

A PROPOS DE LA PHYSIQUE DU RUISSELLEMENT SUR BASSIN VERSANT

M. PIROTON

Université de Liège - Laboratoires L.H.C.N.
Institut du Génie Civil
6, Quai Banning - B.4000 Liège - Belgique

1. INTRODUCTION

Il est inéluctable que l'eau ait toujours inspiré à l'homme des capacités créatives adaptées aux technologies de l'époque puisqu'elle façonne le relief et décide de la vie sur terre.

Même si sa connaissance de la science et des techniques de l'eau restait fautive ou incomplète, parsemée de croyances superstitieuses et religieuses, il n'a pas longtemps cantonné le rôle de l'eau dans sa seule fonction vitale mais s'ingénia très tôt à la domestiquer et, par son esprit d'entreprise, parvint à surmonter la plupart des problèmes hydrauliques auxquels nous sommes encore confrontés aujourd'hui.

Pour ne se référer qu'au thème très actuel des crues de cours d'eau qui, de toutes les catastrophes naturelles, sont sans doute les plus effroyables et dévastatrices, on se souviendra des digues de protection contre les crues et les inondations édifiées, en Mésopotamie, dès le 6ème ou 5ème millénaire avant J.C.

L'accroissement des connaissances amène aujourd'hui l'ingénieur à traiter certains mêmes problèmes de façon beaucoup plus complexe. Elle entraîne également les concepteurs vers des responsabilités plus larges, qui prennent résolument le pas sur le caractère inéluctable et les sentiments fatalistes et superstitieux de jadis. Cette évolution ne marque pas pour autant de victoire décisive sur les caprices de la nature qui, régulièrement, nous rappellent que les mêmes défis persistent.

La prévision des crues reste donc un objectif majeur dans toute politique de prévention et une première étape incontournable dans tout projet de dimensionnement économique d'un ouvrage hydraulique. Dans une optique de gestion, une prévision fiable de la distribution des apports dans le système est primordiale pour élaborer une politique adéquate d'anticipation, gérant au mieux l'ensemble des ressources.

L'analyse, la compréhension et la modélisation de la transformation hydrologique d'un signal de pluies en un signal de débits à l'exutoire sur une topographie quelconque s'efforce de répondre à ces attentes fondamentales.

C'est à une description sommaire des facteurs d'influence à prendre en compte et à l'établissement d'un modèle mathématique sélectionné pour reproduire ces processus que nous allons nous consacrer.

2. SPÉCIFICITÉS DU MODÈLE HYDROLOGIQUE RECHERCHÉ

L'importance des enjeux fondamentaux n'est pas seule responsable de l'engouement actuel dans le domaine de l'étude de la formation des débits de crue, consécutifs à des précipitations. Lorsqu'on parcourt la littérature spécialisée sur le sujet, force est de reconnaître qu'il existe un foisonnement dans les méthodes et les modèles présentés, ainsi qu'une grande diversité et de singulières divergences dans les philosophies suivies pour aborder le problème. Cette situation assez paradoxale 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 reste toujours d'actualité.

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.

La nécessité de poser des hypothèses simplificatrices et de globaliser certains processus est à l'origine du nombre de modèles proposés dans la littérature. Elle explique également les déficiences de la plupart des codes lorsqu'ils ne sont pas appliqués dans un contexte proche de celui pour lequel ils ont été conçus. La clairvoyance s'impose donc, tant dans les simplifications choisies que dans leurs éventuelles implications au moment d'interpréter des résultats.

Pour arrêter le choix sur une approche, nous insisterons sur la préoccupation du contrôle et de la prévision, étroitement liée à la notion de gestion, aspect très actuel qui ouvre de nouvelles perspectives pour la modélisation hydrologique, en montrant également les limites de certains types de modèles.

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.

Ces dernières potentialités sont déterminantes car les approches classiques de modélisation hydrologique, transformant par une fonction mathématique paramétrée un signal d'entrée en un signal de sortie (modèles empiriques globaux⁽¹⁾), montrent à cet égard certaines limitations marquantes : dans les longues campagnes de mesures que ces modèles réclament pour leur calibration, les méthodes d'ajustement rendent souvent difficile voire impossible toute interprétation physique des paramètres utilisés. Consécutivement, n'importe quelle prévision de modification de terrain ne peut être assurée de façon fiable par une répercussion évidente sur la valeur des paramètres. Enfin, ils tiennent rarement compte de données topographiques, d'une caractérisation des types de sol et des couvertures végétales rencontrées, ou encore d'une inégale répartition spatiale des précipitations.

C'est pour répondre à ces déficiences qu'apparaissent très progressivement des modèles conceptuels distribués⁽²⁾ qui développent une analyse physique du phénomène en examinant l'écoulement de la fine lame d'eau sur le bassin.

Ce type d'approche, en conférant une signification physique aux paramètres, s'avère capable, non seulement de prévoir la réponse du système à une pluie donnée, mais surtout d'évaluer l'impact de l'intervention de l'homme sur le bassin versant en modifiant les valeurs des paramètres concernés. Il devient en outre possible, face à un manque de signaux d'entrée-sortie disponibles pour caler les paramètres sur un bassin particulier, de faire varier leurs valeurs dans une gamme physiquement raisonnable afin d'examiner l'incertitude associée au signal de sortie face aux incertitudes qui sont susceptibles d'affecter les données.

Examinons brièvement la validité d'une telle approche en soulignant simultanément les principaux facteurs d'influence.

3. MODÈLE MATHÉMATIQUE D'ÉCOULEMENT HYDROLOGIQUE

Nous raisonnons sur les équations de base de l'hydraulique sans préjuger, lors de leur établissement, du type d'écoulement au travers de la veine fluide.

L'intégration des équations tridimensionnelles de Navier-Stokes sur l'épaisseur de la lame d'eau s'effectue en tenant compte de l'épaisseur très faible de cet écoulement sur le

bassin comparée à ses autres dimensions spatiales. On retrouve alors une répartition hydrostatique de la pression selon un axe local perpendiculaire à la surface d'écoulement, avec un système complet d'équations bien connu sous le nom "d'équations en faible profondeur". Il est par ailleurs applicable à des situations aussi différentes que que la modélisation des marées dans la Mer du Nord ou l'embouchure de l'Escaut.

Si la résolution d'un tel système à trois inconnues (la profondeur d'eau et deux composantes de la vitesse) est largement documentée dans la littérature, notamment pour sa complexité, faut-il encore savoir si elle est raisonnablement envisageable dans le contexte hydrologique fixé.

Soucieux d'abord d'apporter certains éléments de réponse sur la validité de simplifications mathématiques plus spécifiques aux phénomènes étudiés, nous résumerons la démarche de quelques hydrologistes qui ont entrepris l'étude théorique puis sur modèles réduits de géométries élémentaires, particulièrement les plans inclinés, pour l'écoulement unidimensionnel qu'ils suscitent.

Dans ce cadre restreint d'étude d'écoulements sur pentes unidimensionnelles, le système d'équations s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(\bar{u}h)}{\partial x} = (r - i) \cos \theta \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} \cos \theta = g \sin \theta + \frac{t_x}{h} - (r - i) \frac{\bar{u}}{h} \cos \theta \quad (2)$$

avec :

- t : le temps
- x : la coordonnée cartésienne selon l'axe d'écoulement
- g : l'accélération de la pesanteur
- u : la vitesse moyenne sur l'épaisseur de lame
- h : l'épaisseur de la lame fluide
- r : les précipitations
- i : la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol
- θ : l'angle local entre la surface d'écoulement et un plan horizontal

Pour examiner les essais et les interpréter mathématiquement, nous procédons d'abord à une mise sous forme adimensionnelle du système. Cette étape contribue à la mise en évidence des paramètres utiles à la classification des diverses approximations possibles.

Désignons par q_0 le débit uniforme à l'exutoire, c'est à dire en $x = l_0$ où l_0 représente la longueur caractéristique d'écoulement. Soit h_0 , la profondeur de la lame à l'exutoire et u_0 la vitesse uniforme au même endroit. Nous obtenons par définition et continuité :

$$q_0 = h_0 u_0 = (r - i) l_0 \cos \theta \quad (3)$$

Les grandeurs u_0 , h_0 sont liées par la définition de la vitesse

⁽¹⁾ La notion de modèle conceptuel ou empirique est suggérée par la considération ou non des processus physiques agissant sur les signaux d'entrée pour les convertir en signaux de sortie.

⁽²⁾ La distinction entre modèles distribués et globaux tient à la préoccupation de prendre en compte ou d'ignorer la distribution spatiale des variables d'entrée, ainsi que des paramètres caractérisant les processus physiques intervenant sur le signal initial.

uniforme qui prend une forme caractéristique du type d'écoulement. Nous nous contenterons momentanément de l'expression générale suivante :

$$\sin \theta = \alpha \frac{u_o^\beta}{h_o^\gamma} \quad (4)$$

avec α, γ positifs.

Nous exprimons fort logiquement un temps caractéristique t_o par :

$$t_o = \frac{l_o}{u_o} \quad (5)$$

Enfin, de ces relations sont déduites les formes adimensionnelles des coordonnées et des variables :

$$x^* = \frac{x}{l_o} \quad t^* = \frac{t}{t_o} \quad h^* = \frac{h}{h_o} \quad u^* = \frac{\bar{u}}{u_o} \quad (6)$$

qui déterminent la forme adimensionnelle suivante pour la continuité (1) :

$$\frac{\partial h^*}{\partial t^*} + \frac{\partial(u^* h^*)}{\partial x^*} = 1 \quad (7)$$

Dans l'équation dynamique (2), (t_x/gh) est un nombre pur qui porte habituellement le nom de pente de frottement. On lui attribue généralement une forme mathématique identique à celle du mouvement uniforme correspondant. Compte tenu de cette remarque, l'introduction des formes adimensionnelles dans (2) donne, tous calculs faits :

$$\frac{\partial u^*}{\partial t^*} + u^* \frac{\partial u^*}{\partial x^*} + \frac{g h_o \cos \theta}{u_o^2} \frac{\partial h^*}{\partial x^*} = \frac{l_o g \sin \theta}{u_o^2} \left(1 - \frac{u^{*\beta}}{h^{*\gamma}} \right) - \frac{u^*}{h^*} \quad (8)$$

Elle 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 Liggett [2] en 1967 :

$$f_o^2 = \frac{u_o^2}{g h_o \cos \theta} \quad (9)$$

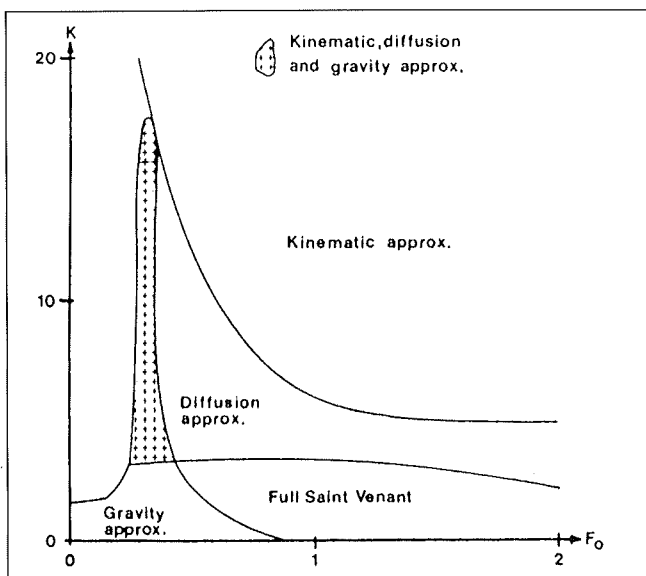
$$k_o = \frac{l_o g \sin \theta}{u_o^2} = \frac{l_o \operatorname{tg} \theta}{h_o f_o^2} \quad (10)$$

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).

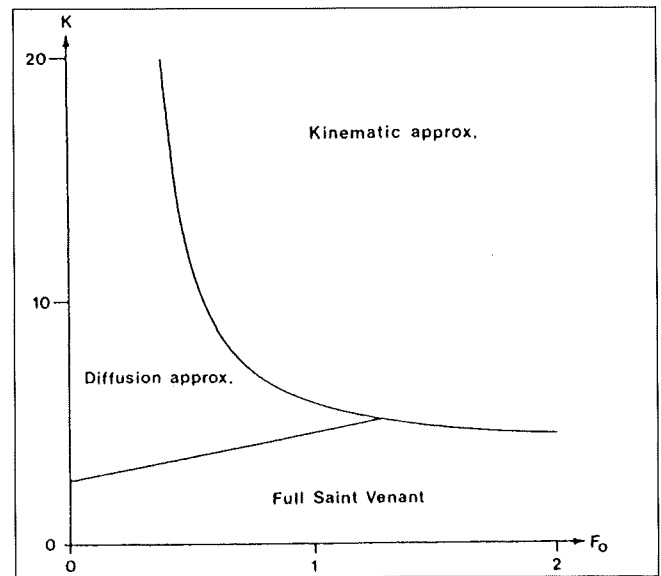
Pour préciser le sens des adjectifs "important, négligeable ou significatif", nous rappellerons les enseignements de Woolhizer et al qui fixent à 10 la limite de k_o au-delà de laquelle l'onde cinématique approxime valablement les équations complètes.

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

Pour compléter l'information sur le comportement de l'approximation de onde dissipative notamment, nous illustrons les résultats de Morris [4] et Daluz Vieira [5] qui ont balayé tout le champ des paramètres pour les trois approximations possibles soumises à deux types de conditions limites aval. Les zones de validité de chaque approximation



- Imposition d'une vitesse critique à l'aval -



- Imposition d'un gradient de hauteur nul à l'aval -

Fig. 1— Division du plan f_o, k_o en zones où les approximations peuvent se substituer valablement aux équations complètes (selon Daluz Vieira)

dans le plan (f_0, k_0) sont reproduites à la figure 1. D'une façon générale, Daluz Vieira estime, tous effets confondus, nécessaire une valeur de k_0 égale à 50 au moins pour obtenir une correspondance satisfaisante entre équations complètes et approximation de l'onde cinématique.

Concluons sur l'expérience des hydrologistes qui affirment 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.

Ainsi, l'option de l'onde cinématique s'affirmerait comme un choix judicieux en écoulement hydrologique de surface, d'autant qu'il réduit sensiblement l'effort numérique en n'impliquant plus a priori qu'une seule variable puisque l'équation dynamique (2) se réduit, dans sa forme unidimensionnelle, à :

$$\bar{u} = \left(\frac{\sin \theta}{\alpha} \right)^{\frac{1}{S}} h^{\frac{\gamma}{S}} = ah^m \quad (11)$$

Afin de vérifier le bien fondé de ces assertions en confrontant la théorie à la pratique, nous rappellerons d'abord la solution théorique pour un plan de longueur l_0 qui n'est, en $t = 0$, le siège d'aucun ruissellement. Après un temps suffisant pour obtenir l'équilibre, la pluie, uniforme jusqu'alors à l'instar de l'infiltration, cesse et la décrue se poursuit jusqu'au tarissement complet.

Cette solution s'établit en décrivant le mouvement le long d'une seule famille de caractéristiques (pour deux dans la théorie complète) avec, pour seule condition limite nécessaire à un problème bien posé, l'imposition d'une hauteur nulle à l'amont de chaque trajectoire. L'hydrogramme adimensionnel de la figure 2 résume l'intégralité de la formulation obtenue.

Dans l'hypothèse où la théorie cinématique approxime valablement l'écoulement, la détermination par les essais de la seule inconnue m de l'hydrogramme adimensionnel ne va dépendre que du type d'écoulement. Voyons ce qu'il en est exactement.

4. VÉRIFICATION DE LA THÉORIE CINÉMATIQUE SUR DES ÉCOULEMENTS HYDROLOGIQUES EXPÉRIMENTAUX

Pour un bassin, la recherche des relations qui lient l'évolution des débits à la séquence des précipitations se concrétise traditionnellement par la collecte sur site de mesures coûteuses par la maintenance des appareils et la longueur des campagnes qu'elle occasionne. La frustration d'un manque total de contrôle face aux avatars de la nature a donné l'idée aux pionniers en la matière de générer artificiellement, dès les années 30-40, l'éventail des pluies désirées. La vérification s'opère alors sur des modèles physiques à échelle réduite afin de mieux cerner les problèmes d'anisotropie du sol, de non reproductibilité des conditions d'essais grandeur nature et de séparation des intervenants.

Si l'alignement général des points expérimentaux sur une

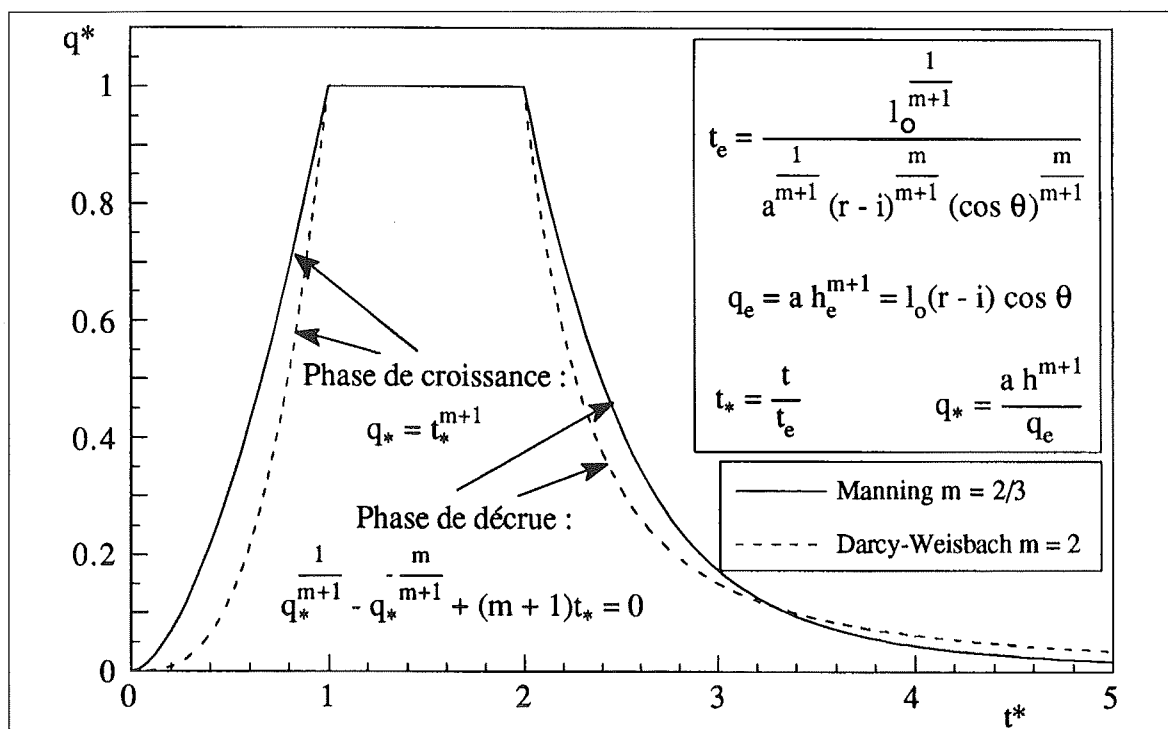


Fig. 2 - Hydrogramme adimensionnel à l'exutoire d'un plan incliné, par la théorie cinématique

courbe type rencontre pleinement l'espoir d'une validation des hypothèses théoriques, il subsiste néanmoins le problème crucial qu'illustre Morgali [6] dans l'ajustement des courbes de la figure 3.

Les deux types de surface testés relèvent à l'évidence de comportements distincts où la lame régulièrement formée sur le bitume contraste avec la progression chaotique des filets entre les brins de gazon.

Il est possible de s'appuyer sur les théories classiques de l'hydraulique pour rendre compte de ces états. Nous ne citerons ici que l'hypothèse laminaire de la formule de Darcy-Weisbach ($m = 2$), la représentation d'une turbulence pleinement constituée par la formule de Chézy ($m = 0,5$) avec, entre ces extrêmes, une série d'expressions dont certaines sont supposées assurer une transition appropriée entre les deux états (Manning notamment avec $m = 2/3$).

L'ajustement d'une loi aux résultats expérimentaux de Morgali souligne un comportement laminaire de l'asphalte et turbulent (Manning) pour la surface gazonnée.

Dès lors qu'il faut composer avec plusieurs lois, lier l'état de surface au type d'écoulement simplifierait l'approche théorique. Un tel raisonnement s'oppose cependant à la logique d'une relation, classique en mouvement permanent, entre l'état d'écoulement et le nombre de Reynolds.

Si, par contre, cette dernière analyse classique se concrétise, elle incite à faire coexister plusieurs lois dans une même simulation, puisque l'étude d'un hydrogramme complet balaye spatialement et temporellement une gamme étendue de nombres de Reynolds.

En d'autres termes, un comportement laminaire perpétuel persisterait sur 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.

Les travaux de Morgali établissent clairement qu'une transition d'état existe effectivement pour chaque type de surface, comme l'atteste la figure 4. Pour réagir à cette dualité, Bell

et al [7] proposent simplement de calculer analytiquement la situation d'une telle transition en disposant, pour une même couverture, des coefficients laminaires et turbulents.

Cette attitude est discutable dans la mesure où de nombreuses expériences établissent que la turbulence apparaît ou s'évanouit graduellement sur une frange de nombres de Reynolds qui dépend des circonstances du mouvement. Mais surtout, un effet spécifique aux écoulements hydrologiques vient jouer un rôle perturbateur unani-

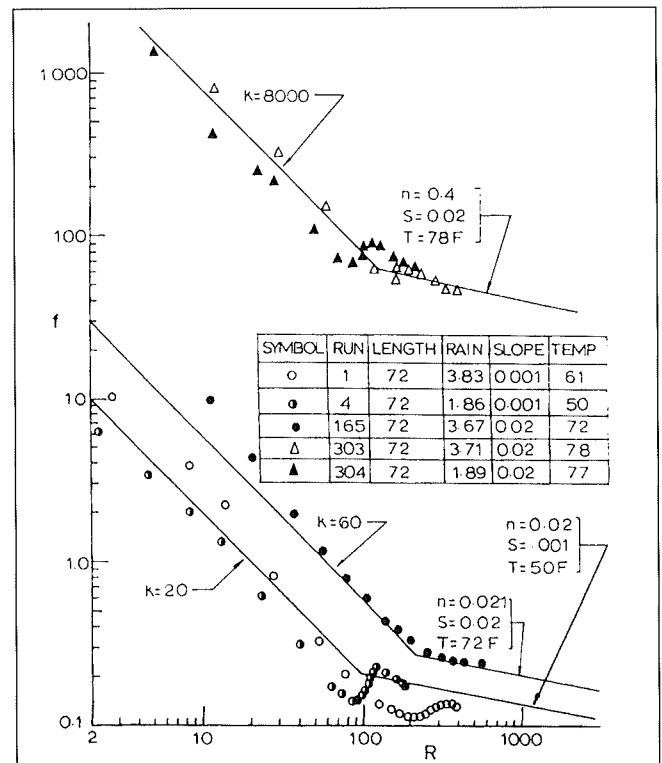


Fig. 4 - Evolution du facteur de frottement f ($f = u^2 / 8gh \sin\theta$) en fonction du nombre de Reynolds pour 3 types de surface, selon Morgali

n° 1 = asphalte · n° 165 = ardoises broyées · n° 303-304 = gazon

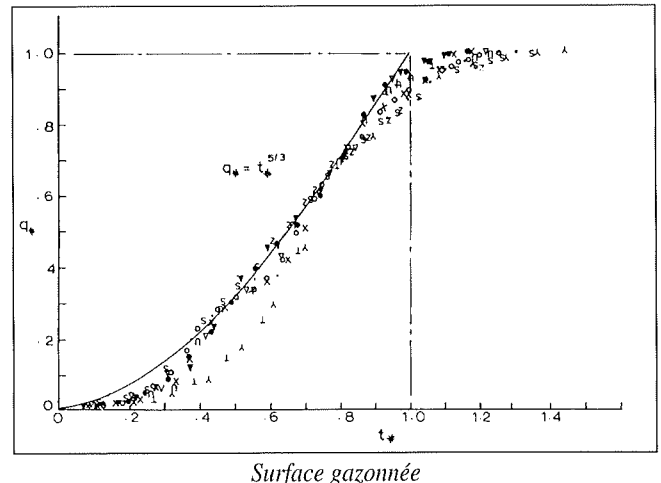
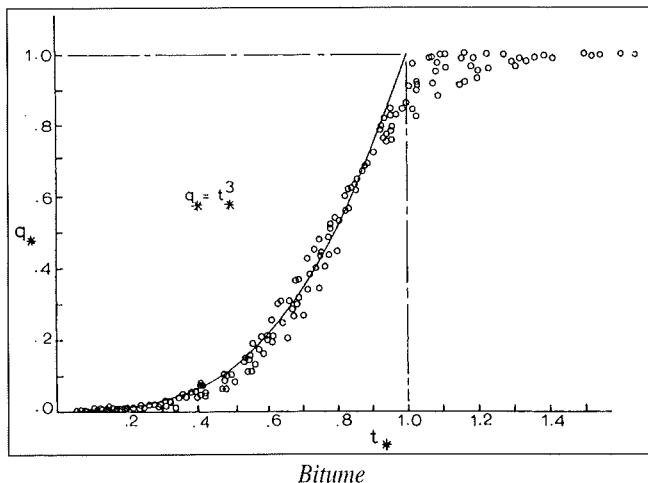


Fig. 3 - Hydrogrammes adimensionnels expérimentaux laminaire ou turbulent pour des écoulements sur du bitume ou sur pente gazonnée (selon Morgali)

mement reconnu : le martèlement de la surface libre par la pluie. Les perturbations qu'il provoque abaissent considérablement, sur l'échelle des nombres de Reynolds, le seuil de transition d'état comme le met en exergue, assez paradoxalement, le pic caractéristique de l'arrêt des précipitations (figure 5).

Lorsqu'elles cessent, le ruissellement cherche un nouvel équilibre. Le sursaut de la courbe résulte d'une augmentation plus rapide de vitesse que la décroissance graduelle de hauteur. L'arrêt des pluies modifie donc fondamentalement les caractéristiques de frottement au point de suffire, dans certains cas, à provoquer une transition directe turbulent-laminaire. 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.

D'après les études de Yu et al [9], les variations du frottement ne créent un pic visible que lorsqu'elles s'accompagnent d'un changement d'état. Ils expliquent ainsi qu'au delà de $Re = 2000$, l'impact des gouttelettes contribue peu à une turbulence que l'écoulement sait entretenir à lui seul. Parallèlement, il doit exister une valeur en deçà de laquelle la pluie ne parvient plus à perturber un écoulement trop stable.

En suivant ce raisonnement, nous pouvons cerner la zone de transition d'état avec une approximation raisonnable pour des bornes fixées entre 100 et 2000. Puisque la nature n'a pas opéré 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 nous paraît sage de rechercher un compromis pour la loi de frottement en précisant l'ampleur des répercussions de cette approximation.

En nous appuyant notamment sur les travaux de Weather et al [10] ou d'Overton [11], nous nous rallions à la loi de Manning dont il s'établit que l'approximation ne se solde

pas par des erreurs significatives lorsqu'il existe des régions à écoulement laminaire.

Rappelons enfin l'acquis expérimental majeur d'une théorie cinématique qui concorde avec la réalité physique reproduite sur des géométries simples. La borne inférieure pour k_0 , fixée par Woolhizer et al à 10, suffit à accorder la théorie simplifiée avec l'expérimentation.

5. EXTENSION DE LA THÉORIE CINÉMATIQUE AUX TOPOGRAPHIES RÉELLES

Il est assez flagrant de constater que si la thèse cinématique trouve certaines applications en hydrologie, ce n'est jamais qu'en s'en tenant à des raisonnements unidimensionnels avec, dans la majorité des cas, un terrain d'écoulement idéalisé 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 ou de ru drainant.

Il est très difficile de soutenir qu'une telle simplification extrême en long des irrégularités topographiques de chaque bande de terrain n'occasionne aucune incidence sur l'hydrogramme qui se déverse dans tout segment de rivière (Lane *et al* [12]), avec, en tout état de cause, le problème crucial du critère qui fixe ces pentes équivalentes.

Si, inéluctablement, notre objectif consiste à progresser dans la discrétisation pour exploiter au maximum cette richesse d'informations que constitue le caractère quasi-tridimensionnel de toute topographie naturelle, l'évolution n'en demeure pas moins théoriquement parlant beaucoup plus audacieuse puisqu'elle étend le champ d'application de l'approximation cinématique à des topographies en long plus générales que celles abordées expérimentalement.

Dans la perspective d'une totale liberté dans la représentation topographique, nous ne justifierons pas cette extension sur la seule base du critère initial de Woolhizer et al qui porte sur k_0 . Cette question cruciale trouve en fait une

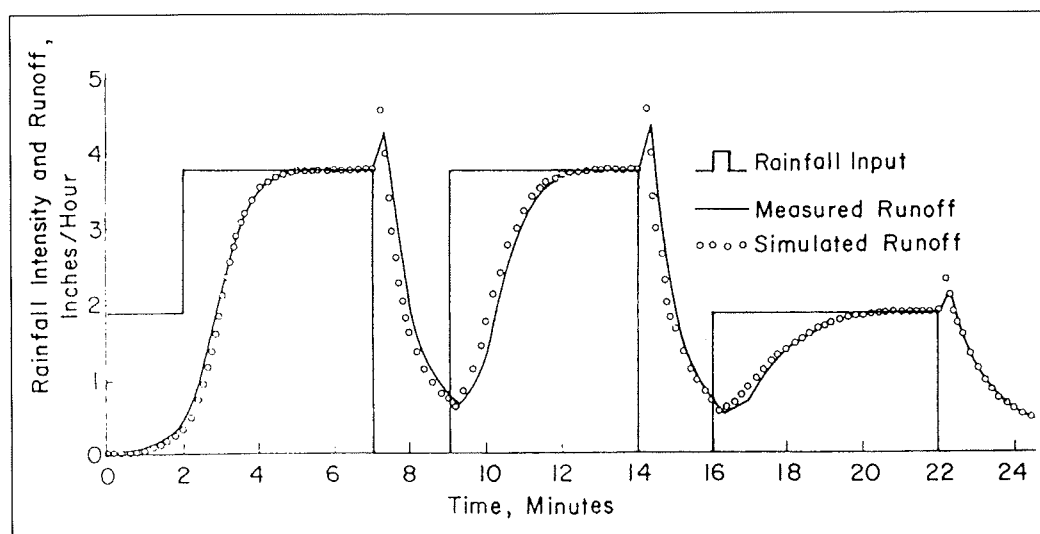


Fig. 5 – Résultat d'écoulements hydrologiques à faible nombre de Reynolds. Plan de 22 m de long pour une pente de 0,005 (selon Izzard [8])

réponse dans le réalisme et le bon sens qui doit prévaloir dans une telle modélisation numérique.

Quittons un instant le contexte théorique pour nous en tenir simplement à des ordres de grandeur. Dans l'optique de modélisations hydrologiques sur des bassins couvrant des centaines voire des milliers d'hectares, il paraît illusoire d'espérer adopter des mailles de discrétisation de dimension moyenne nettement inférieure à la centaine de mètres.

En tenant compte des ordres de grandeur caractéristiques pour ce type d'écoulement, nous pouvons dès lors comparer les influences relatives de chaque terme de l'équation dynamique complète (2) :

$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t}$	$+$	$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}$	$=$	$g (\sin \theta$	$-$	$\cos \theta \frac{\partial h}{\partial x})$	$-$	$\frac{t_x}{h}$	$-$	$(r-i) \frac{\bar{u}}{h} \cos \theta$	(12)
1		2		3		4		5		6	
0 (10 ⁻⁶)		0 (10 ⁻⁶)		0 (1)		0 (10 ⁻³)		0 (1)		0 (10 ⁻⁶)	
inertie		convection		pente de fond pente totale de surface			frottement		contribution des apports extérieurs		

L'évaluation révèle la totale inutilité de prendre en compte les équations complètes pour des topographies globales. Seules des mailles de taille comparable à la hauteur de la lame d'eau rendraient à chaque terme la faculté d'être numériquement significatif. On verse alors dans un autre domaine, celui que Tayfur et al [13] intitulent "écoulement sur de la microtopographie". Il se heurte à d'innombrables difficultés, tant "philosophiques" que numériques.

La complexité d'une discrétisation plus fine pour la gestion des données, le temps prohibitif que requerrait une discrétisation fine sur du matériel informatique usuel, nous incitent donc à choisir l'hypothèse cinématique généralisée aux deux dimensions spatiales comme base de développement pour la modélisation d'écoulements hydrologiques :

$$\bar{u}_x = \sqrt[4]{\sin \theta_j \sin \theta_j} c_f \sqrt{h} \cos \theta_s = a' h^m \cos \theta_s \quad (13)$$

$$\bar{u}_y = \sqrt[4]{\sin \theta_j \sin \theta_j} c_f \sqrt{h} \sin \theta_s = a' h^m \sin \theta_s$$

Le remplacement de \bar{u}_i dans l'équation de continuité intégrée sur la hauteur donne l'expression quasi-tridimensionnelle de l'écoulement hydrologique, de seule inconnue h

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (a' h^{m+1} \cos \theta_s) + \frac{\partial}{\partial y} (a' h^{m+1} \sin \theta_s) = \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = (r-i) \cos \theta_z \quad (14)$$

avec :

θ_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 C

$$c_f = c_h \quad \text{pour un écoulement de Chézy}$$

$$= \frac{h^{1/6}}{n} \quad \text{pour un écoulement de Manning}$$

VI. CONCLUSION

Concluons en résumant la démarche qui a prédominé dans l'élaboration de ce modèle hydrologique basé sur la physique de l'écoulement.

Les processus naturels à prendre numériquement en compte concernent des étendues telles qu'il faut renoncer à étudier la progression de chaque filet d'eau parmi les brins herbeux pour composer plus sagement avec une échelle de maillage très supérieure à l'épaisseur de la lame ruisselante.

Ces contingences numériques préconisent une intégration topographique qui ne va pas nécessairement à l'encontre d'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 macroscopique très supérieure à celle des accidents locaux de la topographie ou de l'écoulement.

La théorie cinématique respecte cette dernière démarche conceptuelle. Ses tests de validité sur des topographies naturelles légitiment pleinement l'approche adoptée. Ils doivent malheureusement se cantonner dans des géométries et conditions élémentaires propices à un meilleur contrôle de tous les intervenants.

Par conséquent, il paraît difficile de citer ces essais comme de strictes justifications d'applicabilité de cette méthode aux géométries quelconques ainsi que d'invoquer in extenso des valeurs de coefficients k_0 établis sur géométries élémentaires.

Comme dans bien des domaines, ils constituent autant de signes encourageants, des guides et des incitants au moment d'élargir une méthode éprouvée dans des cas simples pour la transformer en une méthode générale qui concilie au mieux réalité physique et impératifs numériques.

La théorie cinématique, nous l'avons montré, accommode au mieux ces deux aspects en proposant tous les avantages fondamentaux d'une d'approche physique : interprétation plus aisée des phénomènes et du choix des coefficients, prise en compte des variations spatiales des données géologiques, pluviométriques, ..., mais surtout quantification aisée de l'impact de toute modification sur un intervenant du système.

Sa généralisation en quasi-tridimensionnel ouvre, en principe, la voie à l'élaboration d'un code numérique travaillant directement sur carte topographique digitalisée, même s'il est vain de penser que la simplicité apparente de sa formulation mathématique ne dissimule aucun obstacle tant mathématique que numérique [14] !

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] 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.
- [7] BELL N. C., WHEATER H.S. and JOHNSTON P. M., *Evaluation of overland flow models using laboratory catchment data - II. Parameter identification of physically based (kinematic waves) models*, Hydrological Sciences Journal, Vol 34, n° 3, June 1989, pp 289-317.
- [8] IZZARD C.F., *Overland flow tests*, Bureau of Public Roads, Tabulated Hydrographs, Vol 1-3, 1942-43.
- [9] YU Y.S. and Mc NOWN J.S., *Runoff from impervious surfaces*, Journal of Hydraulic Research, Vol 2, n° 1, 1964, pp 3-24.
- [10] 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.
- [11] OVERTON D.E., *Kinematic flow on long impermeable planes*, Water Resources Bulletin, Vol 8, n° 6, 1972, pp 1198-1204.
- [12] 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.
- [13] TAYFUR G., LEVENT KAVVAS M., GOVINDARAJU R.S., STORM D.E., *Applicability of St. Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltrating surfaces*, Journal of Hydraulic Engineering, Vol 119, n° 1, jan 1993, pp 51-63.
- [14] 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.



BON DE COMMANDE

NOUVEAUTÉS TEC & DOC - LAVOISIER

À RENVOYER AUX EDITIONS CEBEDOC

2 RUE ARMAND STÉVART - B-4000 LIEGE (BELGIQUE) • FAX : (041) 54 03 63

JE PASSE COMMANDE D'UN EXEMPLAIRE DE L'OUVRAGE :

- Mémento du Gestionnaire de l'Alimentation en Eau et de l'Assainissement
Lyonnaise des eaux, Direction F. Valiron - 3 vol. au prix de 8.800 BEF (TTC)
- Techniques alternatives en assainissement pluvial, Y. Azzout, S. Barraud, F.N. Cres et E. Alfakih 2.060 BEF (TTC)
- Dépolluer les eaux pluviales. Contribution à l'élaboration d'une stratégie. Ouvrage collectif 2.400 BEF (TTC)

NOM :

FONCTION :

ORGANISME :

ADRESSE :

..... TVA :

- REGLEMENT :
- sur présentation d'une facture en exemplaire(s)
 - par virement au CCP 000-0023511-37
 - par transfert bancaire au compte 659-2868301-43
 - par chèque