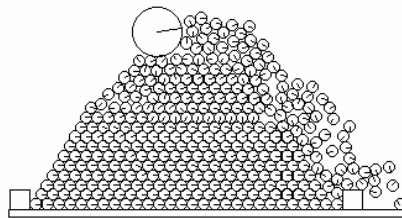


Rapport d'activité 2001

chute de bloc sur un merlon de protection : modélisation numérique et expérimentale en vue de l'amélioration du dimensionnement



Partenaires

- *Un laboratoire universitaire*
Dominique Daudon (coordinatrice), Jack Lanier
laboratoire 3S -université J. Fourier (coordonateur)
BP 53- 38041 Grenoble cedex 9
- *Un bureau d'ingénierie en risques naturels*
Pierre Plotto
IMSRN (Ingénierie des mouvements de sols et risques naturels) 640 rue Aristide Bergès 38330 MontBonnot Saint Martin

Introduction	5
I Modélisation numérique : introduction du collage dans le code de calcul Grain (Annexe 1)	5
I1 – Validation de la loi de « collage »	6
I2 – Choc d’un bloc sur un mur rectangulaire	6
I3 – Application au calcul d’un merlon	6
II Etude expérimentale : Essais de projection de bloc sur modèle réduit (annexe 2).....	7
II1-La campagne expérimentale.....	7
II2 Les simulations.....	8
II3 Résultats et Analyse	8
III Conclusion et perspectives	9
IV Valorisation scientifique (voir annexe 3)	9
Fiche de Synthèse	17

Introduction

Nos régions montagneuses sont particulièrement soumises aux aléas naturels, notamment les chutes de blocs. Les ouvrages de défenses passifs sont faciles à mettre en œuvre et permettent une protection journalière des activités humaines face à l'impossibilité de prévoir avec exactitude le déclenchement de l'aléa ainsi que l'ampleur du phénomène.

Ils sont encore souvent dimensionnés sans véritable analyse scientifique, de façon très subjective, en faisant appel plutôt au bon sens et la connaissance personnelle des bureaux d'études sollicités (essentiellement liées aux "retour d'expérience réelles") quant ce ne sont pas les contraintes du chantier.

L'étude proposée à la volonté de vouloir fiabiliser et rationaliser les méthodes de dimensionnement en étudiant le problème sous l'aspect scientifique à l'aide des outils de la mécanique. Elle emploiera pour cela les voies classiques de l'expérimentation sur modèle réduit et la simulation numérique à l'aide d'un code aux éléments discrets.

Dans un premier temps, le code Grain, code de recherche disponible à 3S permettant de simuler des milieux granulaires bidimensionnel sera complété d'une loi de contact « collant » avec seuil de rupture entre grains. Cette loi est destinée à prendre en compte l'aspect cohésif d'un sol granulaire. Une fois la description théorique du collage effectuée, l'implémentation sera faite dans le code. La validation est effectuée sur des cas simples, puis une simulation numérique d'un merlon est proposée.

Dans un deuxième temps des expérimentations sur modèle réduits seront effectuées à l'IMSRN. On décrira les différents essais, et quelques modélisations numériques correspondantes sont présentés. Une confrontation entre simulation et expérience est proposée.

Le travail effectué est décrit dans une version résumé. Elle fait référence chaque fois aux deux rapports rédigés par les étudiants qui ont réalisé le travail. Leurs rapports sont fournis en annexe, et le lecteur s'y reportera chaque fois qu'il sera nécessaire.

Ce travail a été présenté sous forme simplifiée, lors de la fête de la science 2001. On trouvera un exemplaire du poster et une photo du modèle réduit proposés aux visiteurs.

I Modélisation numérique : introduction du collage dans le code de calcul Grain (Annexe 1)

La simulation numérique du comportement d'un merlon lors de l'impact d'un bloc rocheux est un problème difficile à aborder par la mécanique des milieux continus. Une approche qui semble prometteuse est l'utilisation de la méthode des éléments distincts qui schématise le milieu par un ensemble de grains, chacun étant considéré comme un corps rigide dont le mouvement est défini par la relation fondamentale de la mécanique newtonienne. Cette approche permet en particulier de traiter le cas du choc du bloc sur le merlon, ce qui est la difficulté essentielle dans ce problème.

Le laboratoire 3S disposait initialement du code Grain-LMGC (élaboré par M.Jean, LMA Marseille) basé sur la méthode de « Dynamique des contacts » (JJ.Moreau, M.Jean). Dans ce code la gestion des contacts entre grains fait intervenir :

- la condition de non-pénétration (géométrie)
- la loi de Coulomb (frottement sec entre solide défini par un coefficient de frottement)

Les problèmes abordés sont à 2 dimensions, et les grains peuvent être circulaires ou rectangulaires.

Pour cette étude, l'introduction d'une loi de collage a été réalisée afin de pouvoir traiter le cas de maçonnerie ou de milieux granulaires avec cohésion. La nouvelle « rhéologie » de contact introduite est la suivante :

- si deux grains sont collés (ils ne forment qu'un seul solide) et leur action réciproque au point de contact est modélisée par une résultante (effort normal N et tangentiel T) et par un couple M .
- un critère de rupture $f(N,T,M) = 0$ tel que :
 - o si $f < 0$ le contact reste collé.
 - o si $f > 0$ le contact est rompu.

La programmation et la validation de cette nouvelle approche a été effectuée par Sylvain BAUDOIN au cours de son stage de fin d'année (Maîtrise de Mécanique, UJF, Grenoble) dont le rapport est joint en annexe.

I

II – Validation de la loi de « collage »

Pour valider les modifications introduites dans le code Grain-LMGC, quelques exemples simples ont été simulés, pour lesquels la comparaison avec des résultats analytiques peut être facilement effectuée :

- Rupture d'une poutre par flexion, effort normal, effort tranchant.
- Arrachement de grains dans une poutre (figure 1)

II2 – Choc d'un bloc sur un mur rectangulaire

Un mur est modélisé par un ensemble de 95 grains collés entre eux et sur un support rectangulaire (la fondation). Un bloc est modélisé par un disque et impacte le mur avec une vitesse horizontale de 10 m/s. La simulation numérique (figure 2) indique que, pour les propriétés de collage considérées, le mur ne peut pas résister : il y a rupture des liaisons entre grains et avec la fondation.

II3 – Application au calcul d'un merlon

Un merlon est modélisé par un tas de 886 grains collés entre eux et sur une plaque de fondation. Un bloc impacte ce merlon avec une vitesse horizontale de 50 m/s. La simulation numérique du choc indique que le merlon est partiellement détruit et que le bloc rebondit sur l'ouvrage pour continuer sa trajectoire avec une vitesse horizontale de 20 m/s (figure 3).

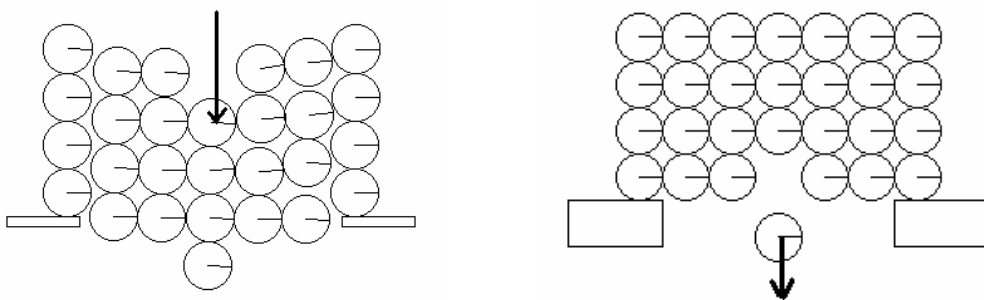


Figure 1 : Rupture d'une « poutre » formée de grains collés :
(a) par cisaillement (application d'une force sur la partie supérieure)
(b) par arrachement (application d'une force sur la partie inférieure)

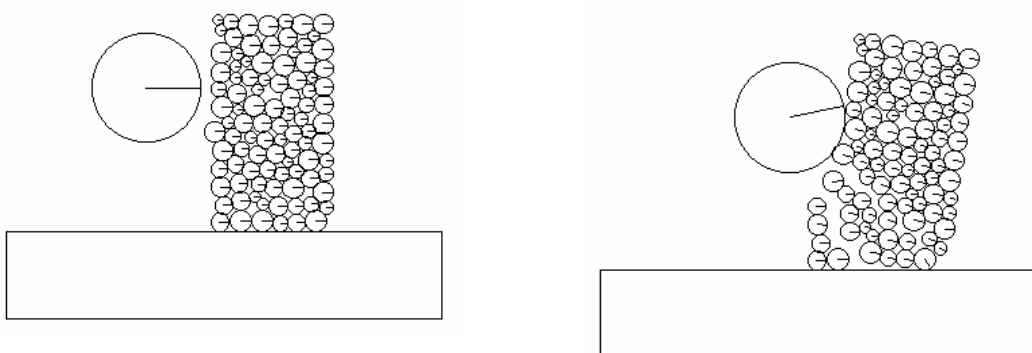


Figure 2 : Choc d'un bloc sur un mur formé de grains collés

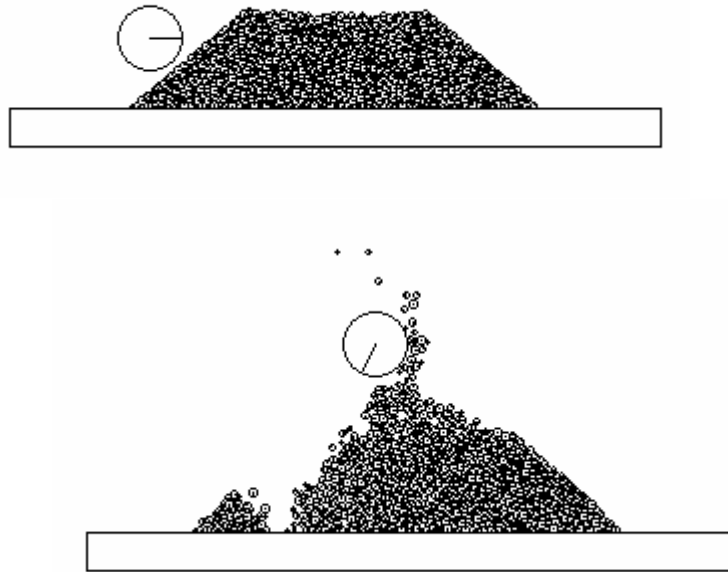


Figure 3 : Simulation numérique de l'impact d'un bloc sur un merlon constitué de 886 grains collés

II Etude expérimentale : Essais de projection de bloc sur modèle réduit (annexe 2)

L'objectif à court terme est le calage du code de calcul en vue de simulation multi-paramètres, pour étudier la destruction du merlon en fonction de l'énergie d'impact.

Les différents paramètres à étudier concernent l'énergie d'impact (la vitesse et la masse du bloc) et le merlon : son type (avec ou sans parement, sa forme) , la présence ou non de « collage » entre les éléments constitutifs, la granulométrie, la position de l'impact sur la hauteur du merlon. Dans le cadre de l'étude, nous avons pu faire varier la vitesse du bloc, ainsi que la granulométrie du merlon ; les autres paramètres n'ont pu être abordés faute de temps.

III-La campagne expérimentale

La campagne expérimentale s'est entièrement déroulée à l'IMSRN . Elle a été mise au point en collaboration étroite avec le Laboratoire 3S.

Le modèle réduit a été dimensionné à l'aide de simulations numériques préalables afin de définir les ordres de grandeur en relation avec le phénomène à étudier (vitesse du bloc de l'ordre de 10 m/s, taille variable)..

Le choix c'est porté sur un bloc rocheux représenté par une boule d'acier , pleine, de 13.9 kg, et de diamètre 150 mm ; plusieurs vitesses d'impact ont été testées : 6 m/s , 3m/s, 0.77 m/s. La boule est attachée par une corde légèrement élastique au plafond et lâchée sans vitesse initiale ce qui limite la vitesse maximale au point d'impact à 6 m/s. L'énergie cinétique correspondante est l'énergie transmis au point d'impact du merlon, à l'amortissement du choc près.

Le merlon est représenté par un empilement de tubes de 20 cm de long . Sa section a les dimensions approximatives d'un triangle équilatéral « écrêté » de 1m de base.

Deux granulométries différentes ont été testées : une granulométrie mono dimensionnelle donnant un assemblage régulier de 332 « tubes creux » de 3.2 cm de diamètre et une granulométrie bi dimensionnelle de tube de diamètre 3.2 cm et de tubes de diamètre 1.8 cm en proportion à peu près égale.

Aucun essai n'a été effectué avec des grains collés : expérimentalement nous n'avons pas encore trouvé une solution permettant d'assurer la régularité du collage, et sa non permanence de façon à reproduire en grand nombres les essais. Les tubes sont creux de manière à respecter la similitude entre la densité d'un merlon et par rapport à l'énergie du bloc impacteur.


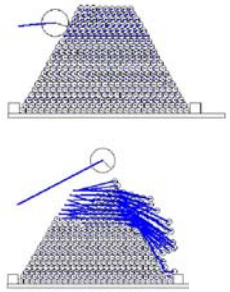
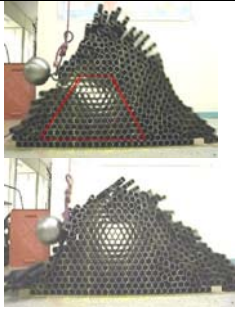
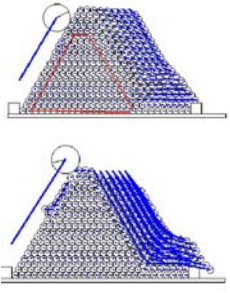

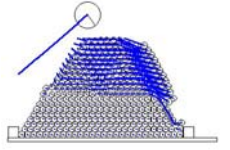
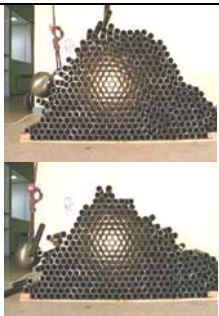
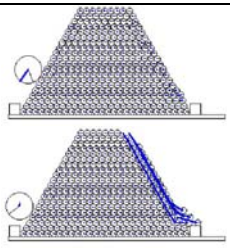

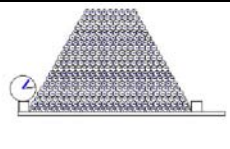
Différentes hauteurs d'impact ont été testées : au 1/3 supérieur du merlon, au 1/3 inférieur, et à la mi hauteur. L'ensemble des tests a été filmé numériquement grâce au Cemagref, et les images sont conservées en vue de traitement futur.

II2 Les simulations

Les simulations numériques ont été faites uniquement sur l'assemblage régulier de tubes (les positions initiales de chaque grain sont aisément connues et programmables) . Celles concernant la double granulométrie nécessitent une digitalisation préalable et n'ont pas été faites.

La simulation ne considère aucun collage entre les grains. Les autres paramètres (densité, dimension, position, ...) sont exactement ceux des essais expérimentaux. Le choc entre les éléments (bloc et grain) est non élastique ; (ce qui signifie que les éléments restent en contact après le choc)

II3 Résultats et Analyse

Modèle réduit		Simulation			
Vitesse d'impact	Hauteur impact	commentaire	commentaire		
6m/s	1/3 supérieur		Destruction du merlon dans la partie supérieure à l'impact L'impact crée une sorte d'éclatement des grains qui reviennent partiellement à leur position relative	Même comportement avec déplacements 10 fois plus faible et non apparition de l'éclatement .	
	1/3 inférieur		Destruction partie supérieure Apparition d'une zone morte. <i>Intégrité suffisante après impact pour considérer que la fonction de protection reste assurée dans le futur ?</i>	Apparition d'une zone morte plus grande Destruction plus faible car déplacement toujours plus faible	
	1/2 hauteur		Petite zone morte Destruction encore importante	Idem	
3m/s	1/3 inférieur		<i>Intégrité suffisante après impact pour considérer que la fonction de protection reste assurée dans le futur ?</i>	Très faible destruction au parement aval du merlon	
0.77 m/s	1/3 inférieur		Uniquement une sorte d'éclatement avec repositionnement Pas de destruction	Aucune destruction	

Dans l'ensemble, sur le plan qualitatif les simulations et les expériences sur modèle réduit sont en bonne corrélation.

Sur le plan quantitatif, les déplacements des simulations sont nettement inférieurs (10 à 30 fois). Le choc n'est pas pris correctement en compte dans les simulations (choc mou), ce qui explique probablement cette différence. D'autre part, dans les expériences, même si l'énergie d'impact est en partie absorbée comme le montre la trace sur le rouleau impacté, la surestimation des dégâts occasionnés par rapport à un cas réel, ne fait peu de doute. Un merlon en terre a certainement un comportement au choc plus proche du choc mou que d'un choc élastique. Les essais à double granulométrie ont simplement montré la difficulté de leur réalisation (empilement trop instable) et de leur simulation (laborieux travail de digitalisation à effectuer). Toutefois les premières simulations effectuées par Sylvain Baudoin avaient montré un comportement plus représentatif notamment vis à vis du choc (peu élastique).

En ce qui concerne les conclusions que l'on peut tirer en vue du dimensionnement des merlons protecteurs, il semble que pour les faibles énergies une base de 5 fois la taille du bloc soit suffisante.

Pour les fortes énergies, c'est la largeur au point d'impact qui doit être de cet ordre de grandeur. Tout ceci repose bien entendu sur un critère de destruction très qualitatif et visuel utilisé ci dessus.

III Conclusion et perspectives

Les simulations numériques semblent donner des résultats réalistes et applicables aux dimensionnements des ouvrages de protection. Une réelle validation ne pourra se faire qu'après comparaison avec des cas réels. L'introduction du collage avec seuil de rupture dans le code grain permet de traiter une gamme de problèmes beaucoup plus large qu'auparavant. A ce titre le financement de ce projet a ouvert des voies nouvelles d'exploration des divers problèmes reliés aux matériaux granulaires cohésifs (neige, glace, matériaux frittés, sols)

La loi de collage utilisée est encore « perfectible » ; Elle concerne chacune des possibilités de degré de liberté des mouvements des grains l'un par rapport à l'autre : traction (translation), cisaillement (glissement), moment (rotation). Elle met en jeu un critère de coulomb linéaire pour la résistance au cisaillement (2 paramètres : angle de frottement et cohésion) et un critère de résistance en Traction-Flexion (2 paramètres supplémentaires). Elle apportera l'existence d'un critère de rupture à seuil, vis à vis des efforts normaux, que tangentiels, ou enfin vis à vis du roulement par l'intermédiaire d'un moment limite existant entre deux grains.

La plus grande difficulté reste le calage de ces paramètres de rupture, afin d'être représentatif des valeurs de ruptures réelles des matériaux ; notamment vis à vis de la caractéristique en moment de la rupture.

Les premiers calculs sur systèmes simples, destinés à la validation de la loi de collage à seuil de rupture sont tout à fait positifs, et nous permettent de passer à des modélisations plus représentatives du phénomène étudié. Dans l'état actuel cet outil numérique peut permettre une étude paramétrique pour étudier l'influence de la vitesse du bloc, de sa masse, et de la géométrie du merlon (hauteur, largeur, pente du parement).

La deuxième partie du travail effectuée, orientée sur la réalisation de test en modèle réduit est elle aussi satisfaisante. Les assemblages de rouleaux tous identiques et le film semble assez similaire aux calculs correspondants ; Il reste toutefois à effectuer une étude détaillée de la correspondance à tout instant. L'analyse manuelle image par image par stéréophotogrammétrie de faux relief, est longue et fastidieuse et pour l'instant n'a pas été démarrée.

En conclusion, la partie préalable à l'étude paramétrique complète, a été réalisée avec succès.

En terme de perspective, il convient de prévoir de faire des études paramétriques en grand nombre afin de bien appréhender le rôle : de l'énergie cinétique et de l'angle d'incidence du bloc rocheux, mais aussi du mode de fabrication (avec ou sans parement, symétrique ou non) du merlon.

La connaissance de l'état de l'art en matière de méthodes de dimensionnement actuellement utilisées par les bureaux d'études apporterait une aide précieuse pour définir une méthodologie concernant les essais numériques.

On pourra alors fournir une aide au dimensionnement correcte, en définissant également des critères d'appréciations des dégradations supportables pour le bon fonctionnement de l'ouvrage.

IV Valorisation scientifique (voir annexe 3)

Fête de la science 2001: poster et expérience au 1/50ème

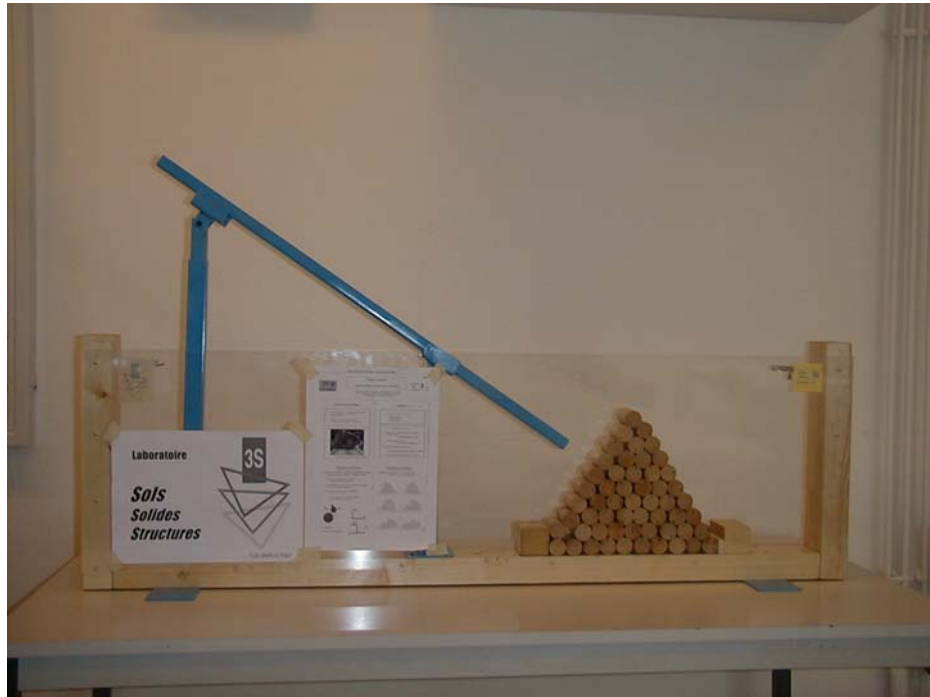
Remerciement

Les partenaires du projet souhaitent remercier le CEMAGREF qui a effectué toutes les prises de vues expérimentales, ainsi que les services des RTM qui ont répondu aux demandes d'informations des étudiants.

Annexe 1- introduction de la cohésion de contact
Rapport de Sylvain Baudoin

**Annexe 2 Expériences sur modèle réduit de chute de
bloc sur un merlon
Rapport de Estelle Borot**

Annexe 3 : fête de la science : photo du modèle réduit et du poster présenté.



Fiche de Synthèse

1-titre du projet

chute de bloc sur un merlon de protection : Modélisation numérique et expérimentale en vue de l'amélioration du dimensionnement

2-coordonateur du projet

Dominique DAUDON Maître de conférence - Laboratoire Sols Solides structures - BP 53 - 38041 Grenoble Cedex - téléphone 04 76 82 70 44 télécopie 04 76 82 70 00
Email : dominique.daudon@hmg.inpg.fr

3-liste des personnes et laboratoires /ou organismes collaborateurs au projet

Laboratoire 3S : Dominique DAUDON Maître de conférence
Jack LANIER Professeur
IMSRN : Pierre PLOTTO Gérant (ims-rn@alpes-net.fr)

4-financement du projet

Montant demandé : 70 KF

Montant minimal accepté : 45 KF

Coût total du projet : 331 KF (coût salariaux, déplacement, fonctionnement ...)

Autre financement : propre (salaires , fonctionnement général)

5-résumé du projet

Il s'agit d'étudier le comportement d'un merlon de protection de section triangulaire et pouvant être soumis à l'impact d'un bloc rocheux . On souhaite déterminer la largeur minimale du merlon à la hauteur de l'impact, en fonction de l'énergie d'impact (et plus précisément du couple Volume, Vitesse du bloc) afin que le merlon joue son rôle protecteur, et ne soit pas détruit.

Les paramètres étudiés sont :

- la largeur du merlon à l'impact , sa forme étant généralement prédéterminée par les contraintes de chantier.
- Le couple volume et vitesse du bloc, qui permettent d'avoir accès à l'énergie d'impact et également à l'effet d'échelle entre les 2 éléments .

Le programme de recherche propose comportera deux objectifs : une expérimentation sur modèle réduit en laboratoire et une modélisation numérique du phénomène. La mise au point des règles de dimensionnement sera faite dans un premier temps par le modèle physique qui permettra de dégager les grandes lignes du phénomène et caler les paramètres de la modélisation numérique . Les simulations numériques plus systématiques de sensibilité des paramètres permettront d'obtenir des règles de dimensionnement plus rationnelles.