

## QUELQUES OUTILS NUMÉRIQUES DE GESTION DES EAUX DE SURFACE

M. PIROTTON, A. LEJEUNE,  
P. ARCHAMBEAU, S. ERPICUM, Th. MOUZELARD\*

*Laboratoires de Mécanique des Fluides, d'Hydrodynamique Appliquée et  
des Constructions Hydrauliques, Université de Liège, BELGIQUE<sup>1</sup>*

*\* Aspirant au Fonds National de la Recherche Scientifique*

### *Résumé :*

Cet article présente la suite des programmes hydrologiques et hydrodynamiques WOLF développée par le HACH pour traiter tout écoulement de surface. Modéliser complètement la filière de surface 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 et des réseaux de rivières, spécialisé dans l'optimisation du design hydraulique, 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 de la physique du 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 le ruissellement et l'écoulement hypodermique, 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 de tout réseau de rivières, WOLF1D 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.

Le développement de WOLF2D pour résoudre et illustrer les écoulements quasi-3D s'impose comme outil de design en constructions hydrauliques et d'analyse de risques. Des exemples pratiques sont décrits et comparés avec des données expérimentales et sur modèle réduit.

L'approche unifiée par volumes finis, résolvant une formulation faible du système mathématique pour chaque code, garantit des solutions fiables grâce à un *splitting* adapté des termes convectifs, avec des ressauts, vitesses et hauteurs d'eau correctement localisés et reproduits. Cette fiabilité émerge notamment de multiples confrontations avec des solutions analytiques et des résultats acquis sur des modèles réduits réalisés en laboratoire.

---

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

### *Abstract :*

This paper aims to illustrate the hydrological and hydrodynamical package WOLF carried out by the HACH to handle any free surface flows. Computing the entire raindrop course, including the different stages of transient free surface, is a relatively new trend for real catchments, initiated by the tremendous increase of hardware and storage capabilities. WOLF is in keeping with the scope of catchment and river networks analysis, hydraulic design, for water resources management as a whole.

In the field of free surface hydrological modeling and watershed management, the development of physically based models results from the better understanding of the physics of overland flow processes and from the ability to handle spatially and temporally distributed models. Based on the diffusive wave approximation to compute runoff and subsurface flow, WOLFHYDRO is demonstrated to work on any digital terrain model submitted to spatial and temporal variations of rainfall, generating automatically delimitation of the catchment geometry and river network propagation, to finally compute the temporal evolution of discharge at any location.

In the framework of a global management of any catchment river network, WOLF1D handles a new approach for compound channels, computing separately both components of flow with explicit evaluation of lateral exchange during the transient stages. Its efficiency is assessed for flooding computations, regulation of successive movable dams (peak flow reduction) and management simulations of staggered powerplants (hydroelectrical production).

The development of WOLF2D, resolving and illustrating transient quasi-3D equations, leads to large prospects of applications as tool for design and risk analysis. Practical examples are described and compared with experimental and on-field data's.

The unified finite volume approach, resolving a weak formulation of the mathematical system for each code, leads to reliable simulations thanks to suitable splittings of convective terms, with suitable shocks, speeds and water heights properly located and reproduced in each simulation. This assurance is gained by comparison with analytical solutions and from scale models tests performed in the Laboratories of Hydraulic Constructions of the University of Liège.

## **1. INTRODUCTION**

Si l'existence du cycle perpétuellement reproduit dans lequel l'eau s'insère a logiquement inspiré des réflexions philosophiques puisqu'elle façonne le relief et décide de la vie sur terre, l'importance de l'enjeu a surtout suscité des capacités créatives adaptées aux technologies de l'époque.

L'accumulation de compétences anciennes, dont la mise en pratique suscite souvent l'admiration, l'établissement des modèles théoriques aux siècles derniers et l'évolution actuelle des sciences et de la technologie, amènent aujourd'hui à traiter les problèmes hydrauliques de façon beaucoup plus complexe, prenant en compte nombre de contraintes et d'objectifs parfois antagonistes pour les concilier au mieux. Des projets d'envergure sont menés, plus respectueux de l'environnement, soumis à des critères de sécurité de plus en plus sévères, dans des sites toujours plus complexes à appréhender.

A côté des progrès de la technologie et du savoir actuel qui se concrétisent dans des réalisations audacieuses pour l'époque, un simple dysfonctionnement des ouvrages conduit immédiatement à de lourdes conséquences, économiques et/ou humaines, plaçant les concepteurs face à des responsabilités beaucoup plus larges.

Par ailleurs, même si le contexte contemporain fait évoluer les problèmes qui y sont liés, force est de constater que les défis majeurs attachés à l'eau subsistent ou se radicalisent. De l'écrêtement des crues au soutien d'étiage, du recours toujours croissant à l'eau pour l'activité industrielle au sens large au maintien de ses propriétés écologiques pour la consommation, tout concourt à faire du problème de l'eau un défi du 21<sup>e</sup> siècle, bien rare à épargner et à gérer plus efficacement.

Face à la gestion des ressources hydrauliques, qu'elle s'intéresse à leur origine, à leur consommation ou leur utilisation, ou encore qu'elle se tourne vers les conséquences possibles des infléchissements que l'homme peut provoquer sur leur cycle, l'apport le plus significatif de ces quelques dernières dizaines d'années tient essentiellement à l'accroissement rapide des possibilités numériques qui permettent, avec les acquis théoriques en mécanique des fluides, de développer des outils d'aide à la décision.

Parmi tous les domaines de l'hydraulique touché par le numérique, l'intérêt du HACH<sup>2</sup> à modéliser l'ensemble des écoulements à surface libre résulte simplement de leur prépondérance dans les phénomènes hydrodynamiques influents sur lesquels on s'efforce le plus d'agir. A l'échelle du système hydrologique global, le souci de gérer, donc d'anticiper les phénomènes naturels et accidentels, conduit ainsi à couvrir avec des approches physiquement basées les différentes étapes que connaît la goutte d'eau lorsqu'elle frappe la surface terrestre, du ruissellement au gonflement des rus, rivières et zones de stockage, jusqu'aux grands fleuves et voies intérieures de navigation.

## 2. WOLF : SUITE INTÉGRÉE DE LOGICIELS HYDROLOGIQUES ET HYDRODYNAMIQUES

### 2.1. UNICITÉ DES MÉTHODES DE RÉOLUTION

Une discrétisation temporelle explicite couplée à une résolution spatiale par volumes finis a été choisie dans tous les modèles intégrés de WOLF, pour son idéale adaptation aux équations de l'hydraulique. Son implémentation assure la conservation des volumes propagés ainsi qu'une fiabilité dans l'évaluation des bilans de quantité de mouvement et garantit une précision du second ordre tant au point de vue temporel que spatial. Un « éclatement » particulier des termes convectifs, mis au point par analyse de stabilité des schémas de résolution, permet de traiter tout ressaut instationnaire dans l'écoulement, avec des vitesses et profondeurs correctement localisées et reproduites dans chaque simulation.

### 2.2. INTERFACE DE TRAVAIL

L'ensemble des logiciels développés profite d'une interface originale et conviviale de pré- et post-processing. Cette interface est développée dans le but de permettre une mise en œuvre rapide de l'ensemble des données relatives à toute simulation complexe et à une visualisation en temps réel des résultats en chaque maille de discrétisation (hauteurs, débits, vitesses, froude, charge totale,...).

Cette interface est entièrement écrite en VisualBasic (Fig. 1) de manière à profiter pleinement des capacités qu'offre l'environnement Windows tandis que les codes de calcul sont programmés en Fortran95 qui offre une rapidité et une puissance de calcul scientifique incontestées.

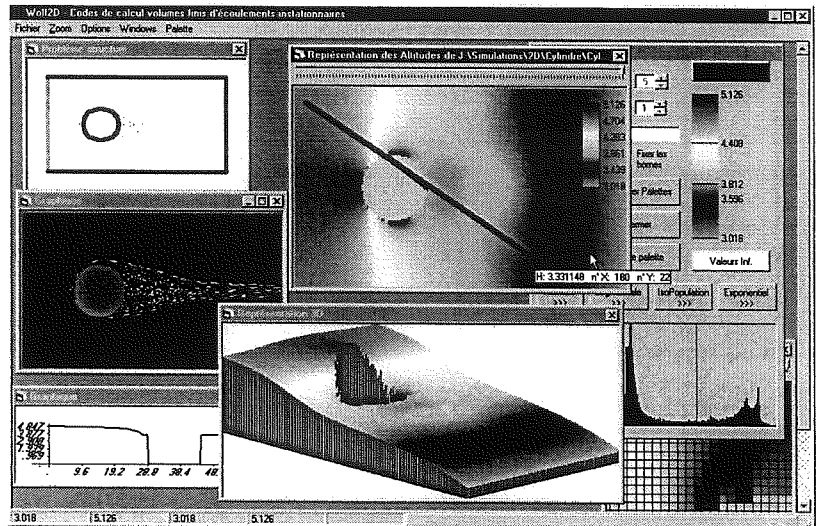
WOLF offre ainsi un environnement de travail unifié et confortable pour tout modélisateur du HACH quel que soit le type d'application envisagée permettant par exemple :

- La génération de maillage structuré et non structuré pour des géométries complexes,
- La définition rapide de toutes les conditions limites,
- L'édition en interne de toutes les matrices utiles au calcul en proposant à l'utilisateur un tableur simplifié (sélection multi-zones, importation de données externes, opérations numériques, exportation vers le tableur Excel, smoothing, ombrage, ...),
- La représentation de type « raster » des modèles quasi-bi et quasi-tridimensionnels,

---

<sup>2</sup> Service d'Hydrodynamique Appliquée et des Constructions Hydrauliques

- La représentation des vecteurs de flux et/ou de vitesse,
- La représentation en courbes utile pour le modèle filaire et les diverses coupes,
- La représentation 3D des images raster,
- Le calcul et l'affichage d'un tracking de particules dans l'écoulement (vue lagrangienne),
- La gestion d'une palette de dégradé en vraies couleurs (24 bits)...
- Une fonction de zoom par fenêtre,
- La création et l'animation de vidéos,
- La superposition d'informations raster et vectorielles utile pour visualiser des résultats sur un fond de carte.



*Fig. 1 : Capture d'écran d'une fenêtre WOLF personnalisée par l'utilisateur*

### 3. WOLFHYDRO

#### 3.1. INTRODUCTION

Au-delà d'une évolution possible du climat, les modifications humaines du bassin versant tendent en majorité à exacerber les capacités de réaction du terrain en augmentant à la fois les quantités des apports pluvieux et leur vitesse de convergence vers l'aval. C'est la raison pour laquelle s'intensifie la recherche pour l'élaboration d'outils fiables de gestion des bassins capables non seulement d'anticiper leurs réactions mais de prédire les évolutions de leur réponse consécutives à toute modification de leurs propriétés topographiques et morphologiques.

L'approche physiquement basée présente pour avantage principal de réduire les phases de calage sur un bassin déterminé, dès lors que la frange de valeurs de chacun de ces paramètres à signification physique est beaucoup mieux connue. Toute modification des propriétés trouve par ailleurs aisément son pendant dans une modification adéquate de la valeur des paramètres. La multiplication de ces derniers à disposition dans un modèle distribué implique cependant de renoncer à l'approche traditionnelle de calage « au feeling » au profit d'approches d'optimisation.

Néanmoins, les progrès informatiques aiguissent l'envie des chercheurs qui souhaitent exploiter toutes les potentialités des modèles numériques de terrain et l'information satellitaire au sens large.

C'est dans cette volonté de remplacer les modèles hydrologiques empiriques globaux par des approches distribuées résolvant plus ou moins complètement les équations d'Euler ou de Navier-Stokes que s'inscrit depuis de nombreuses années le HACH en proposant des modèles hydrodynamiques spécifiques au ruissellement de surface. Ces approches, validées par des essais en simulateur de pluie, ont déjà montré leurs potentialités tant dans la prévision que dans la gestion des crues, en aidant les gestionnaires dans le choix de politiques d'altération des propriétés du bassin versant.

Succédant à d'autres versions, basées sur des approches mathématiques et des méthodes de résolution variées, le logiciel WOLFHYDRO recourt à la technique des volumes fins pour résoudre les équations conservatives dites de l'onde diffusive, calculant les écoulements en fine lame et leurs échanges avec le monde extérieur sur tout modèle numérique de terrain.

L'événement pluvieux peut être considéré en intégrant l'hétérogénéité du terrain, l'évolution temporelle de ses propriétés, l'irrégulière répartition des précipitations et leur évolution spatiale avec le temps, conformément au déplacement des fronts nuageux.

### 3.2. QUELQUES APPLICATIONS SUR BASSIN RÉEL

La vérification des capacités d'évacuation des grands ouvrages hydrauliques à travers le monde résulte à la fois des évolutions climatiques pressenties et de la plus grande disponibilité en données hydrologiques sur les sites exploités. Dans cette réaction sécuritaire aux événements climatiques extrêmes, la Suisse s'intéresse actuellement au développement de modèles hydrologiques de simulation qui peuvent profiter de bassins versants bien instrumentés tels ceux figurés ci-dessous.

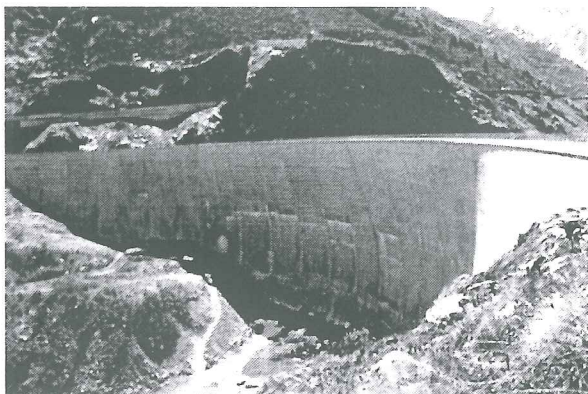


Fig. 2 : Barrage des Toules



Fig. 3 : Barrage de Mattmark

Le modèle numérique de terrain disponible sur l'ensemble de la Suisse est d'une résolution spatiale de 25 m. Pour le cas du bassin de Mattmark, la portion de la carte représentée ci-dessous reprend une surface de 150 km<sup>2</sup> (raster exploité de +-200 000 mailles). Profitant de l'interface intégrée de WOLF disponible pour l'ensemble des logiciels de simulations, le barrage ainsi que la retenue



Fig. 4 : Représentation du MNT de Mattmark

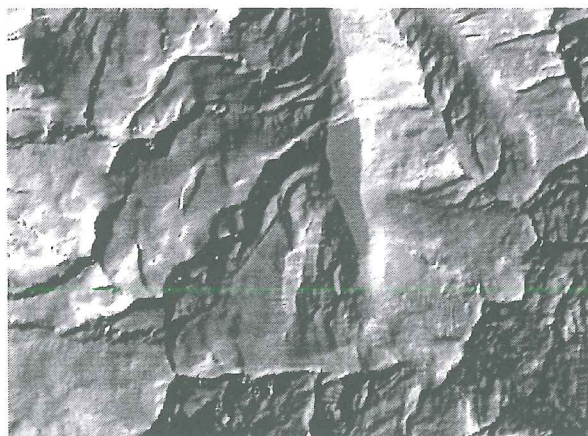


Fig. 5 : Vue en « ombré » du MNT

peuvent aisément être distingués sur la vue en ombré du MNT (Fig. 4 et 5).

Afin de déterminer le bassin versant relatif à un exutoire donné, la convergence des écoulements doit être évaluée en parfaite adéquation avec la modélisation hydrologique complète consécutive, y compris pour le réseau drainant de rivières qui répond à une autre dynamique d'écoulement. La détermination du bassin versant, du réseau drainant et des chemins de ruissellement est complètement automatique et ne demande l'intervention de l'utilisateur qu'au moment de définir l'exutoire (Fig. 6 et 7).

La modélisation complète d'un événement de pluie extrême consiste alors en une première phase hydrologique, suivie d'une phase de déversement latéral dans le réseau drainant et d'une propagation complète des hydrogrammes en rivières jusqu'à l'exutoire.

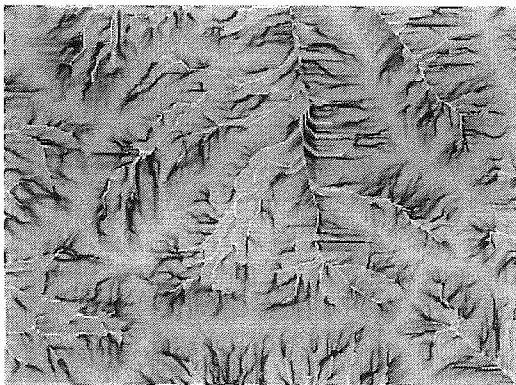


Fig. 6 : Chemins de convergence sur le bassin de Mattmark, Suisse

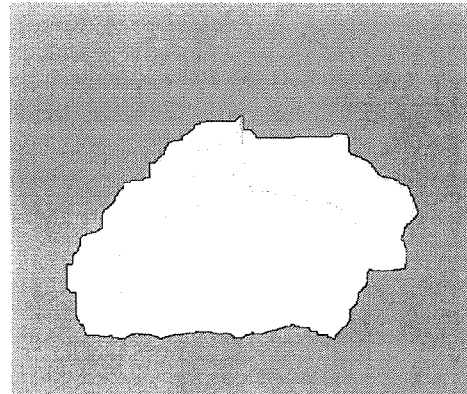


Fig. 7 : Détermination du bassin versant de Mattmark, Suisse

Le résultat d'une telle filière est représenté ci-dessous (Fig. 8) pour une pluie uniforme extrême, variable temporellement, sur un bassin considéré dans ses propriétés d'infiltration les plus défavorables. La disponibilité de mesures sur le site confirme la fiabilité et l'intérêt de telles approches distribuées pour évaluer les apports dans la retenue en conditions extrêmes.

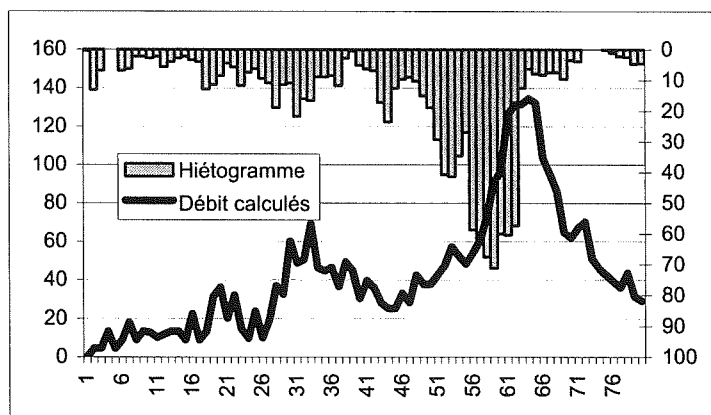


Fig. 8 : HiétoGramme d'un événement de crue extrême sur le bassin de Mattmark

#### 4. WOLF1D

Pour propager les apports latéraux de WOLFHYDRO en réseau quelconque de rivières et, en toute généralité, pour reproduire les phases instationnaires de crue en calculant l'emprise des lits majeurs, le HACH a développé une approche théorique complète des écoulements en lits composés. Elle vise à améliorer la précision des prévisions sur les hauteurs d'eau et les débits atteints en phase d'inondation dans des réseaux de rivières à sections transversales quelconques. WOLF1D résulte de leur implémentation selon les standards évoqués auparavant.

Par soucis d'efficacité numérique, deux fonctionnements possibles des zones inondées sont distingués:

1. Une inondation locale interrompue par des obstacles naturels (talus,...) ou artificiels (routes, pertuis,...) oblige le flux complet à transiter par le lit mineur de la rivière. Si la zone inondée n'est pas trop importante, son fonctionnement peut être valablement représenté par un simple stockage-déstockage sans propagation longitudinale (Fig. 9).
2. Etant ininterrompu sur une longue distance, le lit majeur continu (Fig. 10) développe un écoulement longitudinal, participant au transport global du débit de crue. Dans ce cas, une résolution complète du système d'équations s'impose pour chaque lit.

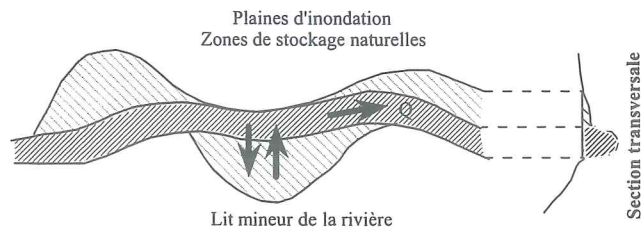


Fig. 9 : Mode d'échange en zones d'inondation ponctuelles

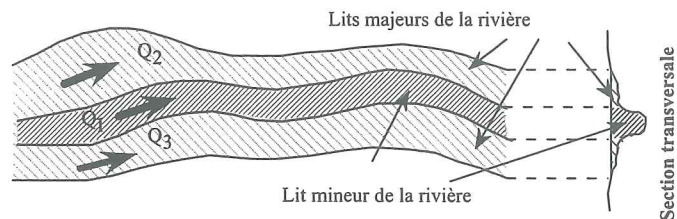


Fig. 10 : Participation du lit majeur à l'écoulement

Dans chaque situation, les échanges instationnaires sont conditionnés au choix par le différentiel de hauteur d'eau ou d'énergie. Le frottement fluide-fluide qui intervient entre lits est pris en compte, permettant de représenter l'accélération induite dans le lit majeur par le lit mineur et, en réaction, le frein à l'avancement provoqué par un écoulement plus lent en plaine d'inondation (Fig. 11 et 12).

L'application de cette approche sur des situations réelles a démontré son aptitude à représenter fidèlement les contributions de chaque lit d'écoulement.

La difficulté de gérer des phases hautement instationnaires avec des ressauts potentiels dans le réseau a conduit à développer une méthode robuste de résolution, avec possibilité d'assèchement et d'inondations locales dans chaque bras.

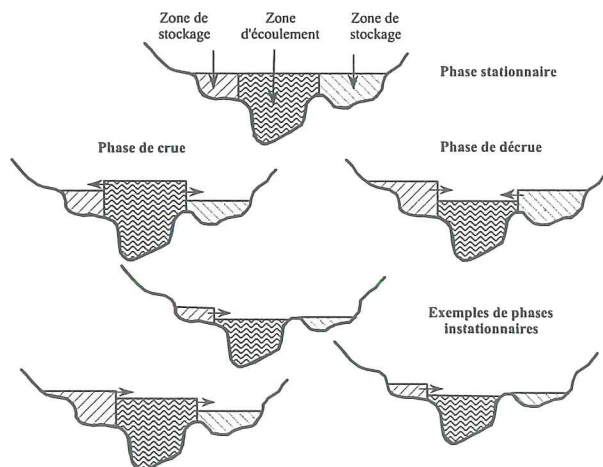


Fig. 11 : Modes d'échange instationnaires entre lits d'écoulement

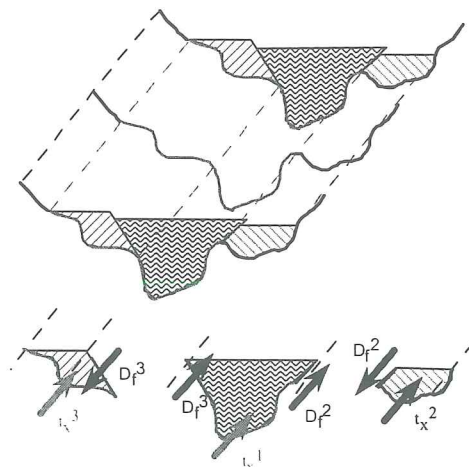


Fig. 12 : Interaction entre les différentes composantes de l'écoulement

Une version de ce code constitue un des modules du code intégré complet MOHICAN. Ce dernier programme est le résultat d'une mise en commun de l'expertise de plusieurs équipes universitaires, en réponse à la volonté et l'ambition du MET (Ministère de l'Équipement et des Transports, division des Études et des Programmes, I.G. 21, SETHY) de lancer la conception et la réalisation d'un modèle hydrologique physiquement basé pour la gestion des crues dans le bassin de la Meuse.

Ce groupe de travail est constitué de quatre équipes qui réalisent la modélisation hydrologique et la production en chaque maille (Prof. Dautrebande, FUSAG), la modélisation des nappes souterraines (Prof. Monjoie, ULg), la propagation des crues et les phases d'inondation en réseau de rivières (Prof. A. Lejeune et Prof. M. Piroton, ULg), avec une organisation générale des codes pilotant et assurant le transfert des différents flux entre sous-modules (J. Smits, ULg).

#### 4.1. EXEMPLE DE PROPAGATION D'UNE CRUE DANS LE BASSIN DE LA SEMOIS

Cette filière complète, physiquement basée, appliquée à des événements pluvieux exceptionnels connus ces dernières années, permet ainsi de reconstituer in fine la distribution temporelle de tous les apports latéraux diffus ou ponctuels dans tout réseau de rivières.

Un exemple de propagation numérique exploitant les spécificités topographiques réelles est donné ci-après pour le réseau drainant de la Semois (Fig. 13). Tout la genèse des grandes crues, la propagation différenciée des fronts dans chaque bras, venant se combiner aux confluences pour se résoudre en inondations locales est ainsi directement visualisée et devrait donner lieu à terme à une gestion optimisée des épisodes extrêmes ainsi qu'à une définition plus fine des zones les plus exposées.

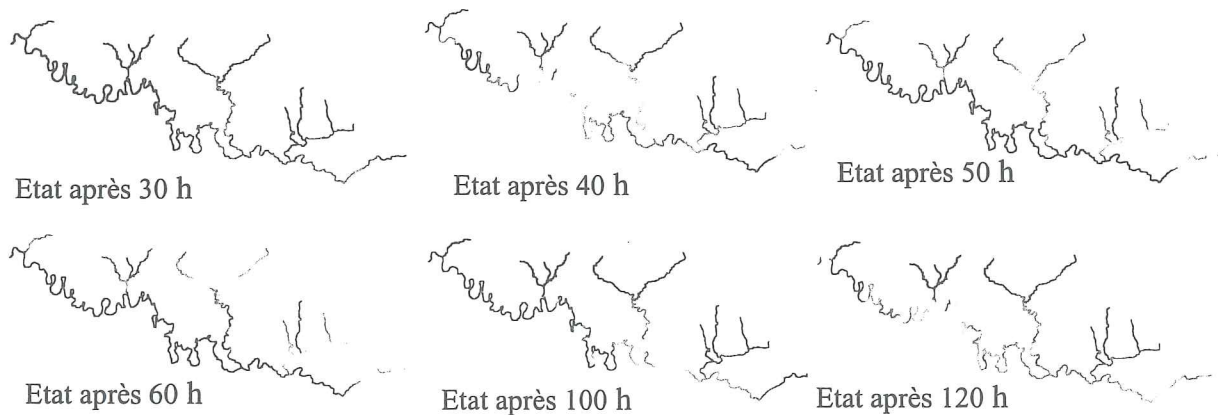


Fig. 13 : Propagation des ondes de débit dans le réseau du bassin hydrographique de la Semois

#### 4.2. GESTION DE BIEFS ÉTAGÉS POUR LE LAMINAGE DE CRUES ET LA PRODUCTION ÉLECTRIQUE

Le modèle WOLF1D n'est pas dédié qu'à la modélisation de grandes crues où les ouvrages de régulation, complètement effacés, laissent libre cours à l'écoulement.

L'introduction des lois de régulation de barrages mobiles agissant en tant que conditions limites d'un bief a été réalisée dans le logiciel. L'exercice consiste alors à tester les manœuvres des barrages afin de dégager les meilleures politiques d'action pour l'écroulement des crues dans leur propagation vers l'aval.

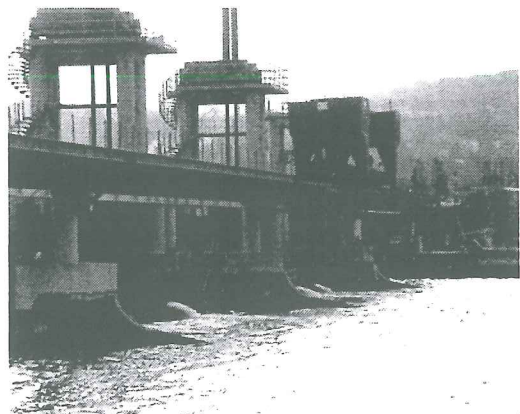


Fig. 14 : Vue du barrage mobile d'Yvoz-Ramet

WOLF1D est alors utilisé comme outil d'aide à la décision afin d'éviter les phénomènes bien connus d'amplification en chaîne au profit d'un laminage optimisé en fonction de critères de navigation, de maintien de niveau ou de débit ou d'exploitation de l'énergie, comme l'illustrent les figures suivantes (Fig. 15).



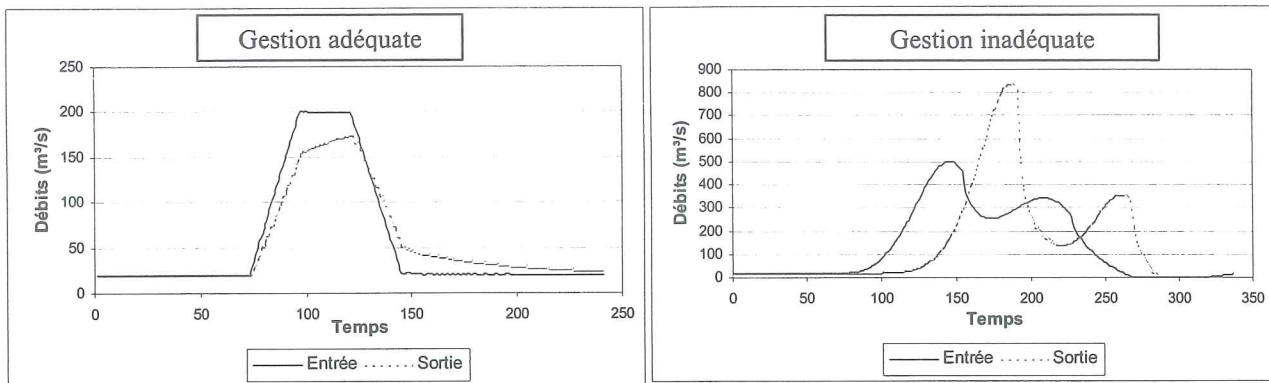


Fig. 15 : Propagation d'une crue dans 4 biefs étagés séparés par des barrages mobiles

Ce type d'approche est également appliqué à des cascades d'installations hydroélectriques. Des scénarios type de lâchers d'eau disponibles pour le turbinage sont alors optimisés avec WOLF1D de manière à exploiter tout le potentiel d'installation des centrales successives.

#### 4.3. PREVISION DE L'IMPACT DE ZONES DE STOCKAGE LATERALES POUR REDUIRE LES INONDATIONS

Par son approche originale de modélisation pratiquement bi-dimensionnelle des écoulements en rivière, WOLF1D est capable de prévoir la réduction de l'emprise des zones inondées suite à des travaux prévus sur le lit mineur de la rivière et sur son voisinage direct (Fig. 16).

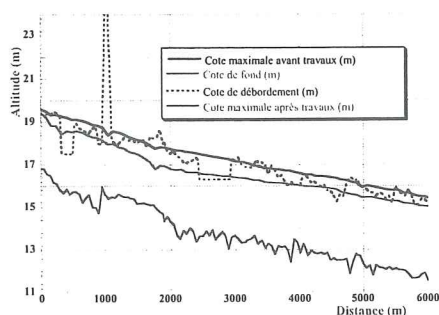


Fig. 16 : Niveaux d'eau maxima, avant et après construction des bassins latéraux

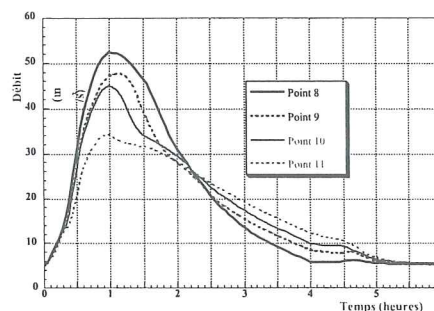


Fig. 17 : Redistribution du débit de l'Espierres le long du déversoir latéral



Fig. 18 : L'Espierres et son canal, avec ses champs inondables

Une telle approche a été mise en œuvre sur le bassin de la rivière l'Espierres (Fig. 18), près de la frontière française, afin de mettre un terme à l'occupation récurrente par les eaux des terrains avoisinants. Après reproduction numérique des situations référencées, l'optimisation de la taille, du positionnement et du design hydraulique (hauteur et longueur des crêtes déversantes, dispositif de restitution) de 2 bassins de stockage latéraux (22 et 14 ha) a été réalisée en propageant des hydrogrammes avec WOLF1D. Ce dernier a travaillé dans ce cadre sur un réseau naturel parsemé de ponceaux partiellement et transitoirement mis en charge. La réponse instationnaire du système a

permis de simuler les phases de stockage et déstockage, en discrétisant finement les seuils de déversement, afin d'évaluer précisément l'amortissement de l'hydrogramme lorsque la rivière quitte son lit mineur (Fig. 17).

## 5. WOLF2D

### 5.1. RECONSTRUCTION DU MÔLE DE FÉTINNE.

L'ancien môle de Fétinne et le barrage à aiguilles auquel il était associé furent réalisés au 19<sup>ème</sup> siècle, pour séparer la Meuse de l'Ourthe et de la Dérivation, alors à niveaux différenciés (Fig. 19).

Devenu sans utilité, ce barrage fut démoli tandis que le môle était conservé pour orienter l'Ourthe préférentiellement dans la Dérivation et éviter des courants transversaux inéluctables dans la Meuse, au détriment de la navigation.

Malgré tout, les Liégeois pouvaient observer fréquemment le courant de retour qui naissait dans le bras de Meuse pour les crues de l'Ourthe (Fig. 20), gênant considérablement la navigation.

En septembre 1998, une crue exceptionnelle de l'Ourthe fit monter le débit à la confluence à des valeurs extrêmes, tandis que la Meuse variait peu son débit. Sous la poussée de l'Ourthe, une partie du môle de Fétinne s'affaissa sur plus de 35m de long et 2.5m de profondeur, provoquant des courants transversaux dans la Meuse préjudiciables à une navigation sûre et aisée.

La Direction de la Meuse Liégeoise du Ministère de l'Équipement et des Transports (D.233) envisagea alors la reconstruction totale de l'ouvrage. Les Laboratoires furent chargés de l'étude du design hydraulique du nouvel ouvrage par recours aux outils numériques.

Grâce au logiciel de modélisation d'écoulements à surface libre bi-dimensionnels WOLF2D, une série de simulations numériques par volumes finis fut menée. L'objectif visé était multiple : éliminer le courant de retour dans la Meuse lors d'une crue de l'Ourthe, diminuer les sollicitations transversales sur le môle et assurer aux bateliers des conditions de navigation optimales.

La solution finalement retenue (Fig. 21) et réalisée conserve sensiblement les dimensions originales de l'ouvrage (pour annuler le courant de retour), mais en réalisant trois larges ouvertures dans sa partie aval en vue d'obtenir une baisse significative des sollicitations sur l'ouvrage.

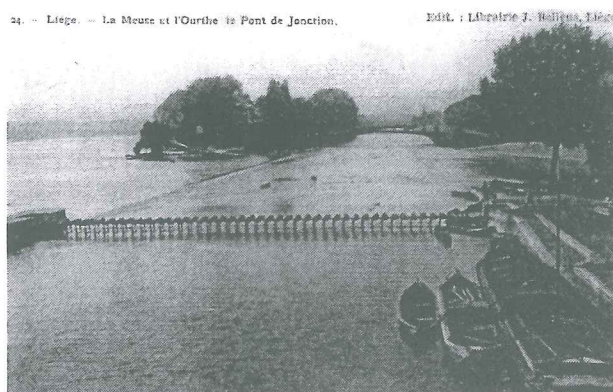


Fig. 19 : Vue historique de la confluence

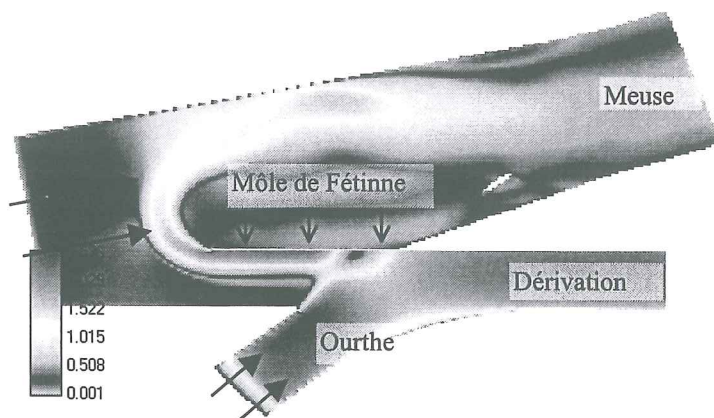


Fig.20 : Module de vitesse (m/s), situation initiale

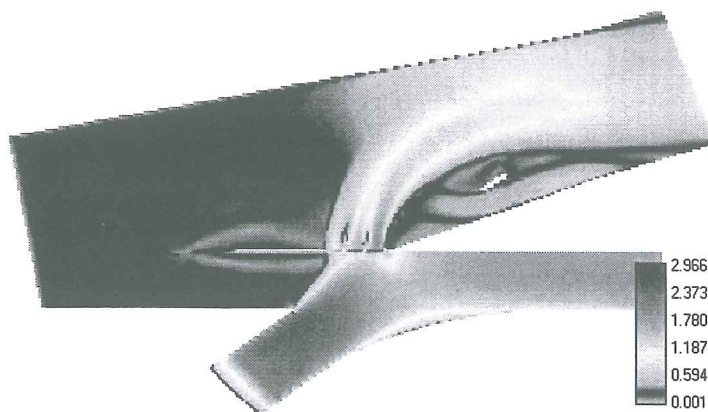


Fig. 21 : Module de vitesse (m/s), situation après travaux

## 5.2. PROJET DE GRAND BARRAGE AU LAOS

Les Laboratoires ont été chargés par E.D.F. de réaliser une étude sur modèle réduit des ouvrages hydrauliques d'un futur grand barrage au Laos. Grâce à la capacité de calcul des ordinateurs actuels, il est désormais possible de réaliser des simulations numériques d'écoulement à large échelle dans un laps de temps raisonnable.

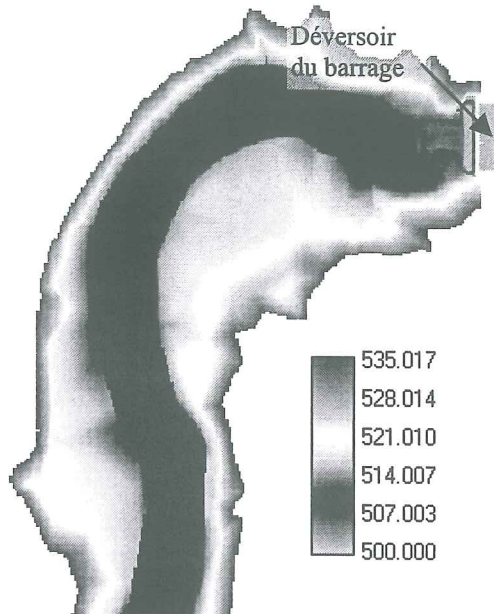


Fig. 22 : Topographie amont

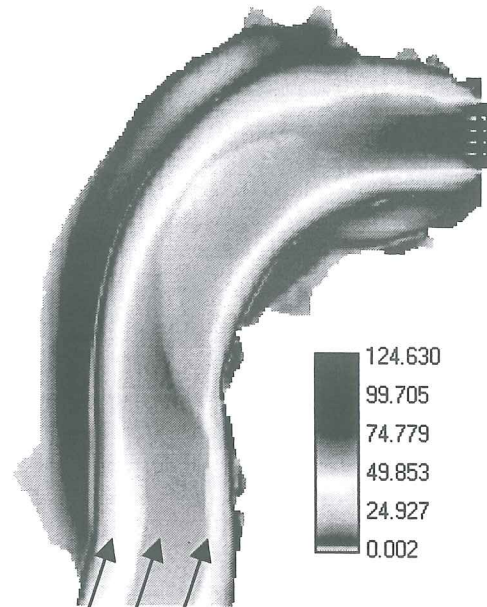


Fig. 23 : Modules de débits ( $m^2/s$ )

Dans cette optique, l'étude de l'écoulement sur le déversoir du barrage a été abordée par un couplage des techniques numériques et de laboratoire. Une première série de simulations numériques avec le logiciel Wolf2D a servi à délimiter, au départ de la géométrie globale (Fig. 22), la partie du bassin amont à réaliser en laboratoire ainsi que les dispositions particulières à envisager à l'intérieur du bac d'alimentation. Il faut souligner ici l'originalité d'une simulation globale de l'écoulement en amont, sur l'ouvrage et à son aval réalisée d'un seul tenant.

Comme le confirment les résultats de débits (Fig. 23) pour la crue de projet, l'écoulement dans le coude en amont du barrage se produit sur la plaine intérieure à la courbe, délaissant son lit naturel sur la partie gauche. Cet exemple illustre parfaitement la nécessité de recourir à des modèles intégrant toutes les caractéristiques géométriques et topographiques. L'utilisation d'un modèle unidimensionnel par exemple n'aurait pas permis d'établir cette inégale répartition du débit sur la largeur du lit. Or, c'est précisément de la bonne prédiction de cette répartition que dépend l'efficacité du déversoir sur le barrage.

La figure 24 illustre la répartition des débits sur le déversoir, ainsi que dans la fosse de dissipation. On remarque le mouvement tourbillonnaire à l'amont à gauche du déversoir, ainsi que la zone de forte turbulence dans la fosse.

La figure 25 illustre la situation hydraulique résultant d'une seule passe ouverte (zones asséchées). Les mouvements tourbillonnaires apparaissent nettement amplifiés, comme l'a validé l'essai sur modèle réduit.

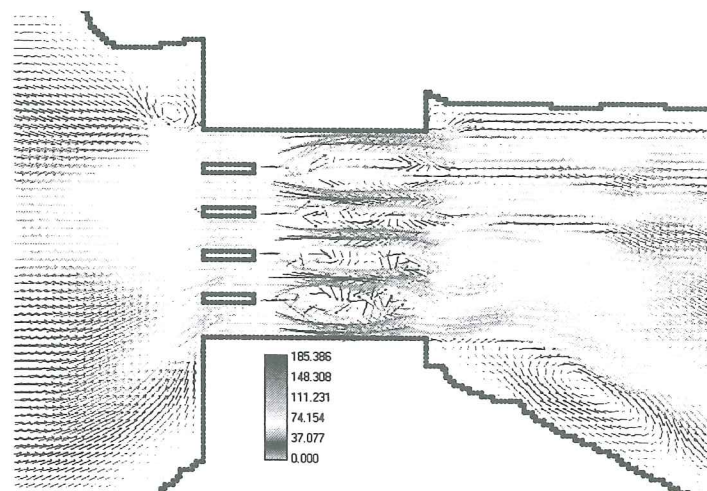


Fig. 24 : Détail des débits sur le déversoir

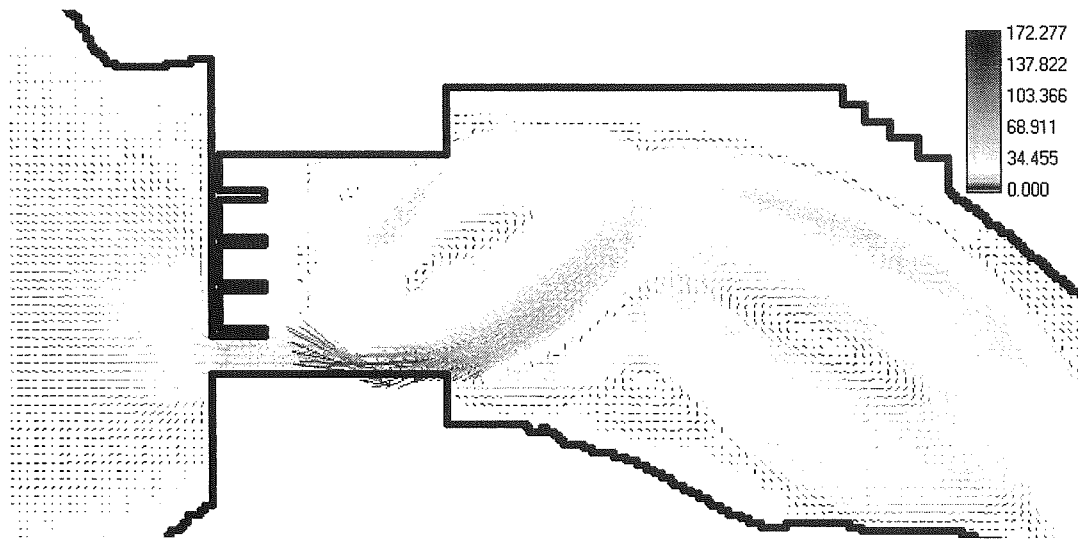


Fig. 25 : Détail des débits sur le déversoir pour une seule passe ouverte

L'expérience ainsi acquise dans l'utilisation conjointe de modèles numériques et réduits permet d'accélérer la recherche du design optimum en suggérant les zones et les problèmes sensibles.

### 5.3. PROJET D'AMÉNAGEMENT DU SITE ÉCLUSIER D'IVOZ-RAMET

Une nouvelle écluse pour convois de 9000 tonnes doit être construite sur la Meuse à Ivoz-Ramet. La construction d'un tel ouvrage a des conséquences très importantes sur l'écoulement du fleuve, notamment par l'emprise sur la voie d'eau des ouvrages annexes (garages à bateaux, môles,...). Une étude bidimensionnelle de l'écoulement dans la partie amont du site avec le logiciel WOLF2D a permis de déterminer, tout en respectant les dimensions requises pour les ouvrages, une géométrie qui maintient voir améliore les conditions actuelles d'écoulement, et ce dans toutes les situations de crue envisagées (Fig. 26).

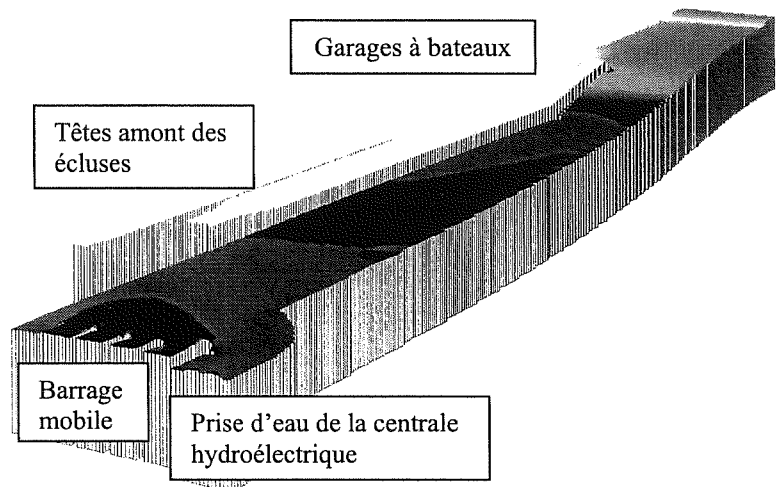


Fig. 26 : Hauteurs d'eau dans le bief modélisé

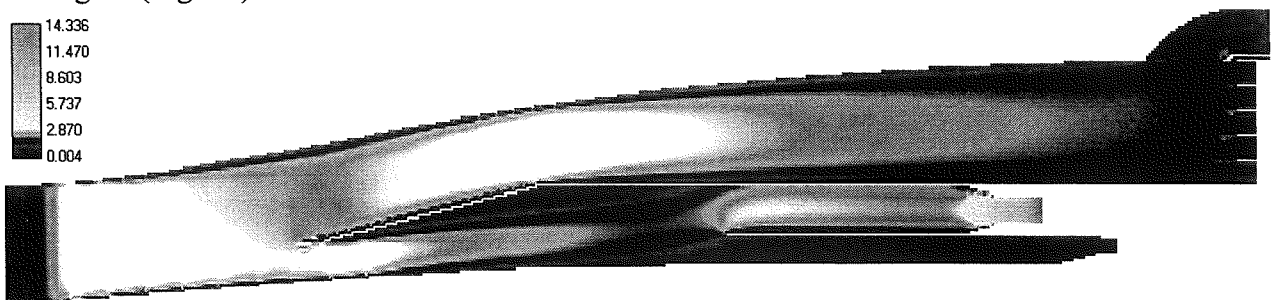


Fig. 27 : Modules des débits – Crue de 2500 m<sup>3</sup>/s – Sas de la nouvelle écluse ouvert

La simulation englobe l'écluse actuelle de 2000 tonnes, la future écluse de 9000 tonnes, les cinq pertuis du barrage mobile, la centrale hydroélectrique avec sa prise d'eau ainsi que 1400 m du bief de la Meuse à l'amont du site. Elle prend en compte la topographie du site et la loi de comportement du barrage mobile (Fig. 27).

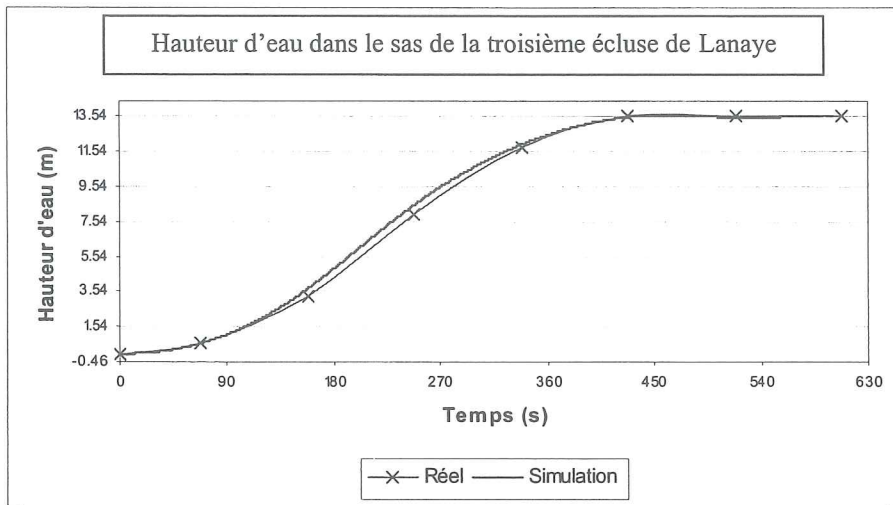


Fig. 28 : Comparaison du calcul du sassement avec la réalité

Dans le même temps, le système de sassement de la nouvelle écluse a été étudié. Suite à la modélisation de l'écoulement dans le bief amont, un système de sassement a été retenu, sur base notamment de l'implantation des prises d'eau. La résolution numérique du sassement en unidimensionnel a permis de déterminer la taille optimale des conduites et les courbes

caractéristiques du sassement, que ce soit dans le cas du remplissage ou de la vidange de l'écluse. Cette approche a notamment été validée sur la troisième écluse de Lanaye (Fig. 28).

Sur base de la répartition des débits entre les différents larrons déterminée en tenant compte de l'effet de l'inertie, une étude bidimensionnelle de l'écoulement dans le sas pour le remplissage et la vidange de la nouvelle écluse a été effectuée à l'aide du logiciel WOLF2D.

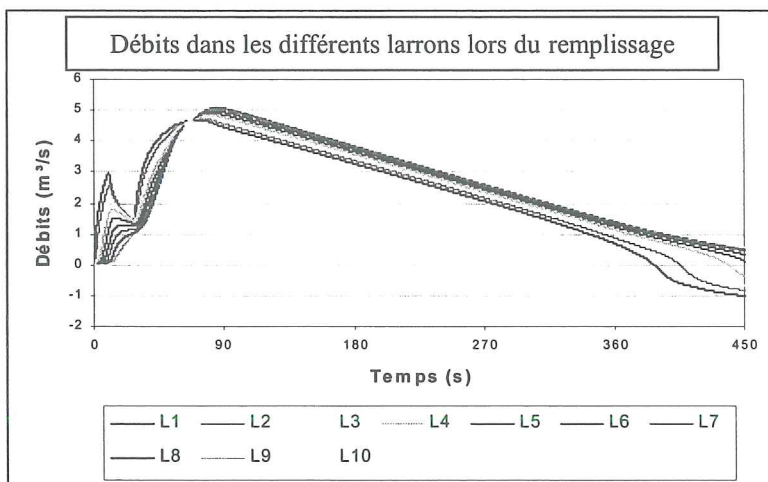


Fig. 29 : Application à la nouvelle écluse d'Ivoz-Ramet

Cette étude a conduit à la détermination de la loi d'ouverture optimale des vannes de façon à limiter le phénomène de battement dans le sas (Fig. 29 et 29bis).

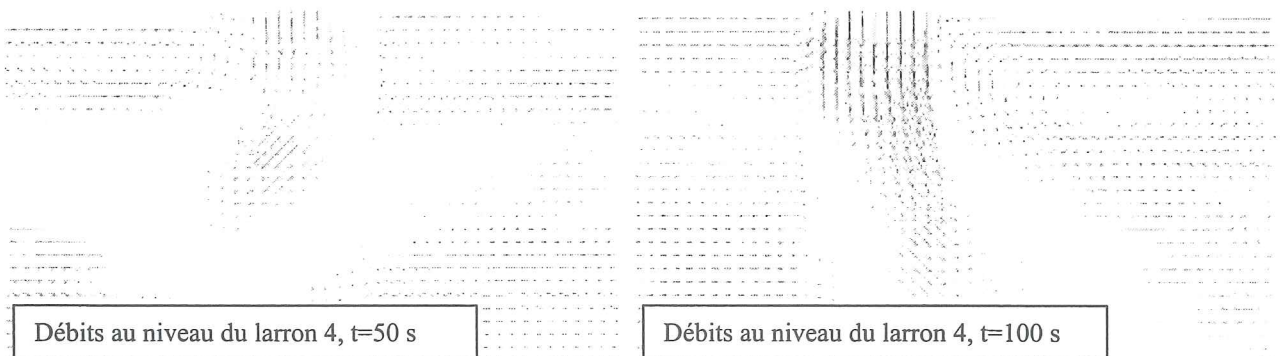
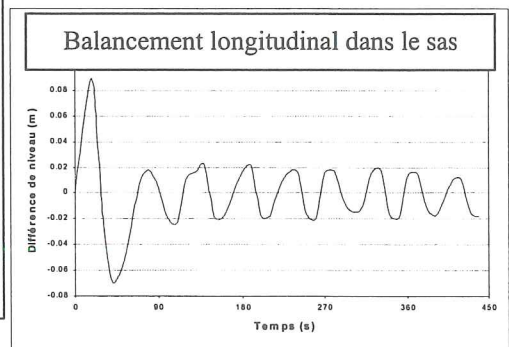


Fig. 29bis : Mise en évidence du battement dans le sas de la nouvelle écluse d'Ivoz-Ramet

## 5.4. RUPTURES DE BARRAGE

La gravité des conséquences d'une rupture de barrage permet de comprendre la position adoptée par la Commission Internationale des Grands Barrages (C.I.G.B.) vis-à-vis des grands ouvrages de retenue (cette appellation inclut notamment tout ouvrage mesurant plus de 15m de hauteur par rapport à sa fondation la plus basse). Les conséquences dramatiques qu'occasionne une rupture aux personnes et aux biens en aval des sites, incite depuis longtemps la C.I.G.B. à recommander l'établissement de cartes de zones inondables et du temps mis par l'onde pour les submerger.

En 1962 déjà, les travaux de cette Commission insistaient sur deux recensements significatifs avec 8300 grands ouvrages alors construits de par le monde et 400 barrages rompus.

Les temps de préavis supposés pour une rupture de barrage (lorsqu'ils sont estimés) sont encore actuellement le plus souvent déterminés par des essais sur modèle réduit. Mais cette technique peut désormais être secondée, voire remplacée par les modèles informatiques, en plein essor grâce à la fiabilité démontrée des codes les plus pointus en la matière et la potentialité d'une discrétisation fine des sites. Il est désormais possible d'estimer précisément les temps de propagation de l'onde, ainsi que les zones inondées en aval, base incontournable des plans d'évacuation des populations exposées.

Les deux exemples de simulation d'ondes raides qui suivent, réalisés dans le cadre d'un programme européen, illustrent cette nouvelle tendance. Ils démontrent également la polyvalence des codes, utilisés ici dans un contexte hydraulique particulièrement exigeant d'un point de vue hydraulique.

### 5.4.1. PROPAGATION D'UNE ONDE RAIDE SUR LA RIVIÈRE TOCE.

Située dans les Alpes du Nord en Italie, la rivière Toce a servi de base de comparaison dans le cadre d'une programme d'action concertée européenne sur les ruptures de barrages (CADAM). Le tronçon étudié regroupe une grande variété de reliefs (Fig. 30) : plaine inondable à l'amont, rétrécissement et contournement d'un bassin de stockage au centre, et relief de type canyon à l'aval.

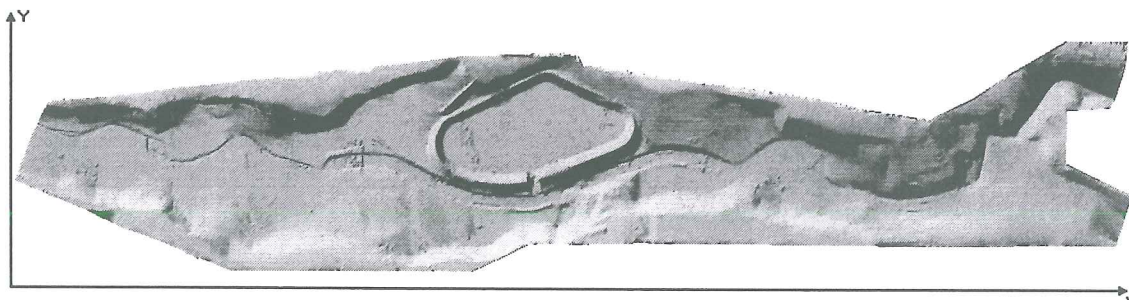


Fig. 30 : Topographie du site

Une série d'essais instrumentés sur modèle réduit ( $1/100^{\text{ème}}$ ) ont été réalisés à Milan (Enel). Ces résultats ont alors permis de caler le modèle de résolution d'écoulements quasi-tridimensionnels en topographie quelconque, et de tester plusieurs nouveaux développements de WOLF2D.

Les simulations consistaient à faire passer différents hydrogrammes dans le modèle et à mesurer au cours du temps les hauteurs d'eau atteintes en différents points. Cet essai présente de nombreuses situations d'écoulements très différenciés, ce qui le rend difficile à restituer par voie numérique. Les phénomènes à reproduire sont : topographie quelconque et très variée (alternance de vallée large et de passes étroites), propagation d'onde sur fond sec, caractère bi-dimensionnel marqué, développement de ressauts mobiles (Fig. 31), ...

Cette simulation d'onde sur fond sec a notamment incité à perfectionner la gestion de frontières mobiles internes au domaine. Afin de satisfaire le nombre de conditions limites à imposer, un traitement spécial à l'interface zone sèche – zone mouillée a dû être implémenté, sous peine de fausser la vitesse de propagation des fronts.

La figure 32 illustre la propagation du front au niveau du bassin de stockage. Les éléments hachurés représentent les zones sèches. Un ressaut hydraulique à l'amont du bassin se forme, induit par une onde de réflexion sur la paroi du bassin, tandis que le front principal poursuit sa route en contournant le bassin.



Fig. 31 : Ressaut à l'amont du barrage

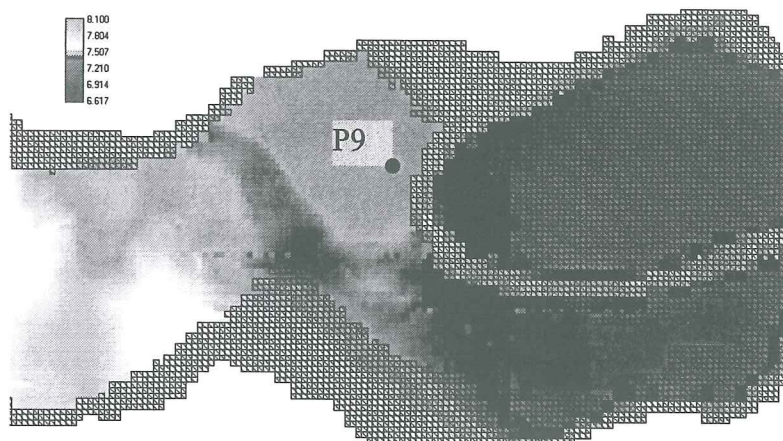


Fig. 32 : Hauteurs d'eau à l'approche du bassin de stockage

L'efficacité du modèle numérique est illustrée sur la figure 4. Ce graphique compare l'altitude de surface libre mesurée sur le modèle avec celle calculée par WOLF2D, en un point situé devant le bassin de stockage (Fig. 33).

L'estimation du temps d'arrivée du front, ainsi que la prédiction de l'altitude de surface libre sont de très bonne qualité, compte tenu de l'accumulation de phénomènes complexes à modéliser.

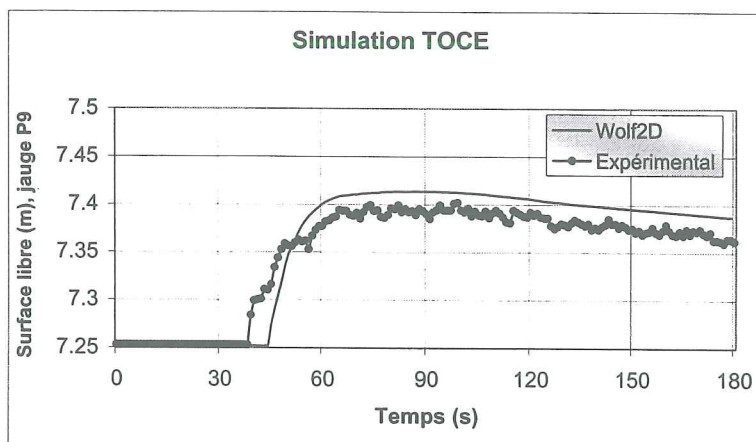


Fig. 33 : Comparaison résultats numériques – essai sur modèle

#### 5.4.2. SIMULATION DE LA RUPTURE DU BARRAGE DE MALPASSSET

Le 2 décembre 1959, lors de son premier remplissage, le barrage-voûte de Malpasset se rompit brutalement et complètement (Fig. 34). La retenue de 55 millions de m<sup>3</sup> se propagea alors vers la ville de Fréjus, située 12km plus en aval. Des blocs de béton de plusieurs dizaines de tonnes furent retrouvés sur des centaines de mètres en aval.

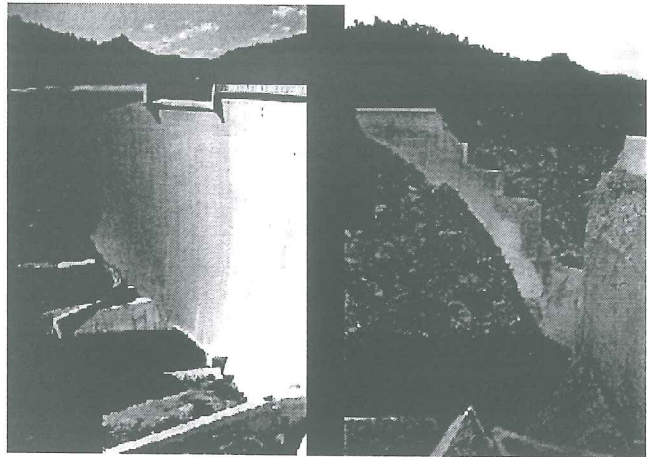


Fig. 34 : Situation avant – après rupture

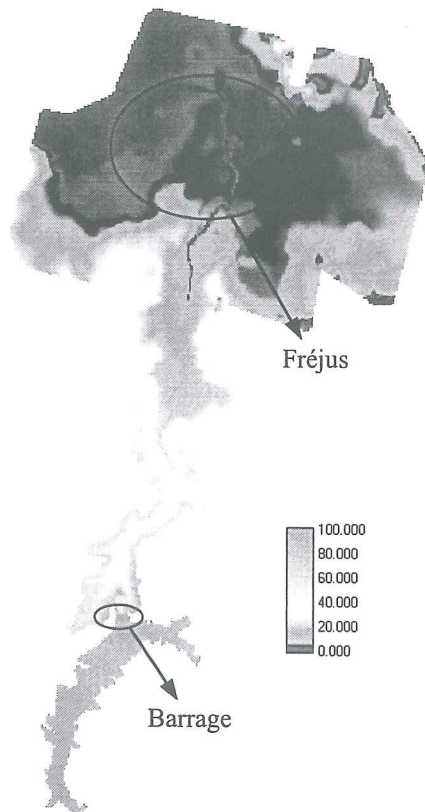


Fig. 35 : Situation avant rupture

plaine de Fréjus, tandis qu'à l'amont on retrouve un niveau d'eau constant, représentant la retenue avant rupture.

Les résultats obtenus ont été comparés avec certaines informations qui ont pu être déduites lors de la rupture, notamment des temps de propagation entre différentes bornes électriques du domaine traversé par l'onde.

La figure 36 donne une idée de l'épanouissement du front d'onde dans la plaine de Fréjus. Comme on le voit, le front ne se dirige pas uniquement vers le littoral, mais progresse également vers des zones situées à l'opposé.

L'étude de rupture de barrages, compte tenu des moyens informatiques disponibles actuellement, donne désormais des résultats fiables, même dans des conditions de topographie et d'écoulements très variés. Cet outil est donc opérationnel pour réaliser toute étude d'impact sur les zones habitées en cas d'exploitation accidentelle au sens large d'ouvrages de retenue.

Cette catastrophe, une des plus meurtrières en Europe (433 morts recensés), posa de manière aiguë le problème de la sécurité des grands ouvrages de retenue et fut à la base d'une évolution sensible de la réglementation française en matière de risques.

Dans le cadre européen évoqué précédemment, une simulation à grande échelle de la rupture du barrage de Malpasset a été entreprise au HACH. Grâce à une connaissance très précise de la situation topographique du site (fournie par EDF), la discrétisation prise en compte par WOLF2D a pu descendre en précision à des mailles de 40m de côté (plus de 40 000).

La figure 35 illustre la topographie du site étudié. On distingue notamment à l'aval du barrage une partie fort sinueuse, avant l'épanouissement dans la

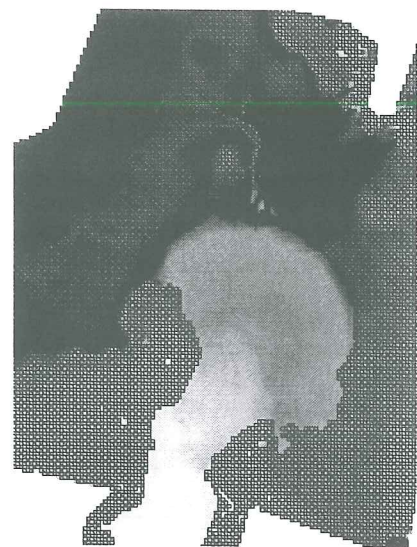


Fig. 36 : zone de Fréjus



## 6. CONCLUSION

L'essor considérable que connaît actuellement l'hydrodynamique de surface s'explique globalement par les fantastiques perspectives récemment ouvertes par le numérique.

Car si ses fondements mathématiques ont majoritairement été posés par les grands savants des siècles passés, la pleine mesure de leur potentiel n'a réellement émergé que des résultats fiables et précieux obtenus par leur résolution, basée sur des approches quotidiennement repensées à travers le monde.

L'évolution des outils permet aujourd'hui d'appliquer l'hydrodynamique numérique à des cas concrets de prévision, de gestion et d'optimisation des ressources hydrauliques utilisées toujours plus intensivement.

Il n'en demeure pas moins que l'évolution constante des outils d'hydraulique de surface et de leurs potentialités va de pair avec une remise en cause de l'interaction de l'écoulement lui-même avec son environnement, synthétisée souvent avec beaucoup de génie dans des lois empiriques transmises des siècles passés (lois de frottement avec le sol, par exemple).

Ce qui fait la richesse du travail de l'ingénieur, sa confrontation directe avec le monde qui l'entoure, se doit ainsi d'évoluer de concert dans sa description, ce qui renforce le rôle primordial et la complémentarité de l'expérimental dans les succès de l'hydraulique numérique.

La progression des codes numériques entièrement élaborés au sein du HACH n'échappe pas à cette logique, puisqu'elle s'appuie sur un travail expérimental plus que d'actualité, riche d'enseignements et parfaitement complémentaire.

## 7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. PIROTTON, *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.
- [2] MOUZELARD Th., Résolution des équations d'Euler quasi-tridimensionnelles en instationnaire, Travail de fin d'études, Université de Liège, juin 1998.
- [3] ERPICUM S., Étude du sassement de la nouvelle écluse d'Ivoz-Ramet, Travail de fin d'études, Université de Liège, juin 2000.
- [4] PIROTTON M et LEJEUNE A. (en collaboration) *River design and environmental protection in Europe : Planning of the river Ourthe in Wallonia, Belgium*, Editor : URENA J.M., Universidad de Cantabria, Sanatander, pp. 401-508, 1999
- [5] MOUZELARD Th., ARCHAMBEAU P. & PIROTTON M., An effective resolution of quasi-3D surface flows for spillways design and impact studies, *Hydroinformatics* 2000.