

# MODELE HYDROLOGIQUE CONCEPTUEL DISTRIBUE D'ECOULEMENT QUASI-TRIDIMENSIONNEL EN FINE LAME SUR LE BASSIN VERSANT

## CONCEPTUAL DISTRIBUTED HYDROLOGICAL MODEL OF QUASI- TRIDIMENSIONAL RUNOFFS ON NATURAL CATCHMENTS

Dr. M. Pirotton  
Assistant  
Université de Liège - Service des Constructions Hydrauliques  
Institut du Génie Civil  
6, Quai Banning - B.4000 Liège - Belgique

### Résumé

L'évolution spectaculaire des capacités informatiques ouvre des horizons nouveaux pour la modélisation des écoulements hydrologiques sur bassins versants, en particulier pour les méthodes qui s'intéressent directement au ruissellement de la fine lame fluide sur le sol.

Cet article suggère une approche davantage orientée sur les réalités physiques de ces écoulements hydrologiques en fine lame. Il établit la pertinence du modèle cinématique pour refléter les processus que connaît la goutte de pluie, depuis son martèlement sur le sol jusqu'à son aboutissement dans le réseau drainant du bassin.

Néanmoins, l'application de ce modèle non-linéaire demeure très limitée et conduit à de substantielles erreurs en topographie réelle aussi longtemps qu'est ignorée la présence potentielle de discontinuités dans l'écoulement. Celles-ci sont donc analysées afin de proposer une approche numérique fiable conciliant enseignements théoriques et physiques ainsi que réalités numériques. Travaillant sur des topographies quelconques digitalisées, le code éléments finis gère les variations spatiales et temporelles des précipitations et des propriétés de terrain. Les applications témoignent des avantages inhérents à cette approche physique, avec un calage plus aisé des valeurs des paramètres physiques dont la variation peut aisément refléter tout impact d'une quelconque modification des caractéristiques du bassin par l'activité humaine.

### Abstract

The improvement of computer hardware opens up encouraging prospects in the computation of catchment hydrology, especially in the relatively new trend of direct modelization of the thin water layer flowing on the ground.

This paper suggests a more realistic mathematical approach in terms of understanding the physics of overland flows. The kinematic wave approximation is demonstrated to be suitable to handle the transformation processes arising after the fall of the raindrop on the ground up to the flows that it induces at the outlet of the catchment. However, the superiority of a numerical code based on this non-linear formulation can lead to substantial errors, mainly by neglecting the presence of potential discontinuities.

Modifying the classical formulation, a robust finite element approach is proposed to work on a general digital terrain model and to handle spatial and temporal variations of rainfall and soil properties. Applications demonstrate accurate and encouraging results in understanding hydrologic flow processes. Several advantages of a physical reasoning in modelizations are highlighted, improving and hastening the calibration stage and reflecting easily the impact of any change of catchment features on the hydrograms poured along the ramified streams that drain it.

FIG.13. French Maximum Rainfall:  
Distribution of Pmaxd

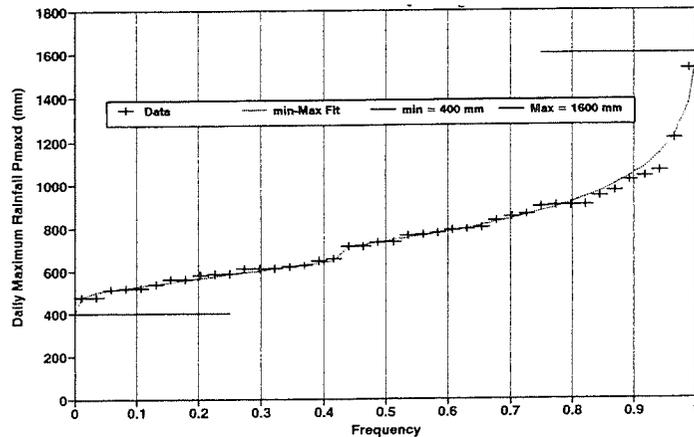
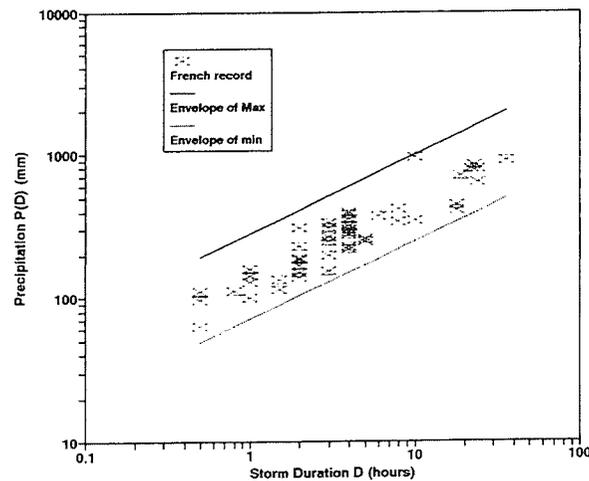


FIG.14. French Maximum Rainfall:  
Precipitation vs. Duration



## 1. INTRODUCTION

Si la connaissance de la science et des techniques de l'eau a balayé certaines croyances superstitieuses de jadis, si les responsabilités croissantes des concepteurs prennent résolument le pas sur le caractère inéluctable et les sentiments fatalistes d'antan, la réalité parfois tragique des dernières crues rappelle que la protection contre les avatars de la nature demeure un défi majeur pour nos sociétés industrialisées.

La prévision fiable des crues ne reste pas seulement un objectif majeur dans toute politique de prévention et une étape fondamentale dans tout dimensionnement économique et sécuritaire. Elle s'impose également comme un des fondements d'une gestion optimale des ressources hydrauliques, basée sur l'anticipation et respectueuse des populations aval. La compréhension et la modélisation des processus de transformation hydrologique d'un signal de pluies en un signal de débits à l'exutoire s'efforcent de répondre à ces attentes.

Force est de reconnaître que cet article s'inscrit dans un foisonnement actuel de méthodes et de modèles présentés dans la littérature spécialisée. Celle-ci témoigne par ailleurs d'une grande diversité et de singulières divergences dans les philosophies suivies pour aborder le domaine de l'étude de la formation des débits de crue, consécutifs aux précipitations. L'importance des enjeux fondamentaux n'est pas seule responsable de cette situation assez paradoxale qui tient notamment au contexte particulièrement complexe et varié des processus à prendre en compte, au point que la remise en cause fondamentale de Naef [1] en 1981 sur les possibilités d'une modélisation du processus pluie-écoulement est loin d'être obsolète.

L'importance relative de la contribution de chaque intervenant dans la combinaison finale pour l'élaboration du signal de sortie reste particulièrement difficile à déterminer, d'autant que toute expérimentation à l'échelle du bassin versant est impossible. Dans ces conditions, la modélisation devient l'unique possibilité d'analyse et de déduction, qui doit s'appliquer à chaque situation particulière que représente tout bassin par sa taille, ses particularités morphologiques, hydrologiques et géologiques.

L'indispensable globalisation de certains processus ainsi que l'introduction d'hypothèses simplificatrices est à l'origine du nombre de modèles. Elles expliquent par ailleurs les déficiences de la plupart des codes appliqués dans des contextes sensiblement différents de ceux pour lesquels ils ont été conçus. Ces expériences suggèrent à tout le moins de la clairvoyance, tant au niveau des simplifications choisies que de leurs éventuelles implications au moment d'interpréter des résultats.

Les préoccupations du contrôle des ressources hydrauliques et de la prévision des évolutions d'un système hydraulique, étroitement liées à la notion de gestion, sont des aspects très actuels. Si elles ouvrent de nouvelles perspectives en modélisation hydrologique, elles montrent également les limites de certains types de modèles et infléchissent la philosophie générale des modèles à développer.

La compréhension des processus de transformation des signaux de pluie sur le bassin permet en effet d'envisager une mesure en temps réel afin de construire préventivement la réponse à l'exutoire et de susciter anticipativement des réactions adéquates de gestion.

Mais l'exploitation de modèles hydrologiques doit surtout permettre aujourd'hui de mieux contrôler divers projets d'actions altérant certaines spécificités du bassin, en faisant mieux comprendre, par la simulation d'événements pluvieux, leur répercussion sur sa fonction de transformation.

Ce dernier aspect est déterminant dans la mesure où les approches classiques de modélisation hydrologique, procédant par transformation paramétrée d'un signal d'entrée en un signal de sortie montrent à cet égard certaines limitations marquantes : dans les longues campagnes de mesures que ces modèles réclament pour leur calibrage, les méthodes d'ajustement rendent souvent difficile voire impossible toute interprétation physique des paramètres utilisés.

Consécutivement, une quelconque prévision de modification de terrain ne peut être assurée de façon fiable par une répercussion évidente sur la valeur des paramètres. Enfin, ils exploitent rarement les données topographiques, la caractérisation des types de sol et des couvertures végétales rencontrées, ou encore l'inégale répartition spatiale des précipitations.

C'est pour remédier à ces déficiences qu'apparaissent très progressivement des modèles conceptuels distribués qui développent une analyse physique du phénomène en examinant l'écoulement de la fine lame d'eau sur le bassin.

Ces approches s'avèrent capables, non seulement de prévoir la réponse du système à une pluie donnée, mais la signification physique conférée aux paramètres permet de contrôler divers projets d'actions altérant certaines spécificités du bassin. En modifiant la valeur des paramètres concernés, la simulation d'événements pluvieux fait mieux comprendre la répercussion de toute intervention de l'homme sur la fonction de transformation du bassin versant. En outre, dans la phase de calage sur un bassin particulier, il devient possible de réagir à un manque de signaux d'entrée-sortie expérimentaux en faisant varier la valeur des paramètres dans une gamme physiquement raisonnable afin d'examiner l'incertitude du signal de sortie face aux incertitudes qui sont susceptibles d'affecter les données.

En marge des modèles classiques de transformation paramètre, ce travail analyse donc la physique du phénomène en représentant le ruissellement quasi-tridimensionnel de la lame fluide. Cette approche n'est pleinement justifiée que si elle s'avère capable de travailler directement sur carte topographique digitalisée sans aucune phase préalable d'idéalisation de la géométrie. Ce cadre très libéral pose de nombreuses difficultés tant mathématiques que numériques puisqu'à l'instar d'autres écoulements de surface intégrant des ressauts, des discontinuités apparaissent dans ces écoulements instationnaires.

Une analyse théorique sur la signification de ces chocs, suivie de l'élaboration d'une méthode numérique originale de résolution, est proposée afin d'obtenir un logiciel qui reproduit fidèlement toutes les spécificités des écoulements, sans effet parasite.

Ses outils périphériques de maillage automatique, de détermination automatique des limites du bassin, de décomposition automatique en sous-bassins, ses possibilités de visualisation, la fiabilité et les performances de son module de calcul, sont illustrés dans l'analyse d'un événement pluvieux sur un bassin belge tandis que la simulation d'une modification de terrain met en exergue les avantages inhérents à une approche physique du phénomène tenant compte à la fois de l'irrégulière répartition des précipitations et des données morphologiques évolutives des terrains.

## 2. MODÈLE MATHÉMATIQUE D'ÉCOULEMENT HYDROLOGIQUE

Sans préjuger du type d'écoulement au travers de la veine fluide, les équations de base de l'hydraulique sont intégrées sur l'épaisseur d'eau en tenant compte de l'épaisseur très faible de la lame ruisselante sur le bassin comparée à ses autres dimensions spatiales. On retrouve alors un système d'équations bien connu sous le nom "d'équations en faible profondeur". Si sa résolution est largement documentée dans la littérature, il semble plus raisonnable d'exploiter davantage les spécificités du contexte hydrologique afin de déboucher sur des équations plus particularisées.

Soucieux d'apporter certains éléments de réponse sur la validité de simplifications mathématiques plus spécifiques aux phénomènes étudiés, quelques hydrologistes ont entrepris l'étude théorique et sur modèles réduits de géométries élémentaires, particulièrement de plans inclinés à cause de l'écoulement unidimensionnel qu'ils suscitent. La mise sous forme adimensionnelle des équations dans ce cadre restreint s'effectue par rapport aux grandeurs caractéristiques suivantes :  $l_0$  représente la longueur caractéristique d'écoulement et  $h_0$ , la profondeur de la lame à l'exutoire.  $u_0$ , par sa définition de vitesse uniforme au même endroit,

se trouve liée à  $h_0$  par une expression caractéristique du type d'écoulement, généralisée sous la forme suivante ( $\alpha, \gamma$  positifs) :

$$\sin \theta = \alpha \frac{u_0^\beta}{h_0^\gamma} \quad (1)$$

Quant au terme de pente de frottement dans l'équation dynamique, il prend très classiquement une forme mathématique identique à celle du mouvement uniforme correspondant. Compte tenu de ces grandeurs, les formes adimensionnelles de la continuité et de l'équation dynamique s'écrivent respectivement :

$$\frac{\partial h^*}{\partial t^*} + \frac{\partial(u^* h^*)}{\partial x^*} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{g h_0 \cos \theta}{u_0^2} \frac{\partial h^*}{\partial x^*} = \frac{l_0 g \sin \theta}{u_0^2} \left( 1 - \frac{u^{*\beta}}{h^{*\gamma}} \right) - \frac{u^*}{h^*} \quad (3)$$

Cette dernière met en évidence l'existence de deux paramètres : le nombre de Froude  $f_0$  ainsi que le nombre d'onde cinématique  $k_0$ , cité la première fois par Woolhizer et al [2] en 1967 :

$$f_0^2 = \frac{u_0^2}{g h_0 \cos \theta} \quad k_0 = \frac{l_0 g \sin \theta}{u_0^2} = \frac{l_0 \operatorname{tg} \theta}{h_0 f_0^2} \quad (4)$$

Leurs valeurs relatives donnent lieu à trois approximations possibles de l'équation dynamique selon que  $k_0$  prend une valeur importante (approximation de l'onde cinématique), selon, au contraire, qu'elle est négligeable (approximation de l'onde de gravité) ou, enfin, selon que le nombre de Froude est négligeable mais que son produit avec  $k_0$  garde une valeur significative (approximation de l'onde de diffusion).

Les enseignements de Woolhizer et al permettent de préciser le sens des adjectifs "important, négligeable ou significatif" puisqu'ils fixent à 10 la limite de  $k_0$  au-delà de laquelle l'onde cinématique approxime valablement les équations complètes.

En entreprenant une étude similaire par éléments finis, Al-Mashidani et Taylor [3] concluent que la borne inférieure de  $k_0$  pour passer à l'onde cinématique doit être revue d'autant plus à la hausse que le nombre de Froude est petit.

Quant aux expérimentations numériques de Morris [4] et Daluz Vieira [5], elles complètent l'information sur le comportement de l'approximation de l'onde dissipative en balayant systématiquement tout le champ des paramètres pour les trois approximations possibles soumises à deux types de conditions limites aval.

En conclusion, l'expérience des hydrologistes les incite à affirmer que l'écoulement sur des pentes naturelles situe généralement les couples de valeurs ( $f_0, k_0$ ) dans des zones où l'approximation cinématique est licite. Ce n'est que sur les faibles pentes courtes et à débit latéral important des régions urbanisées qu'il faut se montrer plus circonspect quant au choix entre l'approche cinématique ou diffusive.

L'option de l'onde cinématique s'annonce comme une alternative d'autant plus judicieuse en écoulement hydrologique de surface qu'elle réduit sensiblement l'effort numérique en n'impliquant plus a priori qu'une seule variable. L'équation de continuité s'écrit en effet sous sa forme générale tridimensionnelle, après remplacement des composantes de vitesse par leur expression explicite en fonction de la hauteur d'eau :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (a' h^{m+1} \cos \theta_s) + \frac{\partial}{\partial y} (a' h^{m+1} \sin \theta_s) = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = (r - i) \cos \theta_z \quad (5)$$

avec :

$h$	l'épaisseur de la lame fluide
$q_x, q_y$	les composantes du débit selon les axes $x, y$
$r, i$	respectivement les précipitations et la vitesse d'infiltration dans le sol
$\theta_i$	l'opposé de l'angle que fait la topographie locale avec l'axe $i$
$\cos \theta_s, \sin \theta_s$	les composantes dans le plan $(x, y)$ de la tangente à une trajectoire quelconque $a'$
$a'$	une fonction des caractéristiques topographiques et morphologiques du terrain ainsi que du type d'écoulement au sein de la lame

### 3. ENSEIGNEMENTS EXPÉRIMENTAUX

La confrontation de la théorie à la pratique contribue non seulement à vérifier le bien fondé de ces assertions mais surtout à statuer sur la loi de frottement [réflétée par les paramètres, a priori inconnus, de (1) ou (5)], laminaire ou turbulente, qui prévaut sur l'épaisseur d'écoulement.

Si l'alignement général des points expérimentaux sur une courbe type rencontre pleinement l'espoir d'une validation des hypothèses théoriques, les tests de Morgali [6] révèlent à l'évidence des comportements distincts avec une lame régulièrement formée sur le bitume qui contraste singulièrement avec la progression chaotique des filets entre les brins de gazon. Par ailleurs, l'expérimentation hydrologique confirme la logique d'une relation, classique en mouvement permanent, entre l'état d'écoulement et le nombre de Reynolds. Une transition d'état est donc inéluctable pour chaque type de couverture, impliquant consécutivement une coexistence de plusieurs états dans une même simulation, puisque l'étude d'un hydrogramme complet balaye spatialement et temporellement une gamme étendue de nombres de Reynolds. Un comportement laminaire perpétuel persisterait par exemple à l'amont d'un bassin, tandis que l'aval subirait une transition d'état qui "remonterait" vers la ligne de crête au fil du temps pour se stabiliser en une région du bassin, à l'équilibre.

La gestion déjà complexe d'une turbulence qui naît ou s'évanouit graduellement sur une frange de nombres de Reynolds dépendante des circonstances du mouvement se complique d'autant plus qu'il faut composer avec certains intervenants spécifiques, comme le martèlement de la surface libre par la pluie. Les perturbations qu'il provoque modifient fondamentalement les caractéristiques de frottement au point de suffire, dans certains cas, à provoquer une transition directe turbulent-laminaire, dès l'arrêt des pluies. Lorsqu'elles cessent, le ruissellement cherche un nouvel équilibre qui se manifeste par un sursaut caractéristique dans les hydrogrammes consécutif à une augmentation plus rapide de vitesse que la décroissance graduelle de hauteur.

Ainsi, Morgali démontre un comportement totalement laminaire lors d'une phase de récession sur gazon alors que l'aval au moins du plan incliné connaissait un mouvement turbulent à l'équilibre. Les études de Yu et al [7] suggèrent que les variations du frottement ne créent un pic visible dans les hydrogrammes que lorsqu'elles s'accompagnent d'un changement d'état. Ainsi, pour un nombre de Reynolds supérieur à 2000, l'impact des gouttelettes contribue peu à une turbulence que l'écoulement sait entretenir à lui seul alors que, parallèlement, il existe une valeur en deçà de laquelle la pluie ne parvient plus à perturber un écoulement trop stable.

Puisque la nature n'opère pas de sélection sur le type d'écoulement qui prévaut en hydrologie de surface, que les deux états, laminaire et turbulent, coexistent et organisent leur transition sur une plage variable de nombres de Reynolds, il paraît sage de rechercher un compromis en recourant à la loi de Manning qui, comme l'établissent notamment les travaux de Weather et al [8] ou d'Overton [9], ne se solde pas par des erreurs significatives lorsque des régions à écoulement laminaire existent.

#### 4. RECOURS A LA THÉORIE CINÉMATIQUE EN TOPOGRAPHIE RÉELLE

Le développement actuel des modèles numériques de terrain ne peut qu'inciter à échapper au carcan fréquent de raisonnements unidimensionnels, qui conduisent majoritairement à idéaliser un terrain d'écoulement en une série de plans inclinés dont l'extrémité amont coïncide avec la crête de partage et l'extrémité aval avec un segment de cours d'eau drainant.

Une telle simplification en long des irrégularités topographiques de chaque bande de terrain occasionne un appauvrissement significatif des informations contenues dans l'hydrogramme qui se déverse dans tout segment de rivière (Lane et al [10]), nonobstant le problème crucial du critère qui fixe ces pentes équivalentes.

La perspective d'une totale liberté dans la représentation topographique implique néanmoins une extension d'utilisation de l'approximation cinématique à des topographies en long beaucoup plus générales que celles abordées expérimentalement. Cette démarche théorique trouve sa justification dans la simple évaluation des ordres de grandeur caractéristiques qui révèle la totale inutilité de prendre en compte les équations complètes pour des topographies globales, compte tenu de dimensions raisonnables pour le maillage spatial et de l'épaisseur moyenne de lame ruisselante.

La discrétisation "macroscopique" de la topographie et des propriétés morphologiques de terrain s'accorde complètement avec une autre intégration, plus "philosophique", des processus naturels. En effet, les réalités de ces phénomènes sont si complexes en hydrologie et les propriétés intrinsèques si anisotropes que la seule voie raisonnable consiste à les intégrer et à les moyenner à une échelle très supérieure à celle des accidents locaux de la topographie ou de l'écoulement.

En accommodant au mieux ces aspects, la théorie cinématique propose une formulation dépouillée qui conserve pourtant la richesse fondamentale des modèles non-linéaires.

C'est précisément de cette richesse de représentation que naissent des difficultés en propageant et déformant les signaux de manière complexe pour aboutir, en certaines circonstances, à des discontinuités que ne résolvent pas systématiquement des théories plus affûtées.

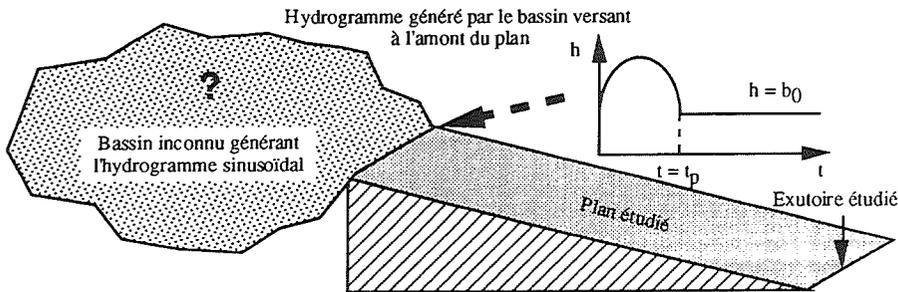


Fig 1 : Disposition générale du bassin versant étudié

Envisageons une application unidimensionnelle sous un angle un peu singulier. Le bassin étudié est soumis à des pluies d'intensité constante. Il se termine à son aval par un plan incliné. Du bassin hydrologique amont, nous ne connaissons que l'hydrogramme qu'il provoque à l'origine amont du plan incliné. A cet endroit, nous savons que l'évolution temporelle de la hauteur d'eau a la forme d'une sinusoïde puis se poursuit par une hauteur constante (figure 1).

La solution analytique adimensionnelle est illustrée à la figure 2 pour un écoulement turbulent ( $m = 2/3$ ). Puisque la célérité est une fonction croissante de la hauteur, le profil se déforme, passe par une pente de surface libre infinie puis adopte un profil déferlant très esthétique mais sans aucune correspondance physique compte tenu d'une relation univoque entre hauteur et vitesse.

Cette singularité inspire deux réflexions principales sur le système d'équations. D'une part, la forme différentielle de l'équation de continuité exclut d'emblée toute discontinuité dans la solution alors que la conservation de volume peut être assurée dans ces situations. Un retour à la formulation originelle s'impose pour procéder à un élargissement du champ des solutions aux discontinuités.

D'autre part, dans la mesure où il existe, du moins localement, une contradiction par rapport aux hypothèses émises, un nouvel examen théorique des simplifications s'impose pour déterminer dans quelle mesure les termes éliminés peuvent résoudre les singularités du problème.

Résumons les conclusions de cette analyse en situant le comportement des équations originelles complètes par rapport à la solution finalement adoptée. Cette dernière consiste à admettre, dans la solution, des chocs qui vérifient la continuité, tandis que de part et d'autre de ces discontinuités est maintenu le modèle cinématique, qui se confirme être une approximation valable.

Certes, la théorie complète tempère cette apparition impromptue de chocs en parvenant, dans certaines limites, à maintenir la solution continue. Dans ces situations, le choc cinématique se substitue alors à une transition continue mais concentrée sur un espace si réduit qu'une discontinuité brusque constitue une approximation très raisonnable.

Mais en dehors de ces cas, des discontinuités réelles subsistent, ressauts instationnaires qui font partie intégrante du "paysage classique" de l'hydraulique de surface et qui se produisent ici sur une lame fluide de très faible épaisseur.

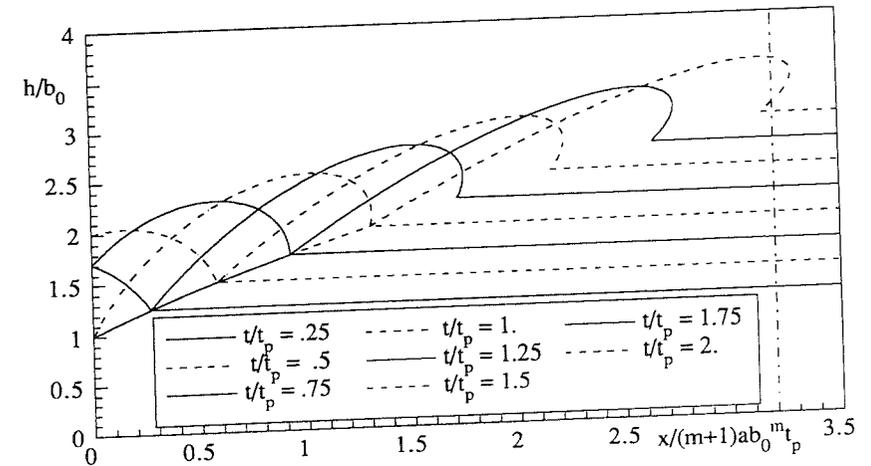


Fig 2 : Solution analytique des lignes d'eau instantanées en coordonnées adimensionnelles

Tout en confortant l'hypothèse cinématique, ces conclusions théoriques fondamentales impliquent d'introduire "des ressauts au sens de la théorie cinématique", conséquence essentielle dans la mesure où il faut disposer d'une "solution faible ou généralisée", solution composite qui vérifie l'équation différentielle dans ses intervalles continus et satisfait à la condition appropriée de "saut" aux discontinuités. Sa formulation émerge incontestablement d'une réflexion parallèle sur les équations et la physique du problème afin de lever l'ambiguïté dans la multiplicité des solutions généralisées possibles.

## 5. MODÉLISATION DES DISCONTINUITÉS EN RUISSELLEMENT INSTATIONNAIRE

La facilité de discrétiser les géométries quasi-tridimensionnelles les plus quelconques et de répercuter aisément à la fois l'irrégularité des propriétés morphologiques des terrains ainsi que des précipitations, incite à travailler par éléments finis spatiaux. Ils se combinent avec une discrétisation temporelle par différences finies pour résoudre la solution faible.

Tandis qu'un excellent comportement émerge de vérifications numériques sur des géométries élémentaires, la méthode éléments finis classique trahit d'importantes déficiences lorsqu'elle est confrontée à des topographies impliquant la présence de ressauts, avec perturbation des solutions par des ondes parasites. Ces imprécisions sont d'autant plus flagrantes que les modélisations en l'absence de choc font toujours preuve de stabilité et d'une grande précision. Cette vérification démontre la nécessité de développer une méthode spécifique adaptée au traitement de discontinuités.

Une première solution consiste à localiser ces discontinuités et à les traiter localement, approche lourde et difficile à gérer, surtout en quasi-tridimensionnel.

La voie finalement investiguée, plus aisément généralisable, procède par capture numérique des chocs. Ils ne sont plus ni localisés ni pris en compte de façon spécifique mais se trouvent adéquatement "traités" par le schéma spatial et temporel très particulier de la discrétisation utilisée.

Une pondération originale, décentrée spatialement, a été mise au point et testée d'abord en unidimensionnel puis généralisée en quasi-tridimensionnel. La combinaison des fonctions classiques de pondération et de leurs dérivées spatiales est construite de façon telle que le décentrement spatial n'a lieu que dans la seule direction de l'écoulement.

Une telle situation dépouillée de formation d'un ressaut en conditions réelles peut être très simplement initiée par une pluie uniforme qui arrose la succession des deux pentes reprises à la figure 3.

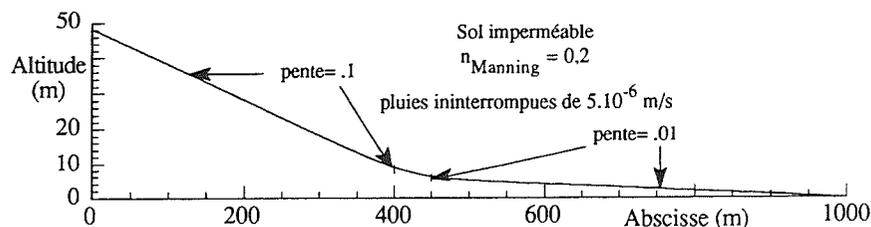


Fig 3 : Profil étudié

L'action sélective de la méthode conservative par éléments finis, apte à gérer toute singularité d'écoulement en topographie quelconque tridimensionnelle, est démontrée par la figure 2 pour cette application élémentaire.

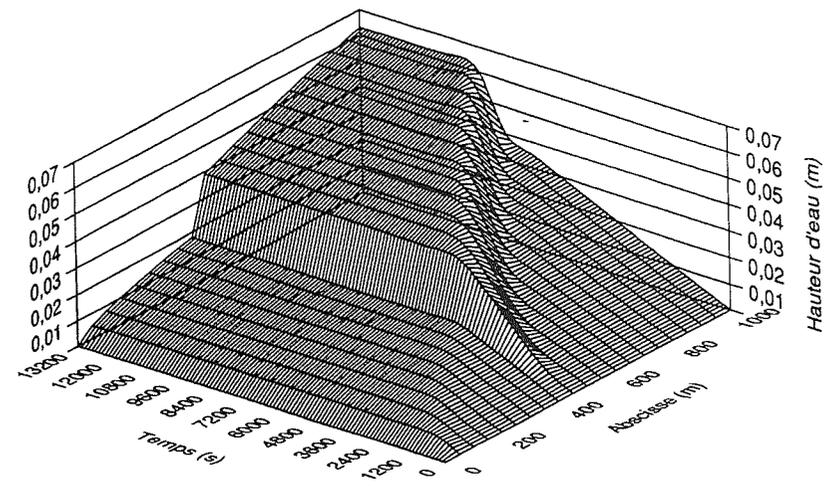


Fig 4 : Évolution temporelle de la hauteur d'eau sur l'ensemble de la surface topographique, avec formation d'un ressaut

Cette visualisation tridimensionnelle reprend toutes les lignes d'eau sur l'ensemble de la géométrie en illustrant notamment la direction caractéristique de propagation des ondes d'amont vers l'aval uniquement. Elle confirme que la formation et la stabilisation d'un ressaut à la transition de pente sont parfaitement reproduites et que la transition est assurée sur une seule maille. Ces résultats s'avèrent conformes à la solution analytique, sans lissage exagéré ni onde parasite rémanente. Quant à l'évolution temporelle de la ligne d'eau obtenue à l'exutoire, sa forme témoigne de l'importance de l'irrégulière répartition en long des pentes.

## 6. RUISSELLEMENT SUR TOPOGRAPHIES NATURELLES

Compte tenu du caractère non-linéaire, le modèle doit composer avec des signaux de pluies brutes et intégrer explicitement les phénomènes d'infiltration, par l'intermédiaire d'un modèle théorique évolutif qui tient compte de l'anisotropie des sols. Cette alternance potentielle de couvertures naturelles permet d'envisager que certaines zones soient le siège de ruissellement tandis qu'au même moment, une couverture beaucoup plus perméable absorbe tous les apports. Cette difficulté supplémentaire est gérée au sein du logiciel par l'utilisation d'éléments de discrétisation potentiellement couvrants-découvrants.

Pour une efficacité maximale, le code hydrologique est complété d'outils annexes, dont une procédure topographique qui détermine automatiquement les zones susceptibles d'influencer l'écoulement ainsi que les lignes de crête du bassin. Enfin, grâce au mailleur automatique développé spécifiquement pour le logiciel et grâce à toutes les procédures complémentaires de rendu graphique tridimensionnel de terrain et d'écoulement, toutes les phases préalables à la modélisation sont complètement automatisées et contrôlées visuellement, au départ de données topographiques minimales constituées d'un nuage tridimensionnel de points qui englobe le bassin versant à étudier, a priori inconnu [11].

Ainsi complété, le code hydrologique a été intégralement appliqué avec succès à un bassin belge de taille réduite discrétisé par approximativement 1400 éléments. Grâce à la signification physique des paramètres, un calage global a pu être rapidement obtenu pour le calcul des hydrogrammes latéraux qui se déversent dans le réseau drainant du bassin. Il faut souligner que leur propagation par les rus et cours d'eau jusqu'à l'exutoire relève d'un logiciel spécifique d'écoulement instationnaire en réseaux filaires décrit dans une contribution distincte.

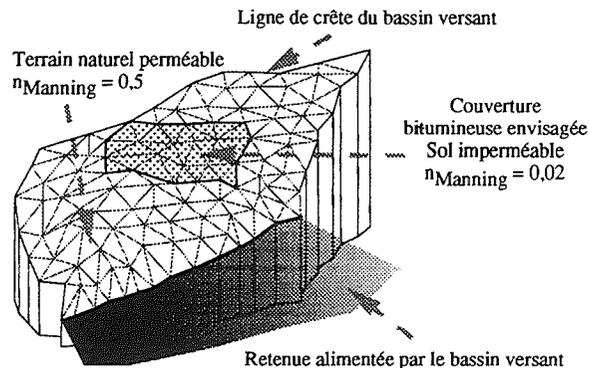


Fig 5 : Représentation tridimensionnelle de la topographie considérée

Une ultime application volontairement dépouillée rappelle que la mise en évidence et la quantification des répercussions d'une action sur le bassin constitue un des points forts de l'approche physique.

La topographie de la figure 5 alimente une retenue en couvrant une superficie totale d'approximativement 34 hectares, pour une dénivellation totale de 110 m. Déterminons, pour une pluie isolée de  $15 \cdot 10^{-6}$  m/s durant 1200 s, l'impact sur l'ensemble des débits entrant dans cette retenue d'un recouvrement de la section hachurée par une couverture bitumineuse.

La première simulation, représentative de l'écoulement avant modification, travaille avec des paramètres de rugosité et d'humidité de terrain caractéristiques d'une couverture naturelle. La simulation est ensuite reproduite en imposant d'une part l'imperméabilisation de la surface concernée ainsi que la diminution substantielle de son coefficient de frottement pour obtenir, à la figure 6, la comparaison des hydrogrammes déversés. Outre l'effet prépondérant de l'imperméabilisation, se marque l'influence de la localisation, à l'amont du bassin, de la zone impliquée dans les transformations, qui provoque un déplacement temporel du pic de débit.

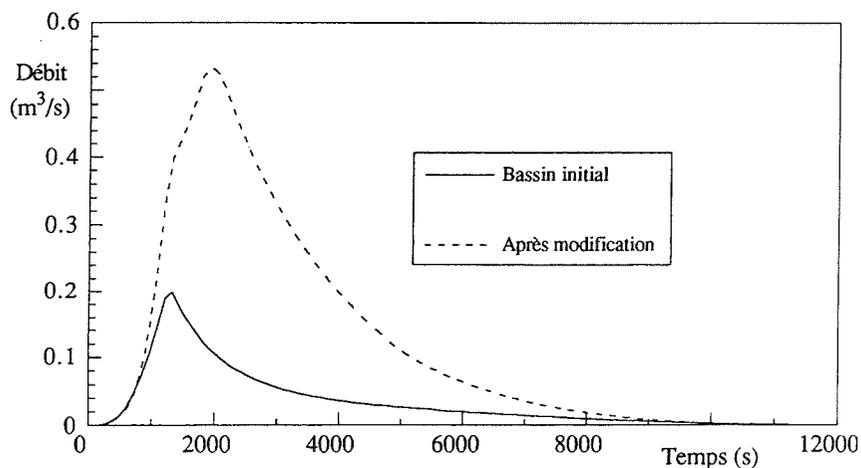


Fig 6 : Évolution temporelle de la somme des débits normaux aux segments bordant la retenue, déversés avant et après modification

## 7. CONCLUSION

L'étude de toutes les spécificités de l'écoulement hydrologique démontre donc que l'écoulement hydrologique peut être valablement reproduit avec un modèle cinématique pour une étude à grande échelle du ruissellement sur l'ensemble d'un bassin. Néanmoins, cette approche physique n'est fiable en tridimensionnel qu'en tenant compte, indépendamment de tout préjugé d'échelle, des singularités dans l'écoulement qui, si elles ne sont pas détectées et analysées, conduisent à des approximations telles que les résultats ne peuvent plus être fidèlement interprétés.

Il est nécessaire d'une part d'introduire des ressauts, de comprendre leur signification avant de proposer une solution généralisée du problème dans la perspective d'étendre son application aux géométries quelconques, pour enfin développer une méthode numérique apte à les gérer efficacement et fidèlement. Dans l'optique indispensable de comprendre et de dominer toutes les caractéristiques d'un modèle numérique, la modélisation elle-même du ressaut, perdu dans l'écoulement au sein du bassin, importe finalement intrinsèquement moins que le rôle que sa mauvaise résolution serait susceptible de jouer en faussant la solution à l'exutoire.

Grâce à ces réflexions et à une démarche graduelle dans les domaines à la fois théorique et numérique, les objectifs en matière d'écoulement en fine lame sont complètement rencontrés puisque le logiciel élaboré travaille directement sur une géométrie quelconque avec des propriétés hétérogènes de sol. Il génère des hydrogrammes latéraux qui se déversent, le cas échéant, dans le réseau drainant du bassin.

Bien plus que de conduire à une approche hydrologique très prometteuse dans le domaine de l'aide à la gestion au sens large, cette étape hydrologique constitue un champ d'investigation idéal, par son contexte théorique simplifié, pour mieux appréhender la modélisation de ce processus si fréquent en hydraulique de surface qu'est le ressaut. Sans a priori d'échelle peut se construire un raisonnement graduel ainsi qu'une compréhension unifiée des phénomènes de propagation d'ondes avec discontinuités qui montrent des liens beaucoup plus étroits que ne le laisse supposer leur variété. Au gré du fil naturel de l'eau, l'examen de ces différents processus établit spontanément une chronologie dans la gradation des difficultés rencontrées dans ces écoulements intimement liés que sont l'écoulement hydrologique de surface, le ressaut en rivière naturelle ou la propagation d'ondes consécutives aux ruptures de barrages.

## Références

- [1] NAEF F., *Can we model the rainfall-runoff process today ?*, Hydrological Sciences Bulletin, Vol 26, n° 3, 1981, pp 281-289.
- [2] WOOLHISER D.A. and LIGGETT J.A., *Unsteady one-dimensional flow over a plane - the rising hydrograph*, Water Resources Research, Vol 3, n° 3, 1967, pp 753-771.
- [3] AL-MASHIDANI G. and TAYLOR C., *Finite element solutions of the shallow water equations - surface runoff*, Finite Elements Methods in Flow Problems, pp 385-395.
- [4] MORRIS E.M., *The propagation of waves in shallow water flow with lateral inflow*, Hydrological Sciences Bulletin, Vol 25, n° 1, 1980, pp 25-32.
- [5] DALUZ VIEIRA J.H., *Conditions governing the use of approximations for the Saint-Venant equations for shallow surface water flow*, Journal of Hydrology, Vol 60, 1983, pp 43-58.
- [6] MORGALI J.R., *Laminar and turbulent overland flow hydrographs*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No HY2, February 1970, pp 441-460.