

# MODÈLE HYDROLOGIQUE BASÉ SUR LA PHYSIQUE DU RUISSELLEMENT APPLICABLE À DES TERRAINS NATURELS DIGITALISÉS

M. PIROTTON  
Université de 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.*

*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.*

## 1. INTRODUCTION

Si les responsabilités croissantes des concepteurs prennent résolument le pas sur 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 modernes.

La prévision fiable des crues n'est pas l'apanage des politiques de prévention et n'intervient pas seulement dans l'étape fondamentale de 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 soucieuse des populations. 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.

Dans le foisonnement actuel de méthodes et de modèles présentés dans la littérature, une grande diversité et de singulières divergences se marquent dans les philosophies suivies pour aborder le domaine de l'étude de la formation des débits de crue, consécutifs aux précipitations. Il faut admettre que le contexte des processus à prendre en compte s'annonce particulièrement complexe et varié, au point que la remise en cause fondamentale de Naef [1] en 1981 sur les possibilités d'une modélisation fiable du processus pluie-écoulement est loin d'être obsolète.

La contribution relative de chaque intervenant s'avère d'autant plus difficile à déterminer dans la construction finale du signal de sortie que toute expérimentation à l'échelle du bassin versant est impossible. Dans ce contexte, la modélisation devient l'outil majeur d'analyse et de déduction, devant s'appliquer à chaque situation particulière que représente tout bassin par sa taille, ses particularités morphologiques, hydrologiques et géologiques.

L'indispensable globalisation des processus impliqués ainsi que l'introduction d'hypothèses

simplificatrices expliquent autant la multiplication des modèles que les déficiences que la plupart d'entre eux connaissent lorsqu'ils sont appliqués dans des contextes sensiblement différents de ceux pour lesquels ils ont été conçus.

Les préoccupations très actuelles du contrôle et de la gestion des ressources infléchissent la philosophie générale des modèles à développer car en ouvrant de nouvelles perspectives pour la modélisation hydrologique, elles montrent également les limites de certains types de modèles.

La compréhension des processus de transformation des signaux de pluie sur le bassin permet de construire préventivement la réponse à l'exutoire et de susciter anticipativement des réactions adéquates de gestion. Mais l'exploitation de modèles hydrologiques est souvent dévolue aujourd'hui à un meilleur contrôle de 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.

C'est pour répondre plus aisément à ces attentes qu'apparaissent les modèles conceptuels distribués qui développent une analyse physique du phénomène en examinant l'écoulement de la fine lame d'eau sur le bassin.

La signification physique conférée aux paramètres de ce type d'approche simplifie les phases d'évaluation des projets qui affectent les propriétés du bassin. En modifiant la valeur des paramètres concernés, la simulation d'événements pluvieux répercute immédiatement toute intervention de l'homme sur la fonction de transformation. Par ailleurs, 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 hydrologiques classiques, 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.

## 2. MODÈLE MATHÉMATIQUE DE RUISSELLEMENT

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. Si sa résolution des équations dites "en faible profondeur" est largement documentée dans la littérature, l'efficacité numérique suggère 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) :

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

Quant au terme de pente de frottement dans l'équation dynamique, il prend très classiquement une forme 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 :

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

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

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

$$f_o^2 = \frac{u_o^2}{gh_o \cos \theta} \quad k_o = \frac{l_o g \sin \theta}{u_o^2} = \frac{l_o \operatorname{tg} \theta}{h_o f_o^2} \quad (4)$$

Leurs valeurs relatives donnent lieu à trois approximations possibles de l'équation dynamique selon que  $k_o$  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  $k_o$  garde une valeur significative (approximation de l'onde de diffusion). Woolhizer et al fournissent quelques éléments déterminants en fixant à 10 la limite de  $k_o$  au-delà de laquelle l'onde cinématique approxime valablement les équations complètes. Les expérimentations numériques de Morris [3] et Daluz Vieira [4], partiellement illustrées à la figure 1, complètent cette information sur les zones de validité des modèles en balayant systématiquement tout le champ des paramètres. En se basant sur l'expérience des hydrologistes, il s'avère finalement que le ruissellement naturel situe généralement les couples de valeurs  $(f_o, k_o)$  dans des zones où l'approximation cinématique est licite.

L'option cinématique est d'autant plus séduisante qu'elle limite l'effort numérique en n'impliquant plus qu'une seule variable. Cette remarque subsiste en quasi-tridimensionnel puisque chaque composante de vitesse reste explicitement liée à l'épaisseur de la lame fluide. L'équation de continuité exprimée en fonction de cette seule variable suffit ainsi à caractériser la réponse non-linéaire d'un système topographique quelconque.

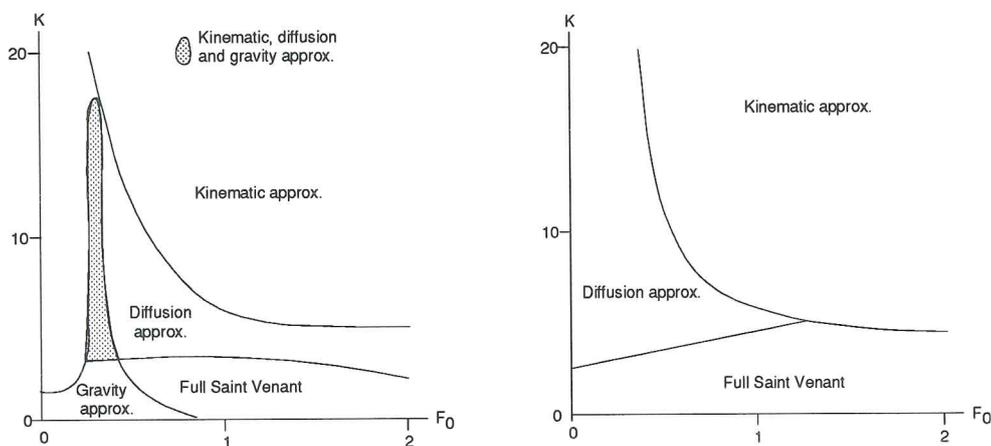


Figure 1 - Zones de validité pour deux conditions limites différentes, selon Daluz Vieira [4]

### 3. VÉRIFICATIONS EXPÉRIMENTALES

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, 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 [5] 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 (figure 2).

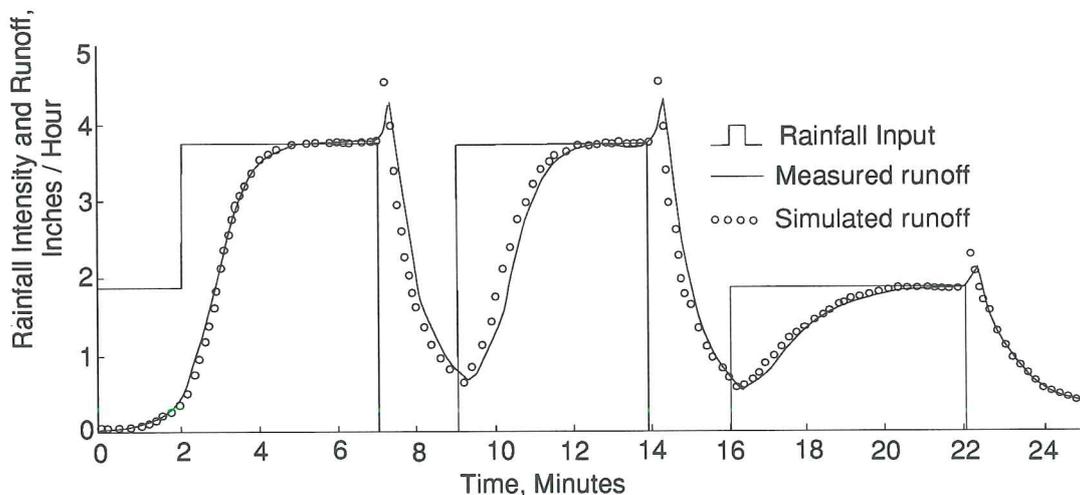


Figure 2 - Résultat d'écoulements hydrologiques à faible nombre de Reynolds  
Plan de 22 m de long pour une pente de 0,005 (selon Izzard [6])

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. VALIDITÉ DE L'APPROCHE CINÉMATIQUE SUR TERRAINS NATURELS

Les raisonnements unidimensionnels 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. Compte tenu du développement actuel des modèles numériques de terrain, nous chercherons à échapper à ce carcan très pénalisant.

En effet, 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 moyenniser 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.

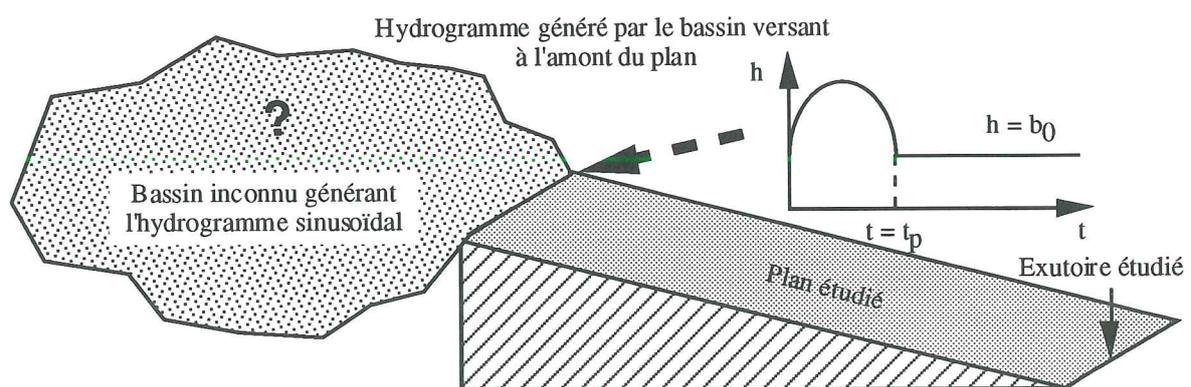


Figure 3 - Disposition générale du bassin versant étudié

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 3).

La solution analytique adimensionnelle est illustrée à la figure 4 pour un écoulement turbulent. 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.

Il est plus aisé de résumer 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.

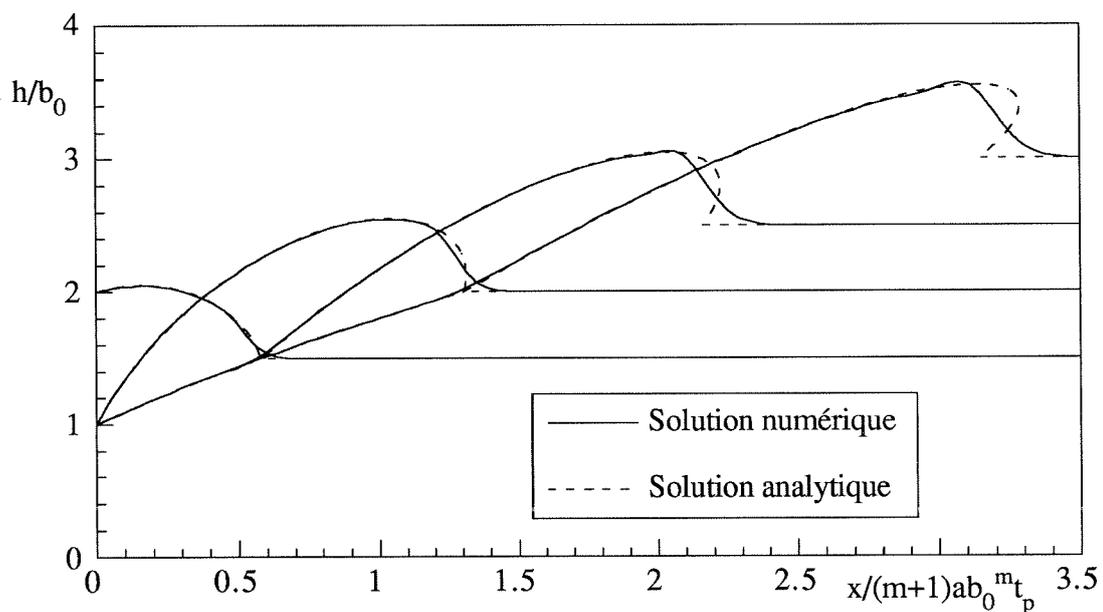


Figure 4 - Comparaison avec la solution analytique des lignes d'eau instantanées, en coordonnées adimensionnelles, respectivement pour  $t/t_p = 0,5, 1, 1,5, 2$

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 RESSAITS EN RUISSELLEMENT TRANSITOIRE

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 une solution faible du problème.

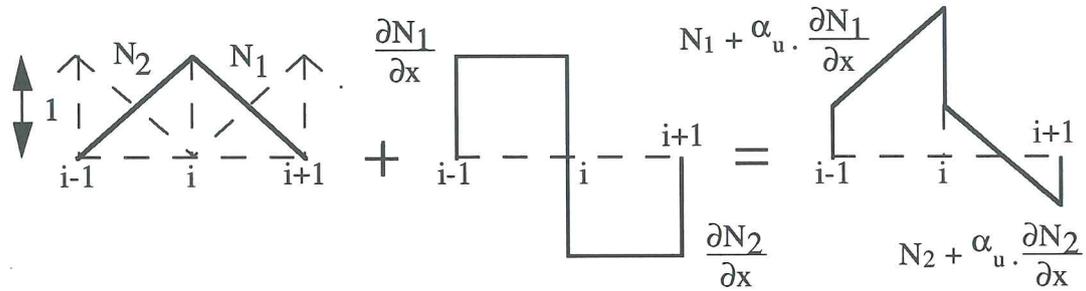


Figure 5 - Fonctions de pondération dissymétriques unidimensionnelles, adéquatement décentrées en fonction de l'écoulement ( $\alpha_u$ ) et destinées à capturer les chocs

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.

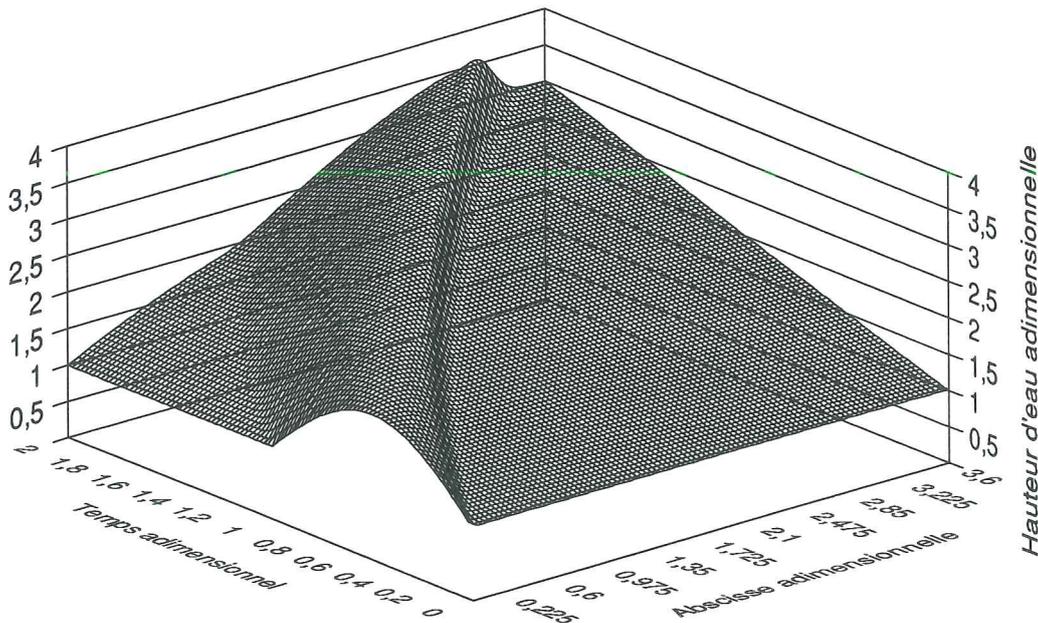


Figure 6 - Evolution temporelle de la hauteur d'eau sur l'ensemble de la surface topographique avec formation d'un front raide

Une pondération originale, décentrée spatialement, a été mise au point et testée d'abord en unidimensionnel (figure 5) puis généralisée en quasi-tridimensionnel. La combinaison des fonctions classiques de pondération et de leurs dérivées spatiales est construite de façon telle qu'un décentrement spatial bien dosé n'a lieu que dans la seule direction de l'écoulement.

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 6 pour l'application théorique élémentaire précédemment décrite. On voit l'onde sinusoïdale s'y propager en se raidissant progressivement jusqu'à la formation d'un front raide. La comparaison de quelques lignes d'eau instantanées à la figure 4 témoigne de la qualité de la solution numérique qui assure une transition nette tout en préservant les volumes par rapport à la solution théorique. La transition est assurée sans lissage exagéré ni onde parasite rémanente.

En conditions réelles, l'occurrence d'une telle formation d'un ressaut est très fréquemment initiée sur toute transition de pentes de valeurs décroissantes vers l'aval, ce qui justifie l'effort déployé pour éviter à l'aval la construction d'hydrogrammes latéraux dépourvu de toute fiabilité.

## 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].

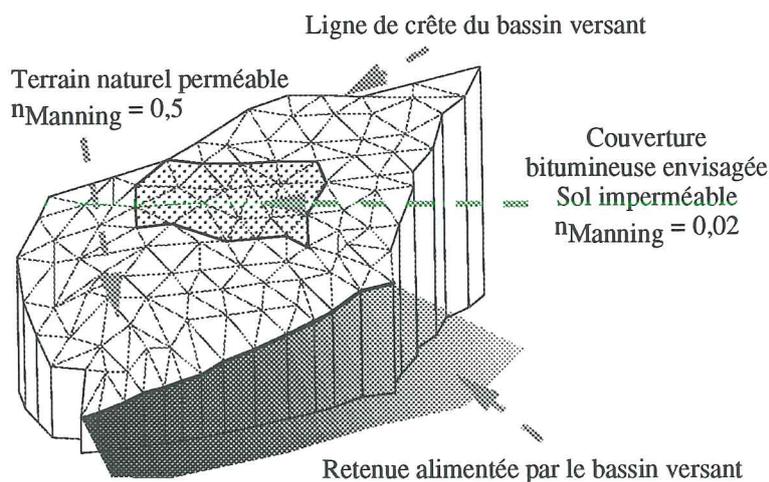


Figure 7 - Représentation tridimensionnelle de la topographie considérée

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.

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 7 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 8, 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.

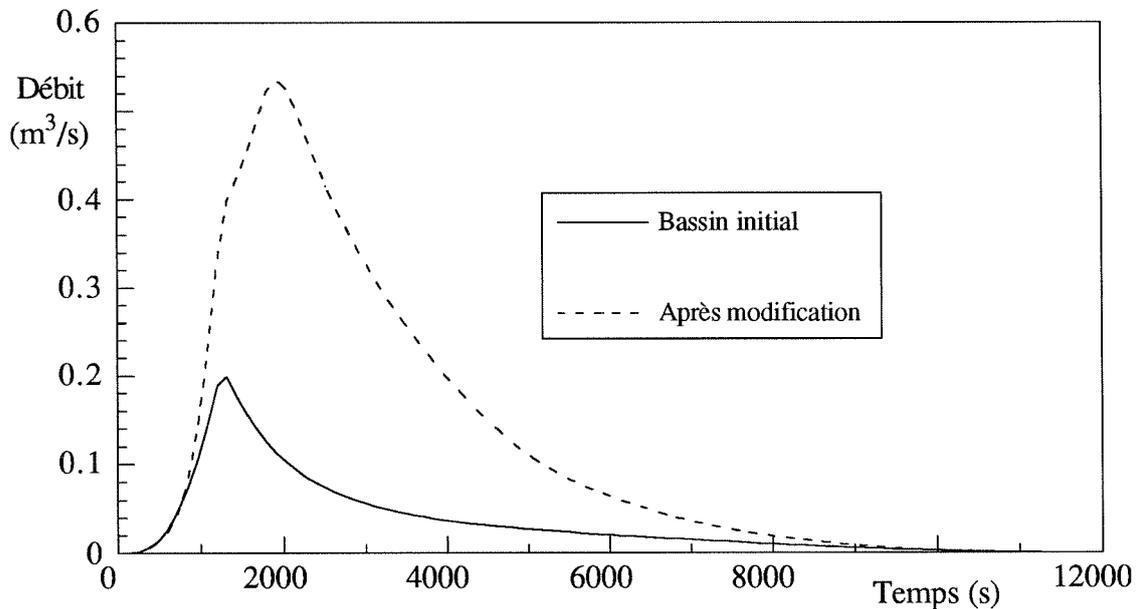


Figure 8 - Evolution temporelle de la somme des débits normaux aux segments bordant la retenue, déversés avant et après modification

## 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.

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

travaille sur toute géométrie avec des propriétés hétérogènes de sol. Il génère des hydrogrammes latéraux qui se déversent, le cas échéant, dans le réseau drainant du bassin.

Au-delà de l'analyse d'une méthode prometteuse dans le domaine de l'hydrologie, l'ensemble des étapes décrites suggèrent deux remarques fondamentales. D'une part, l'impérieuse nécessité de poser des hypothèses simplificatrices réclame de l'hydraulicien une attention et une remise en cause perpétuelle selon le champ d'applications qu'il souhaite embrasser. Ainsi, bien que dépouillée, l'hypothèse cinématique conserve certaines particularités qui rendent non-immédiate son extension en géométrie réelle.

Par ailleurs, il est plus que jamais indispensable de comprendre et de dominer toutes les caractéristiques du code numérique résolvant un modèle théorique perçu dans toutes ses limites. Ainsi, 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.

A la lumière de ces deux constantes, qui expliquent les dangers d'une utilisation aveugle de modèles hydrauliques boîtes noires, et alors que se profilent, grâce au miracle informatique, des perspectives formidables de modélisation, naît simultanément pour l'hydraulicien un vaste champ d'investigation qui fait appel, plus que jamais, à ses connaissances spécifiques.

## 8. BIBLIOGRAPHIE

- [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] 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.
- [4] 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.
- [5] MORGALI J.R., *Laminar and turbulent overland flow hydrographs*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No HY2, February 1970, pp 441-460.
- [6] IZZARD C.F., *Overland flow tests*, Bureau of Public Roads, Tabulated Hydrographs, Vol 1-3, 1942-43.
- [7] YU Y.S. and Mc NOWN J.S., *Runoff from impervious surfaces*, Journal of Hydraulic Research, Vol 2, n° 1, 1964, pp 3-24.
- [8] WHEATER H.S., BELL N. C. and JOHNSTON P. M., *Evaluation of overland flow models using laboratory catchment data - III. Comparison of conceptual models*, Hydrological Sciences Journal, Vol 34, n° 3, June 1989, pp 319-337.
- [9] OVERTON D.E., *Kinematic flow on long impermeable planes*, Water Resources Bulletin, Vol 8, n° 6, 1972, pp 1198-1204.
- [10] LANE L.J. and WOOLHISER D.A., *Simplifications of watershed geometry affecting simulation of surface runoff*, Journal of Hydrology, Vol 35, 1977, pp 173-190.
- [11] 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, 211 figures, 479 pages, Avril 1994.