

MODELISATION NUMERIQUE DE PROCESSUS DE TRANSPORT SEDIMENTAIRE EN RIVIERE

B. DEWALS

*Département d'Hydraulique et de Transport
Service d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions
Hydrauliques (HACH), Université de Liège, BELGIQUE¹*

1. INTRODUCTION

L'extraordinaire essor de l'informatique, qui perdure depuis plusieurs décennies sans laisser percevoir le moindre signe d'essoufflement, a permis un développement accéléré de techniques numériques variées dans d'innombrables domaines, dont le génie civil et l'hydrodynamique de surface. Outre des accroissements fréquents de la précision atteinte, du réalisme reproduit et de la distribution spatiale des écoulements étudiés, les progrès les plus récents engrangés au sein du HACH ont permis d'ouvrir la porte à une extension significative de l'éventail des phénomènes modélisés. Ce contexte de remise en question, voire de bouleversement, des limites du possible en matière simulations numériques en hydrodynamique de surface a été le berceau de l'étude présentée dans cet article. En effet, la très grande satisfaction apportée par l'aptitude des logiciels déjà développés (Suite WOLF de logiciels d'hydrodynamique et d'hydrologie appliquées) à appréhender l'hydrodynamique de rivière pure nous a poussé à nous intéresser à des écoulements sur lit érodable ainsi qu'à différentes configurations d'interaction fluide-structure, qui sont le siège de processus d'érosion marquée.

Le transport des alluvions joue un rôle capital dans la toute grande majorité des problèmes d'hydraulique fluviale et d'aménagement des cours d'eau. En effet, les mouvements de sédiments (érosion, transport et déposition) sont non seulement de nature à susciter des modifications drastiques des conditions d'écoulement, mais ils provoquent également des remaniements durables du lit, tant en ce qui concerne son élévation, que sa pente et sa rugosité. La protection d'une berge, par exemple, est susceptible d'initier une incision locale du lit de la rivière, qui, à son tour, peut conduire à l'affaissement de la rive [3].

Déjà au XIX^{ème} siècle, des travaux de correction du lit du Rhin (court-circuitage des méandres), destinés à prévenir en certains endroits les conséquences dévastatrices des crues, engendrèrent un enfoncement du lit, qui atteignit sept mètres de profondeur en aval de Bâle. Ultérieurement, de gigantesques essais de renforcement du débit solide furent opérés en déversant dans le fleuve des milliers de mètres cubes de gravier à l'aide de gabares à fond ouvrant. Ainsi, Un déficit sédimentaire se traduit par une érosion marquée lors de chaque crue alors qu'au contraire, une rivière caractérisée par un apport excessif en sédiments serait sujette à des débordements en raison du rehaussement du niveau du lit.

Parmi les innombrables applications possibles de l'étude menée ici, il faut également citer l'évaluation des risques relatifs à l'alluvionnement de grands lacs d'accumulation. La pérennité de l'ouvrage de retenue et des installations d'exploitation hydroélectrique est souvent mise en péril. Par exemple, des mesures bathymétriques effectuées dans la retenue de Mauvoisin (Suisse) indiquent un accroissement de la hauteur de sédiments d'environ 20 à 40 cm par année devant la vidange de

¹ Institut du Génie Civil, Chemin des Chevreuils, 1 - Bât.B52/3+1, B4000 Liège - Tél: 4 366 95 36 - Fax : 4 366 95 58

fond et la prise d'eau destinée à la centrale hydroélectrique. De même, le Rhin dépose annuellement trois millions de mètres cubes de matériaux solides dans le lac de Constance.

Finalement, comme la plupart des divers ouvrages hydrauliques sont à l'origine d'une modification permanente du transfert de charges solides, des impacts environnementaux et sécuritaires considérables sont à prévoir, et devront être évalués.

Ces problèmes sont formidablement complexes et interdépendants, si bien qu'il est important de les envisager conjointement avec les aspects hydrodynamiques proprement dit, dans une approche suffisamment couplée afin d'appréhender correctement la plus grande gamme possible de configurations d'écoulement. Cette stratégie de résolution unifiée et intégrée au sein d'une suite complète de codes de calcul d'écoulements à surface libre, constitue l'innovation de l'étude exposée ici et a permis d'accéder à de nombreuses simulations quasi-tridimensionnelles incluant la modélisation du transport solide par charriage.



Figure 1 - Essais sur modèle réduit au Laboratoire du HACH, visant à évaluer l'impact du fonctionnement des vannes d'évacuation de crue sur le lit immédiatement à l'aval d'un barrage. La photo de droite illustre les fosses d'affouillement observées à l'issue de l'expérience.

2. ETABLISSEMENT DU MODELE

En dépit de l'explosion des performances de l'informatique contemporaine, les simulations à grande échelle d'écoulements à surface libre (gestion de réseaux de rivières, maintenance de lacs de retenue, ...) sont presque exclusivement réalisées à l'aide de modèles *bidimensionnels*. En réalité, cette constatation n'est en rien paradoxale car l'approche privilégiée est étayée valablement par une argumentation théorique. En effet, un examen rigoureux des ordres de grandeur des termes intervenant dans les équations de bilan permet de démontrer, pour des cas de figure courants en hydrodynamique de surface, l'excellente validité d'une analyse bidimensionnelle. D'autre part, dans la toute grande majorité des applications réalistes, l'ingénieur praticien se soucie peu du détail de la structure tridimensionnelle d'un écoulement en rivière et seuls des résultats plus globaux se révèlent dignes d'intérêt.

2.1. LE MODELE MATHEMATIQUE

Tout comme pour un écoulement purement hydrodynamique, les équations régissant le mouvement d'un liquide chargé de particules sédimentaires sont fondées sur les lois de conservation de la masse d'une part et de l'impulsion d'autre part. Nous commençons par rappeler les équations des eaux peu profondes pour l'hydrodynamique pure. Elles s'apparentent à une forme intégrée sur la hauteur de la formulation de Reynolds des équations générales de la mécanique des fluides.

2.1.1. LE MODELE HYDRODYNAMIQUE

Pour que la description instationnaire d'un écoulement à surface libre se réduise à un modèle bidimensionnel, une opération d'intégration sur la troisième direction spatiale doit être effectuée. Si la composante verticale de vitesse est suffisamment faible par rapport à la vitesse horizontale, de telle sorte que le carré de leur rapport puisse être négligé, alors seuls les termes de pression et de gravité subsistent dans l'équation dynamique selon la verticale. La distribution de pression obtenue correspond à la distribution hydrostatique. Bien que ces conditions puissent ne pas être justifiées localement dans le cadre de certaines applications traitées, leur influence se révèle assez faible et localisée. Il est essentiel de noter qu'aucune limitation n'est introduite sur la pente moyenne du cours d'eau [6].

A l'issue de l'opération d'intégration sur la hauteur, le bilan de masse d'eau prend la forme simple :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

et la formulation conservative des équations de quantité de mouvement obtenues s'écrit :

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(hu^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + \frac{\partial}{\partial y} (huv) + gh \frac{\partial z_b}{\partial x} = - \frac{\tau_{bx}}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (huv) + \frac{\partial}{\partial y} \left(hv^2 + \frac{1}{2} gh^2 \right) + gh \frac{\partial z_b}{\partial y} = - \frac{\tau_{by}}{\rho} \quad (3)$$

avec:

g	accélération de la gravité,
h	hauteur d'eau,
n	coefficient de frottement de Manning,
hu et hv	débits liquides selon x et selon y,
t	temps,
u et v	vitesse selon x et selon y,
x et y	coordonnées spatiales,
z_b	niveau du lit,
ρ	densité de l'eau,
τ_{bx}	tension au niveau du lit.

2.1.2. LES FROTTEMENTS EXTERNES

Les composantes des tensions de frottement au sol sont données par les relations suivantes, analogues à la loi de Manning développée à une dimension :

$$\frac{\tau_{bx}}{\rho} = g h \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{2/3}} \quad (4)$$

$$\frac{\tau_{by}}{\rho} = g h \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{2/3}} \quad (5)$$

En pratique, ce terme intègre généralement les pertes liées non seulement aux frottements externes, mais également à différentes autres sources de dissipation d'énergie. Le paramètre intervenant dans la loi de frottement est donc calé de façon à englober également les pertes liées à la turbulence, à l'inégale répartition de vitesse selon la verticale, ou encore au transport solide. Un outil d'optimisation performant est disponible dans la suite de logiciels WOLF, permettant ainsi un calibrage objectif et automatique du coefficient de Manning.

2.2. LE TRANSPORT SOLIDE

Une description idéale des phénomènes de transport solide présenterait les caractéristiques suivantes :

1. traitement instationnaire complet des phénomènes sédimentaires et hydrodynamiques;
2. distinction entre le transport par suspension et le charriage;
3. prise en compte de sédiments différenciés en plusieurs classes granulométriques, afin de mettre en évidence d'éventuels processus de tri granulométrique et de pavage.

Néanmoins, il existe de nombreuses applications pour lesquelles certaines simplifications peuvent être légitimement admises. Ces simplifications relèvent même parfois d'une nécessité afin d'éviter un coût de calcul prohibitif. Par exemple, le traitement stationnaire de l'hydrodynamique, qui suppose que l'écoulement fluide s'adapte instantanément aux modifications topographiques, serait justifié et pourrait être mis à profit dans l'étude de l'évolution à long terme de la forme en plan d'un cours d'eau. De même, si le lit de la rivière est le siège de processus érosifs particulièrement intenses, les grains seront tous emportés, indépendamment de leur taille et, par voie de conséquence, l'approximation de la granulométrie réelle par un diamètre de grain moyen conduit à une description adéquate du phénomène.

Nous n'avons pas voulu nous limiter à l'un ou l'autre modèle simplifié (hydraulique quasi-stationnaire ou uniforme) qui ne s'avérerait approprié que pour certains régimes d'écoulement particuliers. Au contraire, un modèle hydrodynamique complet a été retenu afin de pouvoir traiter des cas de figure d'intérêt pratique très généraux. En revanche, l'éventail des phénomènes sédimentaires modélisés a été restreint aux écoulements où le transport solide par charriage de tous les grains est dominant. Ce choix, loin d'être arbitraire, a été guidé par l'ambition ultime du travail, qui est la simulation d'écoulements intenses. Dans ces conditions, où l'advection s'avère incontestablement dominante, les sédiments sont tous mis en mouvement, quelles que soient leurs propriétés granulométriques.

En conséquence, l'évolution du niveau du lit érodable sera déterminée à l'aide du bilan de masse des sédiments charriés :

$$(1 - p) \frac{\partial z_b}{\partial t} + \frac{\partial q_{bx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{by}}{\partial y} = S \quad (6)$$

où p désigne la porosité des sédiments et S est un terme source rendant compte d'un éventuel apport ($S > 0$) ou retrait ($S < 0$) local de matériaux solides. q_{bx} et q_{by} représentent les débits solides dans les deux directions.

2.3. LES LOIS DE TRANSPORT SOLIDE

L'expression du débit solide en termes des variables hydrodynamiques (vitesses et hauteurs d'eau) s'appelle la *loi de transport solide*. Ces formules permettent de connaître la *capacité* de transport sédimentaire d'un écoulement donné. En toute généralité, l'apport effectif en sédiments peut ne pas correspondre à cette capacité de transport, auquel cas le processus de transport ne sera pas en équilibre et engendrera soit un mécanisme d'érosion, soit de la déposition de sédiments.

La prédiction du taux de transport solide a toujours préoccupé de nombreux corps de métier, parmi lesquels les ingénieurs, les agronomes ou encore les spécialistes de l'environnement, si bien qu'un grand nombre de méthodes ont été développées à cette fin depuis plus d'un siècle. Une des formules les plus fiables pour la détermination quantitative du transport de sédiments a été élaborée par Meyer-Peter et Müller sur base de résultats expérimentaux. Elle a été mise à profit dans le cadre de

l'étude présentée ici. La suite de logiciels WOLF offre néanmoins la possibilité à l'utilisateur de recourir à n'importe quelle autre loi de capacité de transport solide.

2.4. LES GLISSEMENTS DE TERRAIN

Il est intéressant d'observer que, selon les situations, différentes origines de la mise en mouvement des sédiments peuvent être identifiées. Ainsi, le déplacement des sédiments peut résulter non seulement de l'action des forces d'origine hydrodynamique, mais aussi de la gravité ou encore d'une combinaison de ces deux moteurs. Par exemple, au moment où une berge s'affaisse ou bien lorsqu'une digue se rompt, même si l'eau influence indirectement, le véritable instigateur du processus s'identifie à la gravité.

La modélisation de ce type de phénomène mériterait éventuellement la mise en oeuvre d'une analyse géotechnique approfondie, basée sur les différents mécanismes possibles pour l'affaissement du talus. Dans le cadre de l'étude présentée ici, une approche plus compétitive en temps de calcul et conduisant à des résultats très réalistes a été adoptée. Elle consiste à admettre que, dès qu'une partie de la berge devient localement instable (car son inclinaison dépasse un angle limite γ_{cr}), de la matière va être transférée d'un élément à l'élément voisin de façon à ramener la valeur de l'inclinaison à *l'angle naturel de talus* γ_{nat} .

3. LA SUITE DE LOGICIELS WOLF ET L'INTERFACE DE TRAVAIL

Le modèle présenté précédemment est intégré au sein d'une suite complète de programmes hydrologiques et hydrodynamiques, baptisée WOLF, et développée par le HACH pour traiter tout écoulement de surface. Modéliser complètement la filière suivie par la goutte de pluie est une tendance relativement nouvelle pour des bassins réels, qui s'explique par l'augmentation sensible des capacités de calcul et de stockage des ordinateurs. WOLF est un environnement d'outils spécifiques d'analyse de l'hydraulique des bassins versants (WOLFHYDRO) et des réseaux de rivières (WOLF 1D), spécialisé dans l'optimisation du design hydraulique (WOLF 2D), dans l'optique générale d'une meilleure gestion des ressources en eau.

Dans le domaine de l'hydrologie de surface et de la gestion des bassins versants, le développement de modèles physiquement basés résulte de la meilleure compréhension des phénomènes de ruissellement, ainsi que de la capacité à gérer informatiquement des modèles spatialement et temporellement distribués. Basé sur l'approximation de l'onde diffusive pour évaluer explicitement le ruissellement, l'écoulement hypodermique ainsi que le stockage profond, WOLFHYDRO travaille sur tout modèle numérique de terrain soumis à des variations spatiales et temporelles de précipitations en produisant automatiquement les limites du bassin versant et le filaire du réseau drainant de rivières pour calculer finalement les débits en tout point.

Dans le contexte d'une gestion globale d'un réseau de rivières quelconque, WOLF 1D intègre une nouvelle approche des écoulements en lits composés, calculant les deux composantes de l'écoulement avec évaluation explicite des échanges latéraux à chaque étape instationnaire. Son efficacité transparaît dans des calculs d'inondation, la régulation d'une succession de barrages mobiles ainsi que des simulations de gestion de cascades de centrales hydroélectriques [2].

Le logiciel WOLF 2D, incluant le transport solide, pour résoudre et illustrer les écoulements quasi-tridimensionnels s'impose comme outil de design en constructions hydrauliques et d'analyse de risques.

Un outil d'optimisation (WOLF AG), parfaitement intégré dans la suite de logiciels, permet un calibrage objectif et automatique de tous les paramètres physiques intervenant dans chacun des autres codes de calcul de la suite WOLF. Autrement dit, il offre la possibilité d'un bouclage automatique autour de chaque module cité précédemment. La stratégie innovatrice de recherche de

l'optimum se fonde sur le concept d'*algorithme génétique*, dont la généralité, inégalée par des programmes plus classiques, rend la méthode utilisée particulièrement concurrentielle.

L'approche unifiée par volumes finis, résolvant une formulation faible du système mathématique pour chaque code, garantit des solutions fiables en exploitant les notions très actuelles de reconstruction d'ordre élevé, de fractionnement des flux ou encore de limiteur. De ce fait, les ressauts, vitesses et hauteurs d'eau sont correctement localisés et reproduits. Cette fiabilité émerge notamment de multiples confrontations avec des solutions analytiques et des résultats acquis sur des modèles réduits réalisés au Laboratoire du HACH.

Une interface d'utilisation conviviale pour le modélisateur simplifie significativement toutes les tâches d'introduction des données et d'interprétation des résultats. Des technologies novatrices de visualisation 2D et 3D permettent une valorisation efficace des résultats de simulation.

La contribution de l'auteur au développement du logiciel se situe au niveau de l'intégration au sein de la suite WOLF d'un module de calcul de processus de transport solide. Cette démarche s'est accompagnée d'un travail de recherche détaillé concernant les aspects théoriques et numériques des modèles retenus. Des défis majeurs d'ordre numérique devaient également être relevés pour permettre l'implémentation d'un couplage complet entre les aspects hydrodynamiques et sédimentaires. A cet effet, un schéma numérique original a été développé et sa stabilité a fait l'objet d'une démonstration analytique. Ce schéma présente en outre l'énorme avantage de conserver inchangé tout le traitement des équations hydrodynamiques déjà présentes au sein du logiciel.

4. APPLICATIONS

4.1. ACCIDENT AU PARC NATIONAL DU COLORADO

La rupture d'un ouvrage de retenue à l'amont d'une vallée profonde dans le Parc National du Colorado (U.S.A.) le 15 juillet 1982 a engendré une érosion rapide et intense. Malgré la hauteur relativement modeste de la digue (8 mètres) la topographie de la vallée a subi un remaniement très significatif. Une fois arrivés à l'aval de cette gorge, les matériaux solides transportés se sont déposés pour constituer, dans la plaine de piémont, un cône de déjection encore visible actuellement (Figure 4).



Figure 2 - Topographie initiale (vue en plan) et échelle des altitudes, graduée en m.

Nous ne disposons pas d'informations détaillées concernant la topographie exacte de l'endroit avant l'accident, c'est pourquoi celle-ci a fait l'objet d'une schématisation délibérée au sein du modèle

numérique. La section transversale de la vallée est choisie triangulaire. La Figure 2 illustre le domaine de calcul et le code de dégradé de gris utilisé met en évidence le relief initial. L'objectif poursuivi lors de ces simulations consistait donc à démontrer la faculté du logiciel à reproduire, en topographie quelconque, des écoulements à effets érosifs d'extrême intensité.

Les simulations ont fourni les résultats présentés à la Figure 3. On peut y observer la progression du front de sédiments de l'amont vers l'aval jusqu'à ce qu'il débouche dans la plaine pour former finalement le cône de déjection. Il est donc légitime d'affirmer que le logiciel développé s'est révélé capable de refléter, au moins qualitativement, l'interaction marquée entre l'écoulement fluide et la dynamique géomorphologique du lit. Le cône de déjection prédit par le programme peut effectivement être observé sur les lieux de l'accident (Figure 4).

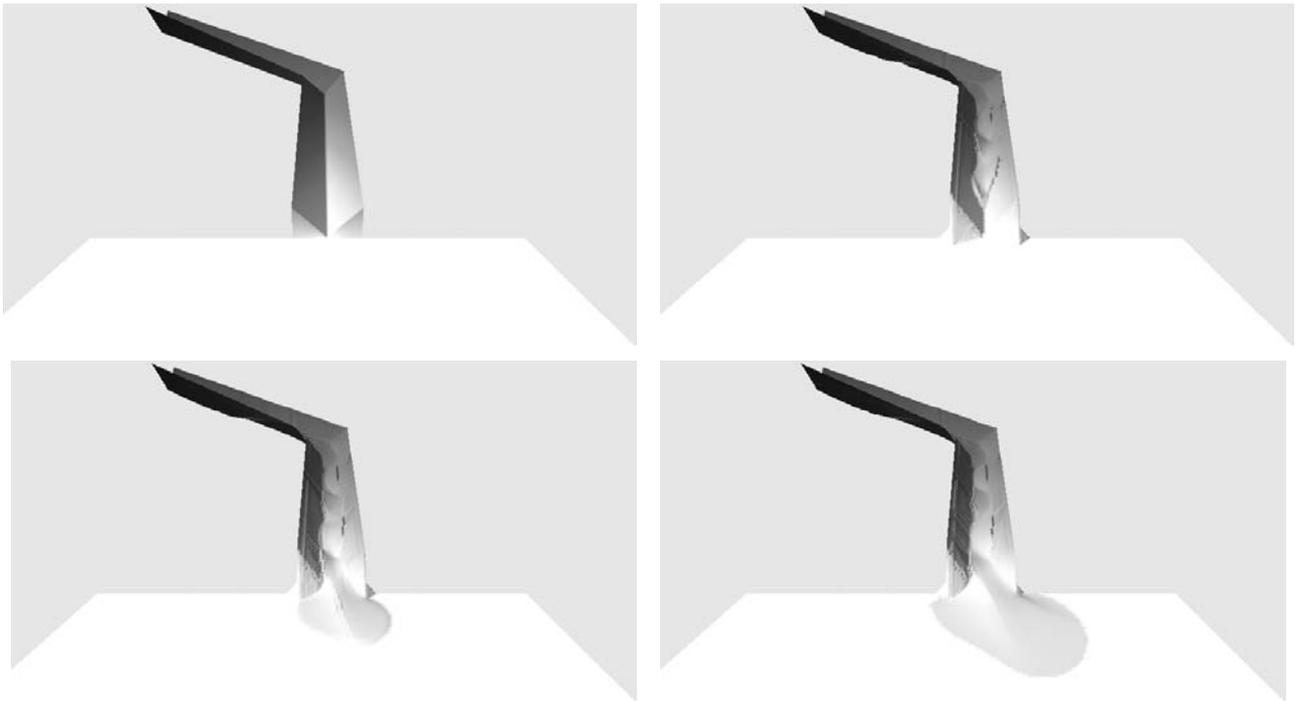


Figure 3 - Cône d'alluvions dans la plaine, consécutif au remaniement topographique de la vallée : topographie calculée 0 s, 15 s, 20 s et 25 s après la ruine de l'ouvrage de retenue en amont.



Figure 4 - Parc National du Colorado : vues du lieu de l'accident [5]. La première photo rend compte de l'importance du charriage dans la vallée amont. Le cône d'alluvions peut être distingué à gauche sur la seconde photo.

4.2. RUPTURE PROGRESSIVE DE DIGUE

4.2.1. CONTEXTE

L'évaluation classique des conséquences d'une rupture d'ouvrage hydraulique de retenue se fonde généralement sur l'hypothèse d'une ruine totale et instantanée de l'ouvrage sollicité auparavant à son amont par un volume d'eau pure. Il s'agit là du mode le plus extrême et le plus complexe à considérer au niveau de l'hydrodynamique seule, recommandé par la Commission Internationale des Grands Barrages (ICOLD, *International Commission on Large Dams*) pour les ouvrages en béton. Néanmoins, la ruine d'un ouvrage en remblai (e.g. digue en terre), nécessairement progressive, s'apparente à une rupture au cours de laquelle une brèche s'élargit et s'approfondit graduellement.

De prime abord, l'hydrogramme mesuré en aval présente initialement un pic plus faible que lors d'une rupture instantanée. Cependant, une fois la brèche suffisamment ouverte, des ondes vont rejoindre le front initial, elles vont le raidir et risquent de provoquer in fine un pic plus aigu dans l'hydrogramme mesuré plus en aval.

L'approche classique communément exploitée pour la simulation du processus d'évasement progressif de la brèche souffre deux inconvénients majeurs. D'une part, l'écoulement n'est absolument pas traité de façon unifiée. Dans un premier temps, l'impact de l'érosion sur la structure proprement dite est estimé, puis un hydrogramme à hauteur de la brèche en est déduit. Celui-ci est ensuite répercuté sur l'aval, en supposant une séparation amont-aval, manifestement hypothétique. De plus, nombre d'hypothèses sont couramment émises concernant des zones d'écoulement uniforme (Figure 5), la position d'une section critique, les régions où l'écoulement est infra- ou supercritique, etc. D'autre part, la géométrie de la section de la brèche fait elle-même l'objet d'hypothèses restrictives : forme triangulaire, trapézoïdale ou rectangulaire. En résumé, une telle approche est réductrice car elle n'assure pas de couplage direct entre l'évolution morphologique de l'ouvrage de retenue et les écoulements correspondants.

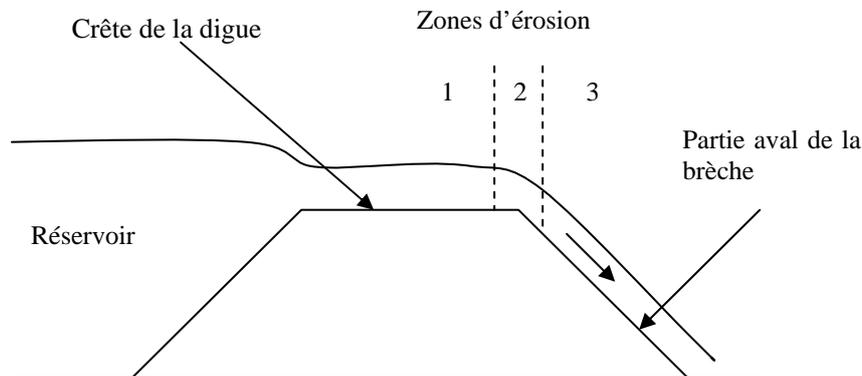


Figure 5 - Hypothèses classiques pour le calcul de l'évolution d'une brèche dans une digue: détermination a priori de zones simplifiées d'écoulement et d'érosion [7].

Au contraire, le logiciel développé ici se révèle apte à intégrer complètement ces phénomènes qui, dans la réalité, sont incontestablement couplés très étroitement. Ainsi, l'étude unifiée proposée ici se distingue de l'approche classique en permettant de rendre compte automatiquement de l'interdépendance complexe entre, d'une part, l'interaction fluide-structure proprement dite et, d'autre part, les écoulements amont et aval. Une rupture progressive de digue a été ainsi simulée afin d'attester l'applicabilité du logiciel à la modélisation de ce genre de phénomène.

La contribution aux flux solides apportée par les mouvements de sédiments induits par la gravité doit être considérée. En effet, la brèche va s'approfondir en raison de l'érosion du fond, ce qui finira par rendre les parois latérales de la brèche instables. Elles s'affaisseront alors par action de la gravité. Il est par conséquent indispensable de tenir compte, au moins localement, d'instabilités

éventuelles des talus. Ces processus ont été modélisés au moyen du concept d'angle critique de talus, explicité au paragraphe 2.4.

Les débouchés pratiques de ce type de simulations sont nombreux. Par exemple, en 1994, dans le canton de Fribourg (Suisse), un glissement de terrain a provoqué la constitution progressive d'un barrage naturel au fond d'une vallée. Un véritable lac s'est formé dans le lit du ruisseau qui s'écoulait auparavant à cet endroit. Des questions relatives à la stabilité de ce barrage ont du être étudiées d'urgence, en particulier, en ce qui concerne l'érosion consécutive à une éventuelle submersion de la digue en terre. Les écoulements suscités par différents modes de rupture du barrage ont été évalués, afin de provoquer en définitive le scénario engendrant les répercussions les moins redoutables pour l'aval [4].

4.2.2. RESULTATS NUMERIQUES

Un cas de figure de rupture progressive d'un barrage en terre a été simulé. Un plan d'eau d'une profondeur de 9,5 m est initialement retenu par une digue de 10 m de haut entaillée, en son centre, d'une brèche d'un mètre de profondeur. L'eau va s'y engouffrer et initier un processus d'érosion progressive de l'ouvrage de retenue, qu'il serait, en pratique, quasiment impossible d'interrompre.

La simulation numérique, dont les résultats sont présentés à la Figure 7, a été réalisée sur un maillage comportant 64.000 éléments carrés de 50 cm de côté. Des hypothèses aussi réalistes que possible ont été émises concernant la valeurs des différentes propriétés du matériau constituant la digue (Figure 6).

p	s	d_{50}	γ_{nat}	γ_{cr}
0,35	2	5 mm	40°	50°

Figure 6 - Propriétés des sédiments pour la rupture progressive de digue.

Le transport solide par charriage est évalué à l'aide de la formule de Meyer-Peter et Müller. Les concepts d'angle naturel de talus et d'angle critique de talus sont exploités afin de modéliser directement les débits solides induits par la gravité. Le coefficient de frottement de Strickler (l'inverse du coefficient n de Manning) est estimé à $k_{st} = 30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$.

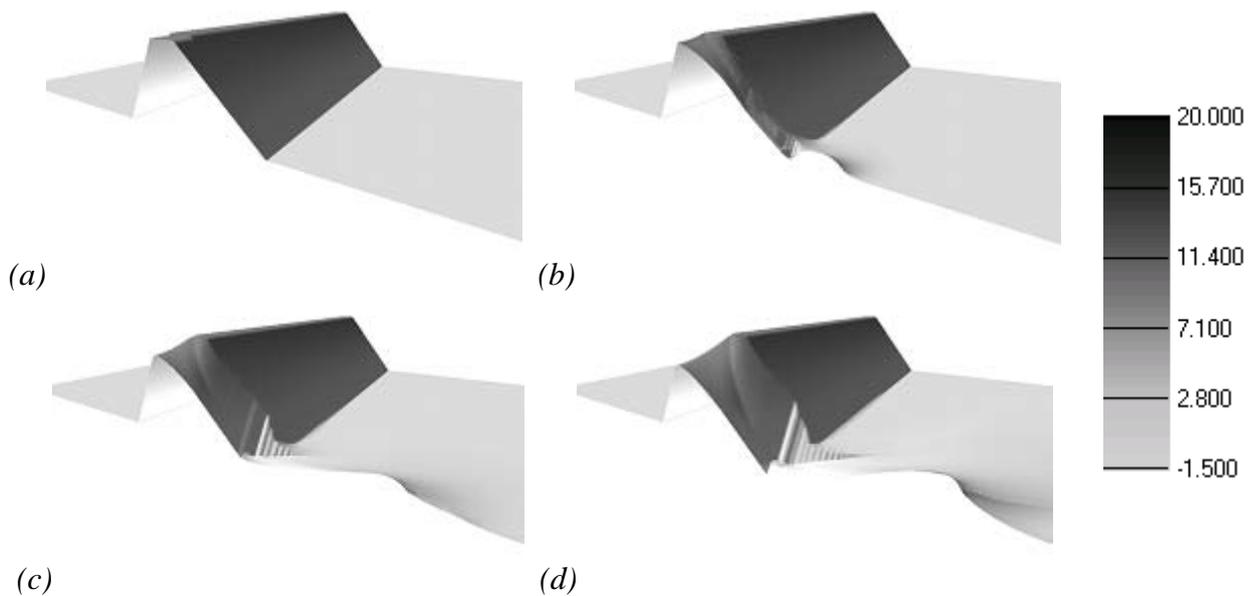


Figure 7 - Rupture de digue par submersion d'une brèche initiale : résultats numériques à l'issue de (a) 0 s, (b) 30 s, (c) 60 s et (d) 90 s de simulation. L'échelle est graduée en mètres. Seule la topographie de la moitié de l'ouvrage de retenue est représentée, permettant ainsi la visualisation d'une coupe longitudinale passant par le milieu de la brèche. Vue depuis l'aval.

Afin de tirer parti de la symétrie de la configuration idéalisée considérée, la *variété*, i.e. le domaine sur lequel le calcul par volumes finis a été effectué, correspond à la moitié du domaine spatial complet. La Figure 7 illustre les effets sur la topographie obtenus pour des temps allant jusqu'à 90 secondes. Une perspective de la moitié de la retenue est représentée, vue depuis l'aval, et la coupe longitudinale passant par le milieu de la brèche permet de très bien visualiser le profil des cotes du lit tout au long de l'évolution instationnaire. On distingue à la Figure 7(a) l'ouverture initiale dans le mur. Ensuite, on peut observer sur les Figure 7(b) à (d) qu'une érosion importante juste à l'aval de l'ouvrage s'accompagne d'une déposition de sédiments dans le prolongement de la brèche. Cette accumulation de matière solide engendre une contrepente et, par voie de conséquence, une déviation latérale de l'écoulement fluide.

5. BARRAGE DE LA VESDRE

Erigé en amont d'Eupen, le barrage de la Vesdre offre une capacité de stockage de plus de 25.000.000 m³. L'ouvrage, inauguré en 1951, a une hauteur de 66 mètres et 410 mètres de long. L'épaisseur vaut 55 mètres à la base et 11 mètres au sommet.

5.1. CONTEXTE

Lors de nombreuses catastrophes recensées, l'écoulement consécutif à la rupture d'un grand ouvrage de retenue a engendré des modifications substantielles de la topographie à l'aval. Les circonstances de certains accidents sont tellement extrêmes que le volume de matériaux transportés peut atteindre le même ordre de grandeur que le volume initial d'eau dans la retenue [1]. De plus, même si la quantité totale de sédiments mis en mouvement reste faible, des dégâts considérables peuvent être engendrés par d'importantes modifications locales du lit.

Pourtant, des simulations destinées à évaluer l'impact de la ruine d'un barrage sont aujourd'hui quasi exclusivement effectuées en supposant un lit fixe. Analysons l'impact sur les résultats d'une telle simplification des calculs.

5.2. OBJECTIFS

La crue accidentelle induite par une rupture totale et instantanée du barrage-poids en béton d'Eupen a été simulée au moyen du logiciel bidimensionnel développé. Ce cas de figure a retenu notre attention pour deux raisons essentielles. D'une part, il permet de démontrer l'applicabilité du code de calcul sur une topographie naturelle érodable absolument quelconque. D'autre part, nous avons voulu mettre en évidence certaines différences essentielles entre la propagation du front d'eau sur un lit rigide et sur un lit mobile. Un paragraphe de cet article ne suffit évidemment pas pour analyser l'ensemble des difficultés du problème, mais nous avons l'ambition ici de démontrer l'importance de la prise en compte de l'évolution topographique en illustrant ses principales manifestations.

L'hypothèse de ruine totale et instantanée a été retenue, conformément aux Recommandations de la Commission Internationale des Grands Barrages pour les ouvrages en béton.

5.3. MODELISATION

5.3.1. TOPOGRAPHIE

Une première difficulté pour la réalisation d'une simulation sur terrain réel réside dans l'acquisition d'informations topographiques précises et adaptées au traitement numérique. Les données peuvent être obtenues entre autres grâce à la digitalisation de cartes munies de courbes de niveau. Cette

approche n'est pas idéale car elle engendre de nombreuses pertes de précision : passage de la topographie réelle distribuée à des courbes de niveau, passage inverse des courbes de niveau à des altitudes aux nœuds d'un maillage, interpolation éventuelle entre une grille de référence et celle qui servira effectivement à la simulation. En particulier les courbes de niveau apportent une information de peu de valeur dans les zones où elles sont très éloignées l'une de l'autre. Ce problème survient souvent dans une bande de terrain assez peu accidentée directement à proximité d'un cours d'eau (lit majeur). Il existe actuellement des Modèles Numériques de Terrain (M.N.T. ou D.E.M., *Digital Elevation Model*) qui pallient une grande partie des imprécisions liées à la première approche. C'est pourquoi, dans le cadre des simulations réalisées ici, un M.N.T. développé par l'I.G.N. a été exploité.

Sur les cartes contemporaines, la retenue proprement dite est représentée par un plan d'eau, si bien que le relief du fond du lac n'a pu être obtenu qu'à partir de la digitalisation des courbes de niveau d'une carte antérieure aux travaux de construction du barrage d'Eupen (Figure 8).

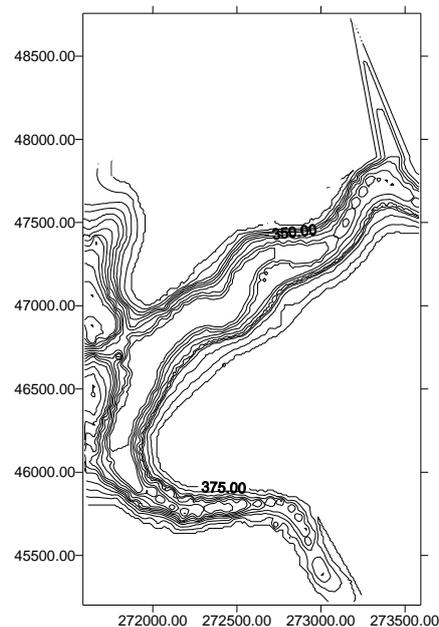


Figure 8 - Courbes de niveau du fond du lac d'Eupen.

5.3.2. MODELISATION DES FROTTEMENTS

La prise en compte de tous les obstacles rencontrés par la lame d'eau au cours de sa propagation (arbres, bâtiments, ...) constitue une tâche encore difficilement surmontable. Il est par conséquent impératif de se limiter aux entraves les plus considérables, comme l'urbanisation dense du centre d'Eupen. Une pratique classique consistait à choisir le coefficient de frottement localement, au prorata de l'importance des obstacles présents et qu'il était censé modéliser de façon agrégée. Des valeurs ont été recommandées par la Commission Internationale des Grands Barrages. Le coefficient de Manning peut passer de $n = 0,033 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ pour les zones inhabitées non boisées, jusqu'à $n = 0,1 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$ pour la traversée des villes.

Toutefois, le raffinement de la grille de calcul utilisée ici (mailles de 10 m de côté) nous permettrait de discrétiser directement les immeubles principaux. Les essais du HACH, impliqué dans le groupe de travail européen CADAM (*Concerted Action in Dam Break*), montre que cette stratégie est sensiblement plus fiable. Bien que nous ne disposions pas de l'information concernant la disposition des constructions principales présentes à l'aval du barrage, nous renonçons sciemment au choix d'un coefficient de frottement local de manière à faciliter la comparaison entre les simulations en géométrie fixe et sur lit érodable.

5.4. COUT DU CALCUL

Le maillage considéré contient plus de 150.000 éléments avec quatre inconnues chacun. Les simulations portaient sur 1000 secondes, de telle sorte que le front n'ait pas le temps de rejoindre la frontière aval de la variété, et que celle-ci n'ait donc aucune influence sur les résultats. Le temps de calcul sur un ordinateur personnel (Pentium 866 MHz) ne dépasse pas une dizaine d'heures, sans recourir à l'option de maillage évolutif, récemment développée au HACH et destinée à optimiser le temps de calcul. La simulation hydrodynamique pure, munie du maillage évolutif, fournit déjà les résultats après 2h30.

5.5. CARTES DE RISQUE

L'établissement de *cartes de risque* constitue un moyen efficace pour synthétiser l'abondante information obtenue à l'issue d'une simulation instationnaire, et de n'en conserver que les aspects les plus utiles en pratique. Différentes cartes ont été calculées.

5.5.1. DELAI DE PROPAGATION DU FRONT

La Figure 9 indique en chaque point du maillage le temps s'écoulant entre la ruine de l'ouvrage de retenue et l'arrivée du front.

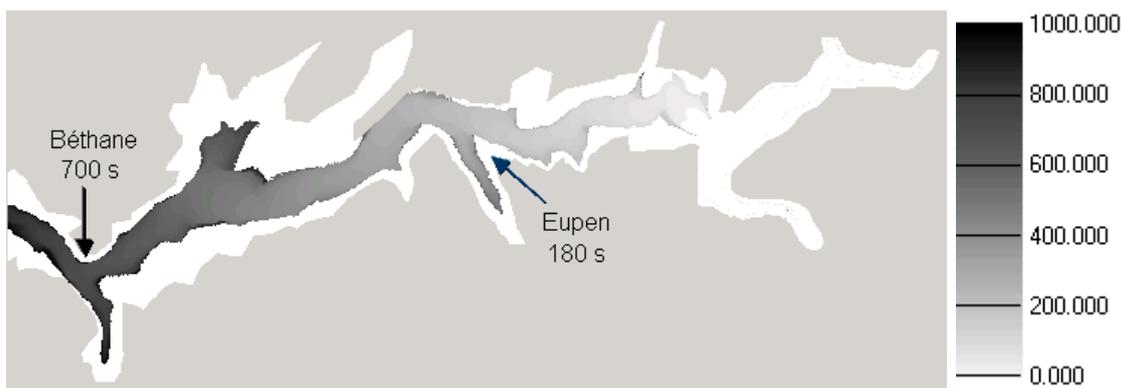


Figure 9 - Carte de risque : délai d'arrivée du front d'eau, en secondes.

Critère d'arrivée du front

Si la topographie reste inchangée, la fixation d'une hauteur d'eau seuil (e.g. $h > 50$ cm) constitue un critère acceptable pour déterminer l'instant à partir duquel une zone est inondée. Par contre, en topographie évolutive, la lame d'eau est susceptible de pousser un front de sédiments qui constituerait un réel danger pour la population avant même l'arrivée de l'eau proprement dite. C'est pourquoi nous avons opté pour le critère plus général d'un accroissement de l'altitude de la surface libre supérieur à un seuil (e.g. $\zeta(t) - \zeta(0) > 50$ cm). La valeur seuil prise en considération est un paramètre choisi par l'utilisateur du logiciel.

Lit fixe vs lit mobile

Au tout début du processus, le front d'eau responsable de modifications topographiques se propage nettement plus lentement que si le lit restait fixe. D'autres simulations, réalisées dans une configuration unidimensionnelle, illustrent déjà cette tendance [3]. Par contre, la Figure 10 permet de constater qu'ultérieurement le front calculé en topographie évolutive rattrape, puis dépasse celui qui se propagerait sur un lit fixe. Cette variation de la vitesse d'évolution du front pourrait être liée à

l'obstruction partielle, par des dépôts sédimentaires, d'une vallée latérale (la Helle), vers laquelle une quantité importante d'eau était déviée en topographie fixe (sur plus de 800 m). Une seconde explication de cette accélération manifeste du front hydrosédimentaire peut être avancée : l'effet érosif agissant dès le début de l'écoulement a tôt fait de façonner, au moins localement, certaines parties de la vallée, de telle sorte que l'eau s'écoulant ultérieurement y rencontre une résistance nettement plus faible. Ainsi, un plus grand maintien de l'énergie totale disponible serait responsable de l'accroissement de vitesse du front.

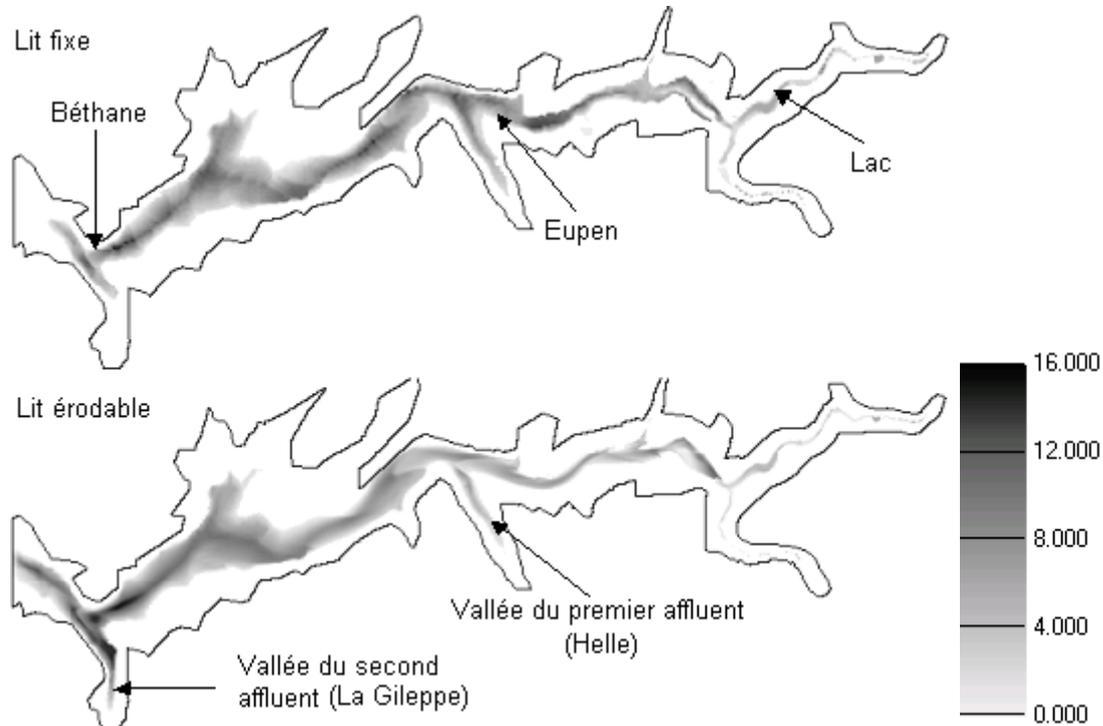


Figure 10 - Hauteurs d'eau (m) 840 s après la ruine du barrage selon les deux scénarios : écoulement sur lit fixe et sur lit érodable.

Enjeux

Des gestionnaires d'ouvrages de retenue, des assureurs ou encore les pouvoirs publics manifestent un intérêt marqué pour ce type de cartes de risque. Elles permettent, en effet, d'orienter des décisions cruciales en termes de prévention, de dispositifs d'alerte et de plans d'évacuation des populations. Dans une région vallonnée comme celle d'Eupen, il apparaît qu'un déplacement certes rapide mais d'une faible distance suffit en général pour rejoindre une altitude à l'abri de tout risque d'inondation majeure.

En pratique, les valeurs obtenues pour le temps d'arrivée de l'onde doivent être minorés et les hauteurs maximales majorées par des facteurs différents, parfois prescrits légalement. Une analyse comparative entre modèles physiques et numériques a servi de fondement à l'établissement de ces coefficients de sécurité, déjà inscrits dans certaines législations nationales (France).

5.5.2. HAUTEUR MAXIMALE ATTEINTE

Une seconde caractérisation de la répartition du danger est obtenue en reportant sur chaque point de la carte l'accroissement maximum subi par l'altitude de la surface libre au cours de tout le processus transitoire (Figure 11). De nouveau, lors d'une simulation sur lit rigide, il suffit de considérer la hauteur d'eau maximale.

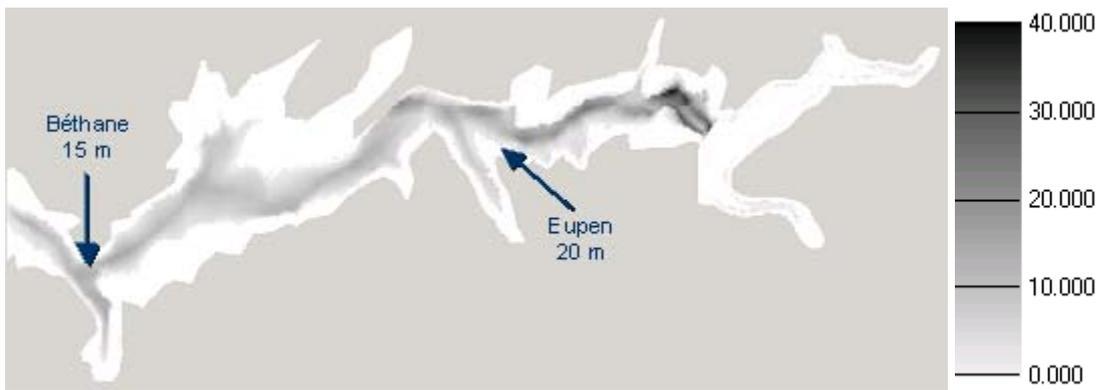


Figure 11 – Carte de risque : augmentation maximale du niveau de la surface libre (m).

L'examen du temps auquel cette hauteur maximale est atteinte à la confluence avec la Helle présente un intérêt particulier. Toutes les simulations ont montré que de l'eau s'engouffre dans le bras de la Helle lors du passage du front, et redescend plus tard dans la vallée principale. Ce phénomène est tellement marqué que les hauteurs d'eau maximales atteintes à la confluence sont observées, non pas peu après l'arrivée du front mais lors du retour vers la vallée de la Vesdre de l'eau auparavant engagée dans le bras de la Helle.

Toutefois, la Figure 12 montre que des dépôts de sédiments à l'embouchure de la Helle entravent partiellement l'accès à l'affluent, si bien que les hauteurs maximales qui y sont recensées sont moindres et surviennent plus tard.

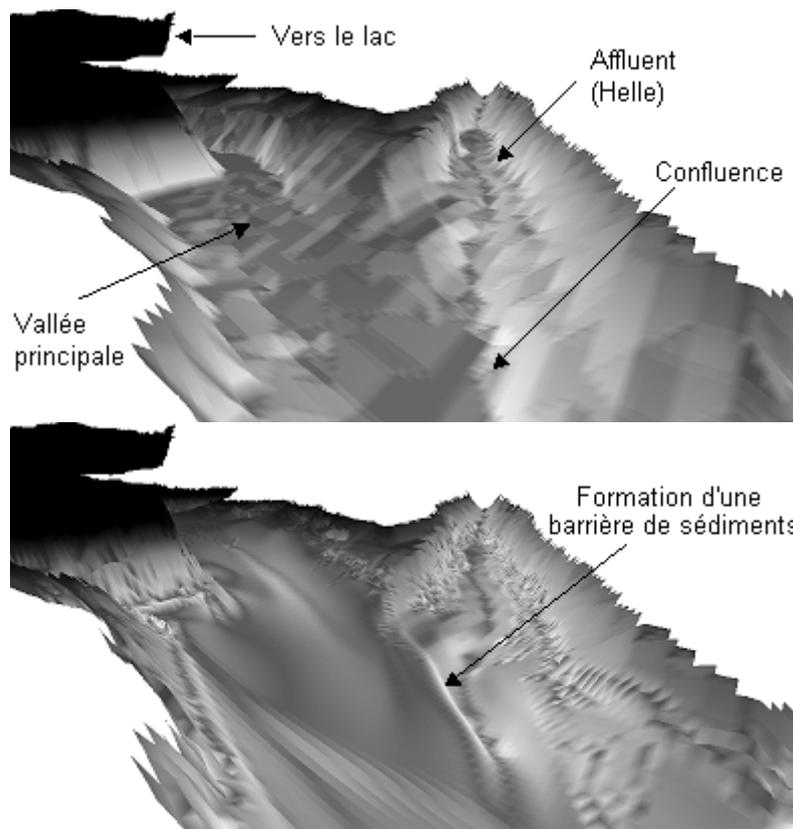


Figure 12 - Evolution du lit à la confluence avec la Helle entre l'instant initial et 1000 s après la ruine de l'ouvrage de retenue. Vue 3D du dépôt de sédiments à l'entrée de l'affluent .

5.5.3. EROSION ET DEPOSITION MAXIMALES

L'examen de la topographie finale à l'issue de la simulation ne rend compte que partiellement des processus d'érosion et de déposition actifs pendant l'évolution instationnaire. Il est en effet

concevable que des zones subissent une érosion substantielle au début du processus et se voient ensuite (partiellement) comblées par une déposition de sédiments. C'est pourquoi, au cours de tout le calcul, les élévations minimale et maximale de chaque point de la variété ont été inventoriées. En guise d'illustration, la Figure 13 compare la topographie immédiatement à l'aval de l'emplacement initial de l'ouvrage de retenue avant et après le passage du front. Le relief situé au centre à la Figure 13(a) présente une élévation d'environ 10 m et se voit totalement érodé à l'issue des 1000 secondes d'écoulement. Un recul significatif des berges de la rive gauche peut également être observé à la Figure 13(b) et il s'accompagne de dépositions au pied des talus.

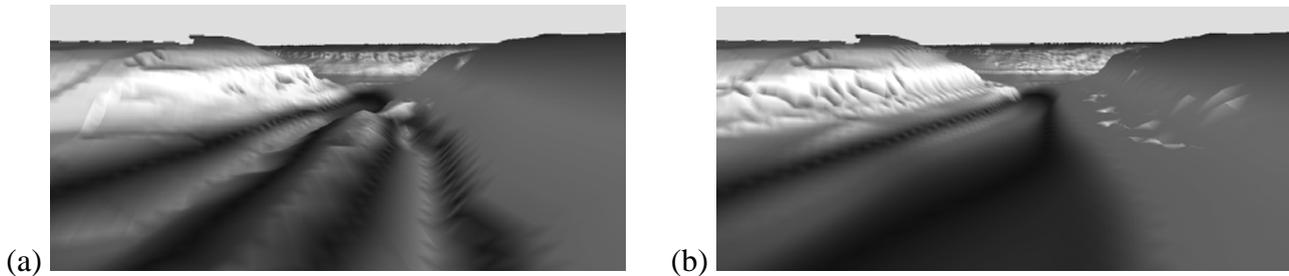


Figure 13 - Evolution du lit immédiatement à l'aval de l'emplacement initial du barrage. Vue 3D depuis l'aval, en direction du lac.

5.6. ENSEIGNEMENTS

Les simulations ont permis de mettre en évidence, de façon vraisemblable, des zones d'érosion marquée et d'autres de déposition appréciable. Les résultats rendent également compte du ralentissement du front hydrosédimentaire au début de sa progression, auquel on pouvait légitimement s'attendre. Il apparaît toutefois que le front se propageant sur un lit érodable finit par évoluer plus rapidement que sur le lit fixe. Par conséquent, l'hypothèse d'un lit immobile ne s'avère pas nécessairement sécuritaire.

Des ordres de grandeur fondamentaux pour l'établissement des cartes de risque ont été identifiés. Une telle étude d'incidence trouverait incontestablement sa pleine utilité dans le cadre d'une politique de protection des populations et des biens, déjà mise en place dans d'autres pays.

Des améliorations seraient à apporter essentiellement au niveau d'une modélisation réaliste des pertes non seulement par frottement, mais en outre celles engendrées suite au transport des matériaux solides.

6. CONCLUSION

Etant donné l'extraordinaire complexité des phénomènes à modéliser dans le domaine du transport solide en rivière, nous avons renoncé à une inaccessible étude exhaustive des processus sédimentaires, pour privilégier une analyse approfondie de certains aspects particuliers sélectionnés pour leur implication dans les applications les plus pratiques. Le caractère judicieusement sélectif de la démarche nous a permis accéder à des simulations très réalistes grâce au logiciel bidimensionnel développé, qui traite l'hydrodynamique et le transport solide de façon couplée et complètement instationnaire.

Une étape-clé lors de l'écriture de ce dernier logiciel résidait dans l'élaboration d'un schéma numérique approprié à la discrétisation des termes advectifs du modèle mathématique. A cet égard, une alternative originale et inédite s'est avérée la plus satisfaisante, quel que soit le régime d'écoulement. Elle n'a été mise en défaut au cours d'aucune des simulations réalisées.

Plusieurs cas de figure ont permis de valider avec succès le logiciel 2D. Des simulations originales et novatrices ont été réalisées, telle que la modélisation directe de la rupture progressive par submersion d'un ouvrage de retenue érodable. L'applicabilité du logiciel à des écoulements

complexes en topographie naturelle, érodable ou non, a été démontrée par l'étude de la propagation du front d'eau consécutif à la rupture du barrage d'Eupen. Le logiciel se révèle incontestablement d'un intérêt de premier plan pour des ingénieurs chargés de l'évaluation des risques liés à ce genre de phénomènes accidentels, ou même naturels.

D'intenses recherches menées actuellement au HACH visent à encore élargir davantage la gamme de phénomènes accessibles à la modélisation. Nous avons de bonnes raisons de penser que cette démarche s'avérera payante, étant donné que, déjà dans son état actuel, le logiciel a toujours fourni des résultats vraisemblables, même pour des écoulements intenses.

Ajoutons finalement que le recours à l'expérimental se justifie plus que jamais. De fait, les progrès du numérique ne peuvent en aucun cas reléguer au second plan les défis majeurs liés à la compréhension fondamentale des phénomènes, ainsi qu'à l'établissement de relations empiriques perfectionnées. Qu'il s'agisse de lois de frottement plus réalistes ou des lois de capacité de transport généralisées, leur niveau de justesse se répercute directement sur la qualité des simulations numériques. De plus, les résultats d'expériences acquièrent dorénavant une pertinence accrue étant donné qu'ils pourront être d'autant mieux exploités que nous disposons aujourd'hui de logiciels de simulation fonctionnels et performants.

7. REMERCIEMENTS



L'auteur tient à remercier vivement le Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports (M.E.T.) et, en particulier, la Direction des barrages de l'Est (D.241), pour la mise à disposition et la libre exploitation des données fournies.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] CAPART H., Dam-break induced geomorphic flows and the transition from solid- to fluid-like behavior across evolving interfaces, Thèse de doctorat, Université Catholique de Louvain, janvier 2000.
- [2] DEWALS B., Modélisation et optimisation d'une production hydroélectrique en cascade, Rapport de stage en entreprise, Université de Liège, août 2000.
- [3] DEWALS B., Modélisation numérique du transport sédimentaire, Travail de fin d'études, Université de Liège, juin 2001.
- [4] FÄH R., *Numerische Simulation der Strömung in offenen Gerinnen mit beweglicher Sohle*. Mitteilung Nr. 153 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich, 1997.
- [5] PIROTTON M., *Modélisation des discontinuités en écoulement instationnaire à surface libre. Du ruissellement hydrologique en fine lame à la propagation d'ondes consécutives aux ruptures de barrages*, Thèse de doctorat, Université de Liège, 1994.
- [6] PIROTTON M., *Une Approche Globale pour Modéliser la Genèse et la Propagation des Crues Naturelles ou Accidentelles*, Classe des Sciences, Académie Royale de Belgique, 182 pages, 1997.
- [7] SINGH V., *Dam breach modeling technology*. Water Science and Technology Library. Dordrecht, Bos, London : Kluwer Academic Publishers, 1996.