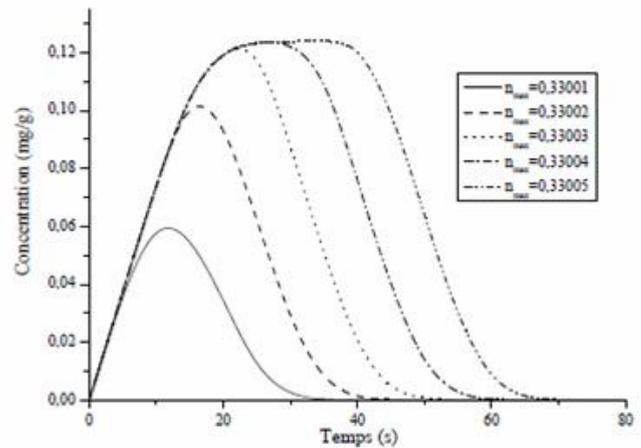


Figure 6 : Évolution de la concentration en fonction du temps pour différentes valeurs de ϕ_{\max}

Les figures 6 et 7 représentent respectivement l'évolution instantanée de la concentration et de la masse cumulée du solide érodé.

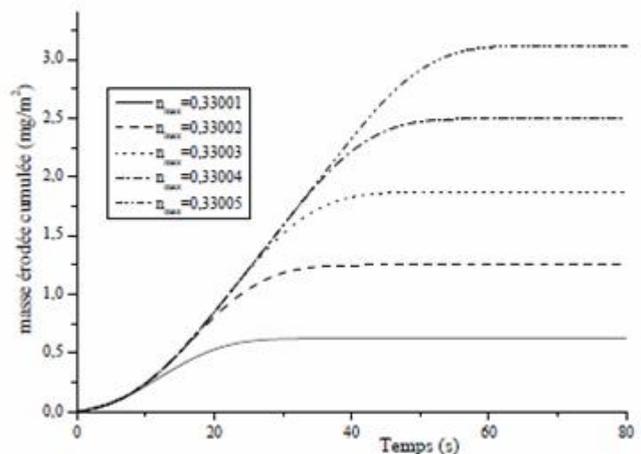


Figure 7 : Évolution de la masse érodée en fonction du temps pour différentes valeurs de ϕ_{\max}

Sachant que la porosité initiale de l'échantillon est $\phi_0 = 0.33$, on applique dans notre modèle des légères variations du critère d'arrêt numérique de la porosité maximale ϕ_{\max} , de l'ordre de 10^{-5} .

On se limite aux valeurs suivantes :

- $\phi_{max} = 0.33001$
- $\phi_{max} = 0.33002$
- $\phi_{max} = 0.33003$
- $\phi_{max} = 0.33004$
- $\phi_{max} = 0.33005$

On constate une importante variation de la concentration du solide fluidisé (figure 6) ainsi que sur la masse érodée finale (figure 7). Telle qu'une variation de la porosité de l'ordre de 10^{-5} , provoque une variation presque doublée de la masse érodée finale. Donc plus le milieu est poreux plus il est érodible.

5.2. Bilans des effets de variations

Les résultats de simulation indiquent que Le phénomène de suffusion est fortement lié aux paramètres mécaniques et hydrauliques du sol (ϕ , ϕ_{max}) :

5.2.1. Le coefficient d'érosion

L'influence du coefficient d'érosion n'est plus significative au dessous d'un seuil minimal critique. Ce coefficient correspondant à la contrainte critique d'érosion propre à chaque sol, au dessous de laquelle il n'y a plus d'érosion. Par contre, en augmentant ce coefficient, l'érosion devient plus forte. Progressivement, on s'approche vers un phénomène d'érosion de mécanisme différent de celui de la suffusion tel que le phénomène de renard hydraulique. Un tel phénomène est géré par des lois catégoriquement différentes de celles de la suffusion.

5.2.2. La porosité finale ϕ_{max}

Une légère variation de la porosité connectée provoque une grande variation de la concentration et de la masse érodée. On conclut alors, que plus le milieu est poreux plus il est érodible.

5.3. Analyse comparative des résultats numériques et expérimentaux

Le modèle développé est expérimenté numériquement pour la simulation du phénomène de la suffusion. La base expérimentale prise en considération pour valider le modèle, correspond aux résultats obtenus par les essais de Bendahmane [7]. Ces résultats permettent notamment la validité du modèle développé.

Lors des mesures expérimentales effectuées par Bendahmane [7], avec un échantillon dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Échantillon contenant 10% d'argile
- Confiné sous 200 kPa
- Soumis à un gradient hydraulique de 20 m/m
- Hauteur de l'échantillon = 0,03 m
- Section de l'échantillon = 50 mm²

Bendahmane [7] a identifié les valeurs caractéristiques de l'état initial et la valeur maximale de la porosité :

- Perméabilité initiale $k_0 = 3 \cdot 10^{-4} m/s$
- Porosité initiale $\phi_0 = 0,33$

- Porosité maximale $\phi_{max} = 0,33002$ (calculée en fonction de la masse érodée, tout en supposant la constance du volume de l'échantillon).

De notre part, nous adoptons ces valeurs, Pour se permettre la comparaison des résultats du modèle numérique avec ceux de ces essais expérimentaux.

Les mesures effectuées pendant les essais expérimentaux de suffusion (Bendahmane [7]), ont marqué l'extrême faiblesse des masses érodées.

Pour cette étude de convergence, le coefficient k , lié à la loi d'érosion, est fixé à $3 \cdot 10^{-3} m^{-1}$, conformément à la valeur présentée par Papamichos et al. [04].

La masse érodée est calculée par :

$$m = \rho_s \int_0^t C.V. dt$$

L'étude de la convergence est réalisée sur les deux variables calculés, à savoir :

- L'évolution de la porosité en fonction du temps
- L'évolution de la concentration en bas de l'échantillon.

Il s'agit donc des seuls paramètres quantifiables expérimentalement caractérisant l'érosion interne par suffusion.

Les figures 8 et 9, nous permettent de comparer les résultats de notre modèle numérique, avec les résultats expérimentaux de l'étude paramétrique de (Bendahmane [7])

La figure 8, montre la bonne convergence entre les résultats expérimentaux et le modèle numérique de l'évolution instantanée de la concentration du fluide en particules érodées.

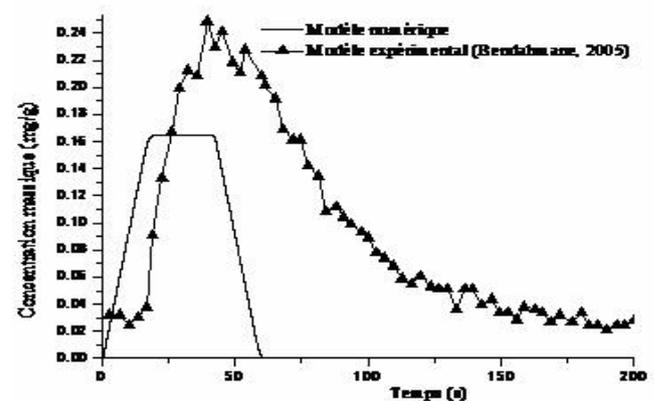


Figure 8 : Comparaison de la concentration en particules érodées entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux (Bendahmane, 2005).

La masse érodée cumulée dépend de la concentration de l'effluent et du débit d'eau injectée. La figure 8 nous permet de confronter résultats expérimentaux / modèle numérique de l'évolution instantanée de la masse érodée cumulée.

On constate globalement que les évolutions de la concentration et de la masse érodée sont proches aux résultats expérimentaux :

- Pour la concentration : Accroissement jusqu'à une valeur maximale d'environ $0,16 \text{ mg/g}$ à environ 17 s puis une stabilité d'environ 25 seconde , ensuite une diminution (figure 8).
- Pour la masse érodée cumulée : accroissement jusqu'à une valeur asymptotique.

Ce modèle de base permet donc d'obtenir des allures représentatives du phénomène de suffusion, observé expérimentalement.

Toutefois, pour l'évolution calculée de la masse érodée cumulée, le modèle développé aboutit à une valeur finale nettement supérieure à celle de l'expérimentation. Ceci montre que cette première version du code nécessite plus d'évolution, du moment qu'il ne tient pas compte du phénomène de dépôt partiel des particules érodées. Suivant ce processus, une partie des fines érodées de la partie supérieure de l'échantillon, pourrait subir une déposition, dans la partie inférieure de l'échantillon (figure 9). Par la suite, elle contribue au colmatage des pores principaux de cette partie de l'échantillon. Ce colmatage modifie très fortement la perméabilité locale et par conséquent la perméabilité globale. Il ne reste qu'une partie des fines qui contribuerait à l'augmentation de la masse érodée en sortant de l'échantillon, ce qui est justifiée expérimentalement.

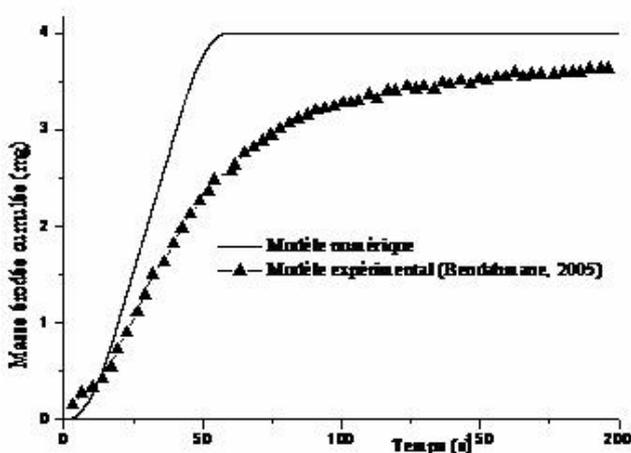


Figure 9 : Comparaison de la masse érodée cumulée entre le modèle numérique et les résultats expérimentaux (Bendahmane ; 2005)

Cette évolution complexe du phénomène de suffusion pourrait être modélisée par trois lois de comportement : Érosion + Transport + Dépôts. Les deux premières ayant été traitées dans cette étude de manière jugée satisfaisante. Le dépôt serait à intégrer par exemple en utilisant un critère de concentration en particules érodées, au dessus duquel il y aura dépôt.

L'établissement de cette loi de dépôt/colmatage, pourrait être envisagé par la réalisation d'essais à débit d'injection constant et non plus à gradient hydraulique

constant comme c'était le cas dans cette étude. Ce type d'essai, bien que moins représentatif des conditions réelles d'un ouvrage, permet dans le code de simplifier le couplage des effets de migration interne sur la perméabilité.

5.4. Bilan de l'analyse comparative

Nous avons présenté une première approche de modélisation du phénomène de suffusion basée sur une approche macroscopique. Ce modèle est résolu numériquement en différences finies 1D. L'étude de convergence du modèle développé a permis de définir les paramètres de discrétisation temporelle et spatiale. L'influence de la variation des paramètres physiques employés (ϕ , ϕ_{max}), est jugée par rapport à un essai expérimental de référence.

Les ordres de grandeurs et les allures de l'évolution simulée de la concentration et de masse érodée, s'ajustent avec les résultats expérimentaux, bien que le modèle n'est qu'une version de base, prenant en considération seulement l'érosion et le transport.

La prise en considération et l'interprétation des écarts entre le modèle numérique et le modèle expérimental, qui persistent notamment sur la masse érodée, nous orientent vers des perspectives d'évolution du code :

- Introduction d'une loi de dépôt couplée aux lois de transport et d'érosion.

- Amélioration voire suppression du critère d'arrêt de la porosité maximale ϕ_{max} qui n'est pas intrinsèque jusqu'ici. En effet les lois de comportement doivent elles même le prendre en considération.

- Reformulation du bilan de conservation permettant une variation volumique locale et globale de l'échantillon susceptible de réduire la porosité.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Nous avons donc tenté de concevoir un modèle numérique pour le phénomène de suffusion, et en tenant compte de la variation des différents paramètres hydrauliques et mécaniques. Quoiqu'établi par des hypothèses simplificatrices, ce modèle permet de tester rapidement la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques face aux phénomènes d'érosion interne par la suffusion. Ce modèle tient en considération les différents paramètres hydrauliques et mécaniques et montrent l'influence de chacun d'eux sur le processus d'érosion interne :

L'influence des paramètres hydrauliques et mécanique d'un sol donné sur l'érosion par suffusion, a été jugée par rapport à un essai expérimental de référence. Les ordres de grandeurs et les allures de l'évolution instantanée de la porosité, de la concentration et de la masse cumulée des particules érodées, sont cohérentes avec les résultats expérimentaux, bien que le modèle n'est qu'une version de base, ne prenant en considération que l'érosion et le transport. Toutefois, le développement du code est nécessaire pour mieux prendre en considération les écarts

entre le modèle numérique établi et le modèle physique, en tenant compte des :

- Phénomènes de sédimentation et de dépôt ;
- Variation volumique locale et globale de l'échantillon susceptible de réduire la porosité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:

- [1] S. Alhaddad, A. Alem, H.Wang, A. Benamar, and N. Ahfir. Effet des conditions hydrauliques et de la forme des grains sur l'érosion interne dans un milieu poreux. Technical report, Laboratoire Ondes et Milieu Complexes, FRE 3102 CNRS, Université du Havre, France.
- [2] Darcy H. Les fontaines publiques de la ville de Dijon, chapitre annexe D. Paris, 1856.
- [3] J. Barnichon. Contribution of the bounding surface plasticity to the simulation of gallery excavation in plastic clays. 5th international workshop on key issues in waste isolation research, , dec 2-4, Gauthier-Villars, Barcelona, 1998.
- [4] Papamichos, E. I. et al. Volumetric sand production model and experiment. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 25: pp 780–808, 2001.
- [5] Einstein A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. Annalen der Physik, 19, 289-306 (1906).
- [6] Migniot Synthèse des connaissances sur le tassement et la rhéologie des vases. Rapport 90p, Laboratoire Central d'Hydraulique de France, 1987.

- [7] Bendahmane F. Influence des interactions mécaniques eau-sol sur l'érosion interne. Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2005.

Liste des symboles:

k : Coefficient de perméabilité (m/s)

K : Perméabilité intrinsèque (m^2)

i : Gradient hydraulique (m/m)

\dot{m} (ou j): Débit massique d'érosion par unité de volume ($kgm^{-3}s^{-1}$)

ϕ : Porosité (.)

C : Concentration volumique en particules érodées (.)

v_s : Vitesse de la phase solide (m/s)

v_f : Vitesse particulaire du fluide (m/s)

v_{sf} : Vitesse particulaire du solide fluidisé (m/s)

q_f : Vitesse de filtration de l'eau ($m.s^{-1}$).

q_{sf} : Vitesse de filtration du solide fluidisé ($m.s^{-1}$).

V_s : Volume de la phase solide (m^3)

V_w : Volume de l'eau (m^3)

V_{s2} : Volume du solide fluidisé (m^3)

$\} _p$: Coefficient d'érosion de Papamichos (m^{-1})

\dots_f : Masse volumique du fluide (kg/m^3)

\dots_s : Masse volumique des particules solides (kg/m^3)

\sim : Viscosité du fluide à l'instant t ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)

\sim_0 : Viscosité initiale ($kg.m^{-1}.s^{-1}$)

γ : Coefficient de transport