RALENTISSEMENT DYNAMIQUE DES CRUES : EVALUATION DE L'IMPACT HYDRAULIQUE DES HAIES BRISE COURANT

C. HERMEL, J. CHORDA, M.M. MAUBOURGUET, D. DARTUS

RAPPORT HYDROECO : 16 NOVEMBRE 2010

Unité Mixte de Recherche 5502 CNRS – INP/ENSEEIHT – UPS
Allée du Professeur Camille Soula – 31400 Toulouse France – www.imft.fr

Table des matières

1 INTRODUCTION 3
1.1 Contexte 3
1.2 Les haies brise courant 3
1.3 Objectifs de l'étude 4
2 REPRESENTATION DES HAIES 6
2.1 Rugosité 6
2.2 Force de traînée 7
2.3 Porosité 8
2.4 Calcul d'une rugosité à partir des caractéristiques de la végétation 8
2.5 Synthèse 10
3 LES CODES NUMERIQUES UTILISES 11
3.1 TELEMAC2D 11
3.1.1 Description 11
3.1.2 Les forces de frottement 11
3.1.3 Les forces de traînée 12
3.1.4 La porosité 13
3.2 HEC-RAS 13
3.2.1 Description 13
3.2.2 Les forces de frottement 14
3.2.3 Contractions et expansions 14
4 MODELISATION 2D DE LA VEGETATION 15
4.1 Le modèle numérique 15
4.2 Introduction de la végétation dans le modèle numérique 15
4.2.1 Modification locale du coefficient de Strickler 15
4.2.2 Influence de la porosité 17
4.2.3 Représentation de la traînée 19
5 HAIES EN REGIME INSTATIONNAIRE SUR UN TRONÇON TYPE 22
5.1 Le modèle 2D 22
5.2 Résultats 24
5.3 Le modèle 1D 27
5.3.1 Modèle numérique 27
5.3.2 Vitesses et lignes d'eau 29
6 COMPARAISON DES RESULTATS 2D-1D 30
7 EFFET DES HAIES SUR UN TRONÇON DE GRANDE LONGUEUR 31
8 CONCLUSION 33

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

La Lèze est une rivière de la région Midi-Pyrénées, qui prend sa source dans la zone Nord-Pyrénéenne et traverse les départements de l'Ariège et de la Haute-Garonne sur 52 km pour se jeter dans l'Ariège juste au Nord de Labarthe sur Lèze.

L'ampleur des crues de la rivière ces dernières décennies, couplée avec une densification rapide des activités humaines en relation avec l'agglomération toulousaine a mis en évidence la vulnérabilité de la vallée de la Lèze aux inondations.

La crue de juin 2000 (débit de pointe observé proche de 144 m3/s à Labarthe sur Lèze) illustre bien cet état de fait: dégâts considérables sur un grand nombre de maisons, d'entreprises, d'infrastructures publiques ou d'équipements agricoles.

En 2004, le SMIVAL a répondu à l'appel d'offre «PAPI » (Plans d'Action de Prévention des Inondations) lancé par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, conduisant à la réalisation en 2006 d'un Schéma de Prévention contre les Inondations de la Lèze, étude globale préconisant un certain nombre de mesures destinées à réduire le risque d'inondation sur le bassin versant.

Parmi ces mesures, le **Ralentissement Dynamique des crues** se traduit par l'élaboration d'ouvrages et d'aménagements à l'échelle du bassin versant ayant pour but de retenir l'eau des précipitations sur les versants, de diminuer autant que possible la vitesse d'écoulement des eaux lors d'évènements pluvieux de forte importance, ainsi que de favoriser la connexion avec les annexes fluviales et le lit majeur en général, pour amortir le pic de crue.

On cherche donc à agir sur les bassins versants et sur le lit majeur dans son ensemble, en tentant de quantifier l'influence de l'amont d'une zone sur celle-ci.

Le SMIVAL réalise une opération de plantation de haies brise courant (ou brise crue) en lit majeur de la Lèze, afin de renforcer la capacité d'écrêtement des crues du lit majeur.

Cette étude a pour but de déterminer l'effet de haies végétales disposées en lit majeur de la Lèze pour servir d'obstacles à la propagation des crues.

1.2 Les haies brise courant

L'implantation de haies sur le lit majeur fait partie des solutions envisagées dans l'étude « Elaboration d'un schéma de prévention des risques d'inondation de la Vallée de la Lèze » réalisée par GEOSPHAIR-AGERIN en 2006 pour pallier au phénomène de crues.

Les propriétés attendues des haies sont multiples :

- limitation de l'érosion des sols – stabilisation des berges
- constitution d'un filtre végétal, permettant une prévention de l'eutrophisation
- diminution des hauteurs d'eau aval lors des crues, ralentissement des écoulements.

Le SMIVAL préconise une implantation de haies en lit majeur de la Lèze, perpendiculairement au lit mineur et espacées de 300 à 500m.

La haie brise crue de Montaut, plantation pilote du programme de prévention des inondations, a été mise en place durant l'hiver 2008-2009, sur la base des conseils techniques du bureau d'études BIOTEC, et de l'association Arbres et Paysages d'Autan (conseils de plantations pour les haies champêtres en Haute Garonne).

En pratique, les arbres, arbustes et arbrisseaux choisis sont des jeunes plants (1 an à la plantation), d'espèces locales, adaptés au sol, au climat et aux maladies.

Plusieurs types d'implantation sont possibles (Figure 1), suivant la configuration du terrain : haie fossé (Figure 2), chemin, fossé-chemin, talus.

Figure 1 : types de haies

un exemple : la haie fossé

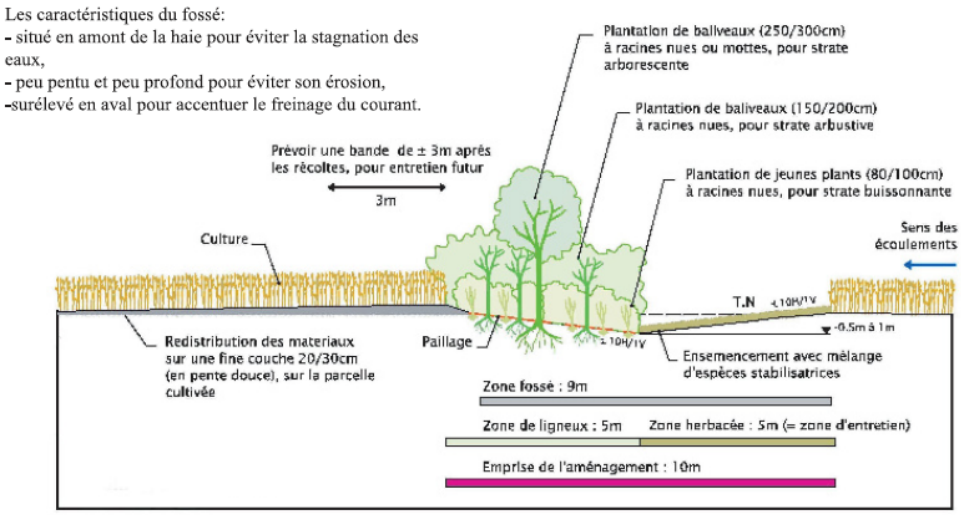


Figure 2 : la haie fossé

Une composition stratifiée est préconisée: superposition d'arbres et arbustes de différentes tailles (églantier, sureau noir, aubépine, …)

A été joint en annexe (annexe 1) et à titre d'exemple un plan d'implantation de haies brise crue du SMIVAL à Lézat Sur Lèze.

1.3 Objectifs de l'étude

L'étude de GEOSPHAIR-AGERIN (2006) reposant sur une modélisation hydrologique globale à l'aide du logiciel HMS a recherché la quantification de l'influence d'aménagements sur le bassin versant de la Lèze au niveau des hydrogrammes de crue pour différentes stations (..., Lézat, Labarthe). Les simulations ont porté sur la crue de 2000 et la crue centennale. Ont été testés des aménagements conjugués : casiers en lit majeur, barrages écrêteurs et haies en

lit majeur. Dans ce type de modélisation, les haies sont assimilées à des obstacles à contourner, impliquant un rallongement du « chemin de l'eau » et par là du temps de parcours.

Toutefois, le SMIVAL a souhaité avoir une information plus précise sur le rôle exact des seules haies dans le processus du ralentissement dynamique. Cette étude nécessitait de réaliser des modélisations hydrodynamiques basées sur la résolution des équations mécanistes de Saint Venant 1D et 2D.

Les différentes phases de cette étude sont les suivantes :

- Répertorier au préalable dans la littérature les différentes façons de modéliser hydrauliquement une végétation locale (paramètres utilisés, équations de résistance à l'écoulement, protocoles expérimentaux …) ;
- Tester les méthodes retenues sur des modèles 1D et 2D en comparant les résultats obtenus par les deux approches ;
- Quantifier l'impact hydraulique des haies brise courant.

2 REPRESENTATION DES HAIES

Le problème est d'obtenir une modélisation correcte et la plus réaliste possible de l'effet d'une haie végétale sur l'hydrodynamique. Il s'agit d'un problème ouvert de par la complexité structurelle de l'obstacle : émergent, de forme et d'encombrement variable : densité du feuillu, rigidité plus ou moins grande des branches, porosité, … Pour des considérations d'échelle, Il est évident qu'une telle modélisation sera faite sous maille c'est-à-dire sous forme d'une approche intégratrice de l'effet global. Plusieurs concepts sont possibles pour une telle modélisation mais il apparaît que l'introduction d'un obstacle doit correspondre physiquement à l'application d'une force sur l'écoulement (action-réaction). Cette force résulte de l'interaction au niveau de la couche limite entre l'obstacle sensiblement au repos et l'écoulement de vitesse V. Du point de vue hydrodynamique, on trouve deux types de forces toutes deux proportionnelles au carré de V : la force de frottement sur le fond (pariétale) et la traînée d'obstacles (structures verticales frontales) plus ou moins isolés. La première dépend de la (macro)-rugosité de la surface de contact (périmètre mouillé) et est définie à travers un coefficient de rugosité *fourre-tout* (Manning n, Strickler K, Chézy C,…), la seconde dépend en particulier du maître-couple et de la forme de l'obstacle et repose sur la connaissance du coefficient de traînée. Elle présente l'avantage que la surface de frottement augmente avec la hauteur d'eau, contrairement à la rugosité du fond.

On conçoit que la représentation d'une haie comportera une fourchette d'incertitude importante.

La détermination de la résistance des haies végétales est un problème de mécanique des fluides complexe qui a des applications pratiques variées : études de crues débordantes en lit moyen, modélisation de l'hydrodynamique des Mangroves (Struve et al. 2003; Wu et al. 2001), mise au point de haies brise-vent (Grant and Nickling 1998) ou servant de barrières à neige... Cette thématique a donné lieu à une littérature abondante mais qui se révèle à l'usage difficile à appliquer de façon pratique.

En vue de représenter l'effet de la végétation, on peut distinguer comme indiqué plus haut deux approches :

- par des forces de frottement qui vont augmenter la rugosité déjà présente du lit d'une rivière, par exemple ;
- par des forces de traînée générées par la présence de tiges, feuilles,...qui vont s'opposer à l'écoulement.

A ces deux forces peut être couplée la prise en compte de la réduction locale de la porosité du milieu, permettant de reproduire l'obstruction générée par la végétation.

2.1 Rugosité

La résistance d'une végétation à un écoulement peut être représentée par une rugosité additionnelle. L'analyse de la ligne d'eau amont et aval et/ou la mesure des caractéristiques structurelles de la végétation permet ainsi le calcul de la contribution de la végétation à la résistance à l'écoulement (sorte de « rugosité effective » de la végétation, sous la forme d'un coefficient de Manning ou de Strickler.

Dans certaines publications, cette méthode permet une réécriture de l'équation de Manning, en y incluant de nouveaux coefficients caractéristiques de la végétation.

Par exemple : $q = a\ \delta_y^{\ b}\ y_1^{\ c}$ (Dalton et al. 1996)

avec :

- $y1$: hauteur d'eau à l'amont de la végétation

- δy : différence entre les hauteurs d'eau amont et aval
- *a,b,c* : caractéristiques de la végétation et déterminés expérimentalement)

Pour rendre compte de l'effet conjugué de différents facteurs affectant la section d'écoulement, le calcul du coefficient de Manning peut être obtenu par des formules empiriques qui décomposent la résistance à l'écoulement en plusieurs parties prenant en compte la composition du lit, géométrie du lit, présence de végétation, etc... :

n=(n0+n1+n2+n3+n4)m (Cowan 1956)

avec :

- *n0* : valeur de base du Manning pour un canal droit uniforme
- *n1* : irrégularités du fond
- *n2* : variation de la géométrie du canal
- *n3* : présence d'obstacles
- *n4* : végétation
- *m* : facteur de correction des méandres

Certains auteurs (Freeman et al. 2000) proposent également des formules empiriques très complexes permettant de calculer le coefficient de Manning lié à la végétation :

$$n = K_n 0.183 \left(\frac{E_s A_s}{\rho A_i V_*^2}\right)^{0.183} \left(\frac{H}{Y_0}\right)^{0.243} \left(\frac{\nu}{V_* R_H}\right)^{0.115} (MA_i)^{0.273} \frac{1}{V_*} R_H^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \qquad (1)$$

Il faut mentionner le « *Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains* » (G.J. Arcement and Schneider) présentant une procédure permettant de choisir le coefficient de Manning d'une plaine inondable par présentation de photos de cas dans lesquels le Manning a été vérifié : l'estimation d'un coefficient de Manning s'effectue alors par similitude visuelle.

On retiendra que l'effet de rugosité est applicable à toute modélisation qu'elle soit 1D ou 2D.

2.2 Force de traînée

Une végétation peut être représentée par une force de traînée s'opposant à l'écoulement. La plupart des études réalisées utilisent des cylindres disposés verticalement en rangées dans un canal, mais quelques travaux (en canal également) utilisent une végétation naturelle, parfois même avec couplage d'espèces végétales et différenciation des cas submergés et non submergés (Freeman et al. 2000), publication détaillée plus loin, ou encore, avec un degré de réalisme et de complexité supérieur, prise en compte de la flexion des plantes et du profil adopté par le feuillage suivant la vitesse d'écoulement dans le calcul de la traînée (Kouwen and Fathi-Moghadam 2000).

Dans notre cas, la prise en compte de l'effet de structures verticales dans un modèle 2D ne s'effectue pas en représentant individuellement ces obstacles dans le domaine de calcul (comme on le ferait pour des piles de pont par exemple), mais en les remplaçant localement par une force unique correspondant à la traînée cumulée des obstacles.

Avec cette méthode, les forêts ou les zones urbaines sont représentées dans les équations de Saint-Venant par une force extérieure analogue à la force de frottement sur le fond, correspondant à la force de traînée des obstacles. La traînée d'un obstacle est donnée par :

$$F^t = \frac{1}{2}\rho U^2 D h C_D \qquad (2)$$

avec :

- F^t : force de traînée (N)

- ρ =1000 kg/m^3 masse volumique de l'eau
- U : module de la vitesse locale (m/s)
- D : maître-couple de l'obstacle (m)
- h : la hauteur d'eau (m)
- C_D : le coefficient de traînée (1)

La prise en compte de la traînée dans Telemac2D sera donnée au paragraphe 3.1.3.

2.3 Porosité

Une porosité locale peut être utilisée en complément des deux approches précédentes pour représenter l'obstruction de volume liquide créé par les obstacles ce qui est équivalent hydrauliquement à un rétrécissement local de section suivi d'un élargissement.

Un exemple : $\alpha = 1 - \Sigma(N_V A_V)_i$ (Rameshwaran and Shiono 2007) avec :

- AV : aire de la section moyenne des tiges de la végétation de type i
- NV : densité moyenne de la végétation i/unité d'aire

Il est alors possible d'affiner un modèle en couplant une force de traînée avec une porosité, par exemple. L'analyse de la prise en compte de la porosité dans le code Telemac2D sera donnée au paragraphe 3.1.4

2.4 Calcul d'une rugosité à partir des caractéristiques de la végétation

La présence de structures verticales va permettre de calculer une rugosité induite par ces obstacles à l'écoulement, sous la forme d'un coefficient de Manning, lié aux caractéristiques physiques de la végétation (diamètre des tiges, densité de végétation, Cd).

Pour une reproduction correcte de l'effet de l'obstacle, il est nécessaire que celui-ci induise une force extérieure sur l'écoulement ce qui peut être réalisé soit par le frottement du fond (n Manning) soit par une traînée d'obstacle vertical. Les deux approches sont-elles équivalentes ?

La force de frottement exprimée par le coefficient de Manning est donnée par :

$$F^f = -\frac{g\,n^2}{h^{4/3}} U^2 \tag{3}$$

et la force de traînée par :

$$F^t = -\frac{r}{A}\frac{D}{2} C_D U^2 \tag{4}$$

Dans les deux cas les forces sont proportionnelles au carré des vitesses.

Si l'on identifie les deux forces traînée = frottement, il vient :

$$\frac{g\,n^2}{h^{4/3}} = \frac{r}{A}\frac{D}{2} C_D \tag{5}$$

soit :

$$C_D = \frac{2g\,n^2}{h^{4/3}}\frac{A}{rD} \tag{6}$$

équation qui permet de relier n et C_D.

Application : si on admet pour simplifier que C_D=1 (cylindres en écoulement turbulent), un diamètre des cylindres D=0.01 m, une hauteur d'eau h=1m, on obtient :

$$\frac{r}{A} = 1962n^2 \tag{7}$$

Un Manning n=0.1 ($K_{Str} = 10$) correspondrait ainsi à une densité surfacique de 19.62 ~ 20 tiges/m²… et un Manning n=0.2 ($K_{Str} = 5$) à une densité surfacique de 4 x 20 = 80 tiges/m² (Figure 3).

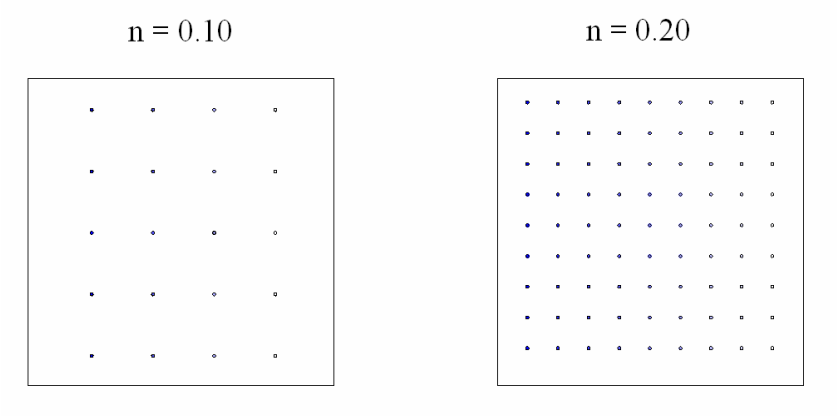


Figure 3 : schématisation densité - Manning

OBSERVATIONS

- il convient d'ajouter le frottement du sol nu à celui des haies
- pour obtenir un effet de traînée totalement équivalent à une rugosité de coefficient n, il faudrait faire varier le coefficient de traînée en $h^{4/3}$ tant que la haie n'est pas submergée.
- n et C_D ne sont pas des constantes dans l'absolu et dépendent en fait de nombreux paramètres et de variables d'écoulement tels que : h, Reynolds basé sur la hauteur d'eau ou le diamètre des tiges.
- laminaire ou turbulent : les formules précédentes font intervenir des forces proportionnelles au carré de la vitesse ce qui suppose que l'écoulement est turbulent. D'autres formules existent en mixant les deux modes (Kadlec 1990)
- Equifinalité de la traînée :

$$F^t = \frac{1}{2}\rho U^2 r D h C_D \tag{8}$$

On voit que l'objet est d'obtenir une valeur correcte du terme $rDhC_D$ avec :

- $A = rDh$: surface projetée de contact fluide-obstacle / surface en plan
- r : nombre de « tiges » au m²
- D : diamètre des « tiges » ou plutôt encombrement végétal
- h : tirant d'eau si végétation non submergée

La relation suivante basée sur l'ajout des forces de traînée et de frottement sur le fond exprimées toutes deux en terme de Manning et donc proportionnelles à n^2, permet de dissocier les contributions du lit et de la végétation à la rugosité d'ensemble:

$$n_{tot} = \sqrt{n_{veg}^2 + n_{fond}^2} \tag{9}$$

Il est donc a priori envisageable de modéliser l'effet de la végétation par une augmentation localisée des forces de frottement ce qui permet d'envisager le recours à des calculs 1D moins coûteux en temps de réponse que les calculs en 2D (Wu et al. 1999). Les tests de validation 2D-1D sont présentés au paragraphe 6.

2.5 Synthèse

Les résultats du rapport de (Freeman et al. 2000) constituent une base de données appliquées très complète et détaillée sur la résistance de la végétation à l'écoulement : une vingtaine d'espèces d'arbustes ont été utilisées (taille : de 0.2 à 1.5m) et implantées dans un canal après une phase de mesures préliminaires des caractéristiques des plantes (hauteur, envergure, diamètre moyen des tiges,…) voir Tableau 1 - Caractéristiques des végétaux testés par Freeman et al. (2000). Les équations de régression développées pour le calcul du coefficient de Manning différencient les cas submergés et non submergés, et les mesures effectuées en canal comprennent également les mesures de Cd pour des groupements d'arbustes d'une même espèce, puis avec couplage d'espèces.

Les résultats relatifs à la force de traînée ne sont pas directement exploitables car les tableaux de mesures ne comportent que l'intensité de la force mesurée par extensométrie et la hauteur d'eau. Il manque la valeur de la vitesse et surtout la valeur du coefficient de traînée des différentes espèces. Les données exprimées en coefficient de frottement équivalent de Manning sont par contre directement exploitables. La valeur maximale du Manning trouvée dans la publication de l'US Army Corps est de 0.143 soit un coefficient de Strickler voisin de 7 obtenu par l'implantation de « mountain willow » (Salix eastwoodiae), de 1.5m de haut, avec une densité de 4.84 plantes/m².

Tableau 1 - Caractéristiques des végétaux testés par Freeman et al. (2000)

	H (m)	largeur (m)	H effective (m)	Aire sol (m²)	Dtige(m)	N plants	Mod elasticité (N/m2x 1E8)
Yellow Twig Dogwood	0.51	0.229	0.33	0.076	0.0095	1	3.21
Berried Elderberry	0.71	0.356	0.51	0.181	0.0095	1	0.526
Purpleleaf Euonymus	0.2	0.254	0.2	0.052	0.0063	2	4.14
Red Twig Dogwood	0.97	0.482	0.76	0.368	0.0252	2	10.2
Service Berry	0.71	0.178	0.51	0.09	0.0063	6	47.6
Yellow Twig Dogwood	0.71	0.254	0.61	0.155	0.0095	2	29.9
Mulefat	0.97	0.076	0.51	0.039	0.0126	1	5.95
Alder	0.76	0.152	0.7	0.107	0.0079	1	17
Valley Elderberry	0.97	0.762	0.91	0.697	0.0268	1	16.5
Salt Cedar	1.52	0.61	1.37	0.836	0.0316	1	13.1
Black Willow	1.22	0.305	1.22	0.372	0.0189	1	1.5
Red Willow	0.61	0.152	0.61	0.093	0.0095	1	4.5
Mountain Willow	1.52	0.914	1.22	1.115	0.0254	4	3.41

Ainsi, les porosités rencontrées dans la littérature sont généralement comprises entre 100% (pas d'obstacle à l'écoulement) et 90%, avec un Cd moyen égal à 1.5 (Järvelä 2004).

Peu d'études comportent de véritables mesures de terrain: il s'agit la plupart du temps de modèles en canaux, avec une végétation représentée par des assemblages de cylindres rigides (non prise en compte de la flexion), et souvent submergés (Lopez and Garcia 2001).

3 LES CODES NUMERIQUES UTILISES

3.1 TELEMAC2D

3.1.1 Description

TELEMAC-2D (Hervouet 2000) résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontales. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sur la verticale. Telemac2d est désormais open source et téléchargeable à l'URL : http://www.telemacsystem.com

Les équations de Telemac sous forme non conservative sont les suivantes :

Equation de continuité :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u}\,.\,\overrightarrow{grad}(h) + h\,div(\vec{u}) = Sce \tag{10}$$

Equations dynamiques :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -g\frac{\partial Z_s}{\partial x} + F_x + \frac{1}{h}div(h\nu_e\overrightarrow{grad}(u)) + (u_{sce} - u)\frac{Sce}{h} \tag{11}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -g\frac{\partial Z_s}{\partial y} + F_y + \frac{1}{h}div(h\nu_e\overrightarrow{grad}(v)) + (v_{sce} - v)\frac{Sce}{h} \tag{12}$$

La description des termes de ces équations sort du cadre de cette étude et nous renvoyons le lecteur intéressé à (Hervouet 2003). Les termes F_x et F_y correspondent aux forces extérieures s'exerçant sur le fluide telles que la traînée ou le frottement.

Le logiciel trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale, et est capable de prendre en compte divers phénomènes physiques : turbulence, écoulements torrentiels et fluviaux,…

Le logiciel est intégré au sein d'un système complet de modélisation : le système TELEMAC. Cet ensemble offre tous les modules nécessaires à la simulation numérique dans les domaines de l'hydrodynamique bi- et tridimensionnelle (houle et courant), la sédimentation et la qualité de l'eau.

Les modules suivants ont été utilisés pour l'étude :

- logiciel **MATISSE** (pré-processeur) permettant, en utilisant les informations bathymétriques, de créer un maillage constitué d'éléments triangulaires
- logiciels **RUBENS** et **FUDAA** (post-processeur), permettant d'exploiter graphiquement les résultats obtenus par TELEMAC2D.

3.1.2 Les forces de frottement

En utilisant la formule de Manning pour le frottement :

$$F_x^f = -\frac{g\,n^2}{h^{4/3}}u\sqrt{u^2+v^2} \tag{13}$$

$$F_y^f = -\frac{g\,n^2}{h^{4/3}}v\sqrt{u^2+v^2} \tag{14}$$

Si l'on considère les dimensions de F :

$$[F] = [n^2][L^{-4/3}][L^2T^{-2}]$$

avec :

$$[n] = [L^{-1/3}][T]$$

d'où :

$$[F] = [L^{-2/3}][T^2][L^{-4/3}][L^2T^{-2}] = [L][T^{-2}] \tag{15}$$

soit une accélération ou une force par unité de masse.

3.1.3 Les forces de traînée

Avec cette méthode, les forêts ou les zones urbaines sont représentées dans les équations de Saint-Venant par une force extérieure analogue à la force de frottement sur le fond, correspondant à la force de traînée des obstacles. Suivant le principe d'action-réaction, l'effort du fluide sur une structure est l'opposé de l'effort de la structure sur le fluide. La traînée d'un obstacle est donnée (paragraphe 2.2) par :

$$F^t = \frac{1}{2}\rho U^2 D h C_D \tag{16}$$

En supposant que nous ayons r obstacles verticaux de maître couple (largeur) D, répartis sur un domaine de surface A, et supposés suffisamment hauts pour toujours émerger (sinon on remplacerait h par la hauteur du cylindre dans l'équation (8)). La contrainte de cisaillement induite sur la surface A est

$$\tau = \frac{rF}{A} \tag{17}$$

Il faut donc ajouter le terme $\frac{\tau}{\rho h}$ dans les seconds membres de l'équation de quantité de mouvement. Le terme source correspondant aux structures est donc :

$$F_x^t = -\frac{r}{A}\frac{D}{2}C_D U^2 \tag{18}$$

qui est homogène à : $[F] = [L^{-2}][L][L^2T^{-2}] = [L][T^{-2}]$

Les données nécessaires au calcul sont :

- le nombre de structures par unité de surface r/A
- le diamètre des structures D
- Le coefficient de traînée.

Dans le cas de structures de diamètres différents (mais de même Cd), on peut utiliser la somme des diamètres au lieu de rD.

Exprimée en pertes de charge singulières, la force de traînée correspond à :

$$\Delta h = k\frac{U^2}{2g} \tag{19}$$

avec :

$$k = \frac{r}{A} D\, C_D \tag{20}$$

3.1.4 La porosité

Dans le cadre d'une représentation sous-maille d'obstacles situés dans l'écoulement, il est naturel d'introduire une valeur θ<1 de la porosité pour les mailles concernées ce qui implique pour les équations précédentes (Hervouet 2003) (continuité et dynamique en u):

$$\frac{\partial(\theta h)}{\partial t} + div(\theta h \overrightarrow{u}) = 0 \tag{21}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \overrightarrow{u}.\overrightarrow{grad}(u) = -g\frac{\partial Z_s}{\partial x} + F_x + \frac{1}{\theta h} div(\theta h \nu_t \overrightarrow{grad}(u)) \tag{22}$$

Pour l'équation de continuité, h est remplacé par θh.

De façon qualitative, une diminution locale de la porosité se traduit par une augmentation locale des vitesses et un abaissement des hauteurs d'eau (en fluvial…). Côté équations dynamiques, on remarque que seul le terme de diffusion (3° terme du second membre) est modifié. Dans les zones où la porosité est constante, il n'y a donc pas d'influence, la diffusion ne joue sur la dynamique que dans les zones de transition. On verra lors des tests qu'un changement brutal de porosité peut induire des instabilités dans les calculs.

La porosité représente un effet d'obstruction pour l'écoulement qui parait a priori nécessaire pour modéliser les haies. Son influence sur (h,u,v) doit être testée de façon systématique. On peut penser que l'effet de la porosité est de diminuer localement la hauteur d'eau (rétrécissement en régime fluvial) et d'augmenter les vitesses ce qui entraînera une augmentation des forces résistantes (traînée ou frottement). Toutefois, la diminution de porosité due à la végétation reste limitée.

3.2 HEC-RAS

3.2.1 Description

HEC-RAS, *Hydrologic Engineering Centers River Analysis System* (Système d'analyse des rivières du centre d'ingénierie hydrologique) est un logiciel de modélisation hydraulique destiné à simuler des écoulements en cours d'eau ou canaux. Le modèle utilisé est unidimensionnel, ce qui signifie qu'il n'existe pas de modélisation directe des variations hydrauliques dues aux changements de forme de la section transversale, à la présence de coudes ou autres aspects d'un écoulement 2D ou 3D.

La procédure de base de calcul du logiciel HEC-RAS pour les écoulements permanents est basée sur la solution de l'équation de conservation de l'énergie à une dimension. Les pertes d'énergie sont évaluées par les frottements et les effets de contraction / expansion. L'équation de quantité de mouvement est également utilisée dans les situations d'écoulement rapidement varié, par exemple au niveau de ressauts hydrauliques, de ponts et de confluences.

Pour les écoulements non permanents, le logiciel résout l'ensemble dynamique des équations de Saint-Venant par la méthode des différences finies associée à un schéma implicite.

Les équations de HEC-RAS sont :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \tag{23}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial VQ}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \tag{24}$$

Comme pour Telemac, les détails relatifs à ces équations sont donnés dans la documentation technique téléchargeable avec le code à l'URL suivante :
http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/.

3.2.2 Les forces de frottement

Le frottement est représenté par la pente J de la ligne d'énergie calculée classiquement en hydraulique par

$$J = \frac{Q^2}{G^2} \tag{25}$$

G désignant la débitance

$$G = \frac{1}{n} R_H^{\frac{2}{3}} S \tag{26}$$

avec :

- Q : débit (m3/s)
- n : coefficient de Manning ($m^{1/3}$ s)
- R_H : le rayon hydraulique
- S : la section mouillée

Entre deux sections 1 et 2, différentes formules de composition de J moyen sont prévues dont par défaut l'utilisation de la débitance moyenne :

$$\overline{J} = \left(\frac{Q_1 + Q_2}{G_1 + G_2} \right)^2 \tag{27}$$

La porosité et les forces de traînée ne sont pas utilisables dans le code à moins d'assimiler les tiges des haies à des piles de pont et à leur appliquer des lois de pertes de charge classiques.

3.2.3 Contractions et expansions

Aux pertes de charge linéaires par frottement sur le fond, il convient d'ajouter des pertes singulières de type contraction/expansion. Celles-ci peuvent devenir dominantes dans le cas de changements brusques de vitesses comme dans le cas présent à la traversée des « haies » de rugosité 6 fois supérieure à la rugosité courante. Ces pertes entre deux sections 1-2 correspondent à :

$$\Delta H = C \left| \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_2^2}{2g} \right| \tag{28}$$

avec C : coefficient de contraction ou d'expansion ce dernier étant supérieur car les pertes de charges hydrauliques se situent essentiellement dans les élargissements brusques.

Dans la documentation de référence de HEC-RAS, il est indiqué que dans le cas permanent les valeurs de C sont fixées par défaut à 0.1|0.3. Dans le cas de calculs en mode instationnaire, les valeurs par défaut sont égales à zéro car il est supposé que les forces générées par les contractions/expansion sont implicitement comprises dans l'équation dynamique à travers des forces de pression. Toutefois, il est indiqué que pour tenir compte du fait que le code est 1D, le recours à des coefficients apparaît indiqué dans le cas où le profil comporte des disparités de vitesses importantes ce qui est notre cas. Les coefficients sont à caler empiriquement.

4 MODELISATION 2D DE LA VEGETATION

Un premier modèle a été créé sous Telemac-2D, qui apparaît comme l'outil adapté pour tester les différentes approches physiques possibles permettant de modéliser l'influence d'une végétation sur l'hydrodynamique: adjonction de forces de traînée, d'une rugosité additionnelle l'une ou l'autre étant ou non associée avec une réduction locale de la porosité. Ces tests ne pouvaient pas être réalisés en 1D par suite de la non prise en compte de la traînée et de la porosité par les codes de Saint Venant 1D.

4.1 Le modèle numérique

Les caractéristiques du modèle sont celles du canal utilisé dans l'étude expérimentale de l'US Army Corps (Freeman et al. 2000).

- dimensions du canal : 152.4 x 2.44m
- pente nulle
- rugosité du fond : Ks=33
- zone de test (implantation de végétation) comprise entre x = 50m et x = 70m : la « haie » occupe toute la largeur du canal.

Le maillage représenté sur la Figure 4 est réglé (régulièrement ordonné), densifié au niveau de la zone de test, ce qui permet de limiter le nombre de nœuds de calcul et par là les temps de calcul (nombre de mailles : 19900).

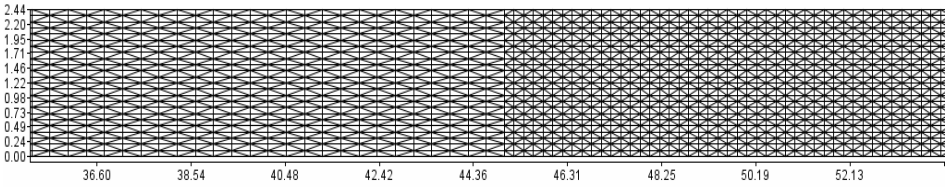


Figure 4 : maillage réglé (détail entrée de la zone de test)

Conditions initiales : à t=0, la vitesse longitudinale u= 0.82m/s et la hauteur d'eau h= 0.5m

Conditions aux limites :

- hauteur constante (0.5m) en sortie de canal
- débit constant ($1m^3/s$) en entrée de canal

4.2 Introduction de la végétation dans le modèle numérique

4.2.1 Modification locale du coefficient de Strickler

Le coefficient de Strickler initial du fond du canal a été fixé à 33, ce qui correspond à la rugosité naturelle d'un cours d'eau tel que la Lèze.

Des tests ont été effectués dans la zone d'étude pour des coefficients de Strickler compris entre 33 (pas de haie) et 5, la valeur minimale trouvée dans la publication de l'US Army Corps étant de 7: implantation de « mountain willow », plantes de 1.5m de haut, avec une densité de 4.84 plantes/m². (Tableau 1). Cette valeur correspond également à celle préconisée dans HEC RAS pour les *dense willows* (voir Annexe 2).

Les graphes Figure 5-Figure 6 présentent l'évolution de deux paramètres significatifs: hauteur d'eau et composante longitudinale U de la vitesse d'écoulement (l'écoulement est fluvial dans les 4 cas étudiés (nombre de Froude maximal compris entre 0.15 et 0.4)).

Les valeurs de U et H sont prises au centre du canal, en effectuant une coupe longitudinale.

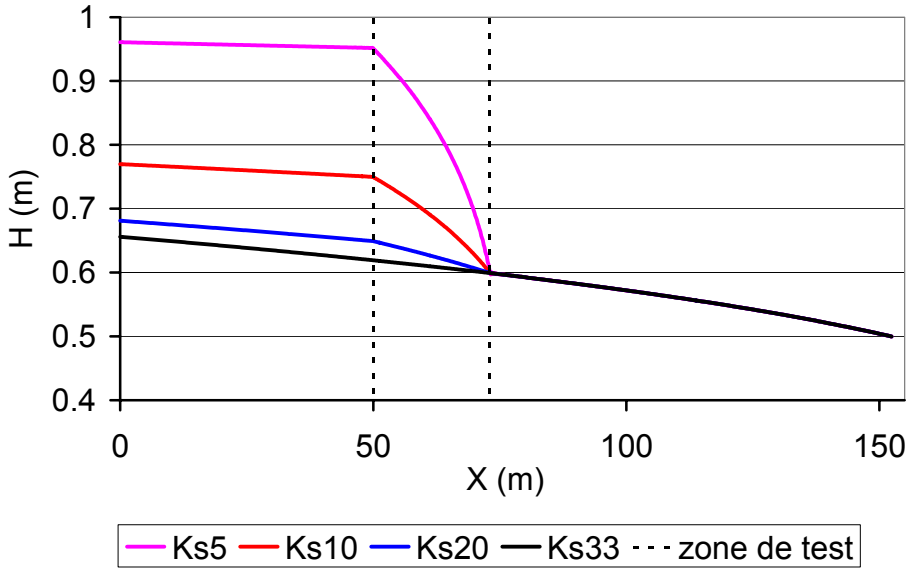


Figure 5 : influence de la rugosité sur les hauteurs d'eau

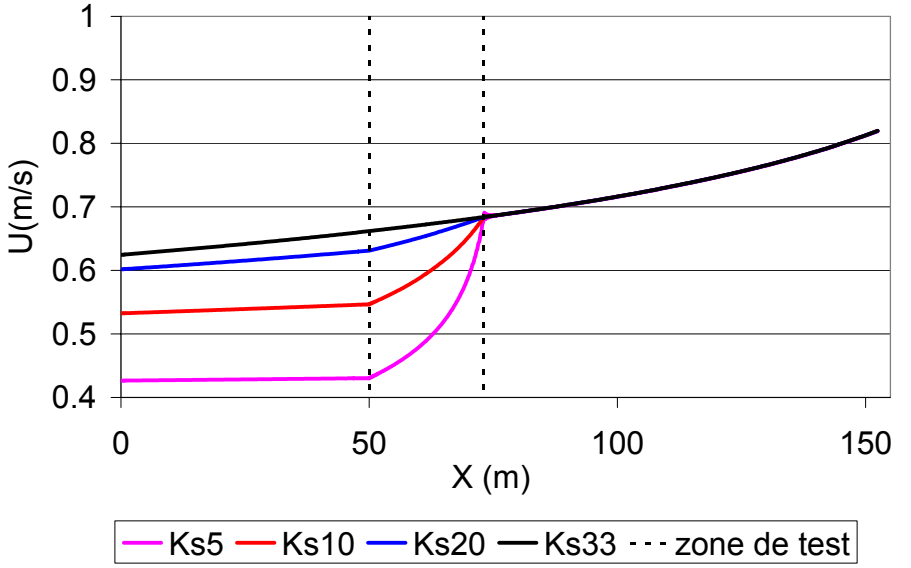


Figure 6 : influence de la rugosité sur les vitesses

Le tableau 2 récapitulatif représente ΔH = H50-H73 (différence de hauteur d'eau entre l'entrée et la sortie de la zone dans laquelle a été modifiée la rugosité), et ΔU = U50-U73 (différence de vitesse) :

Tableau 2 : Influence de la rugosité

	Ks 5	Ks 10	Ks 20	Ks 33
ΔH (m)	0.36	0.16	0.06	0.03
ΔU (m/s)	-0.26	-0.14	-0.06	-0.03

L'augmentation locale de la rugosité (diminution du Ks) induit une augmentation de la hauteur d'eau (36 cm dans le cas d'une rugosité extrême avec Ks=5) et une diminution de la vitesse de l'écoulement en amont (de 0.26 m/s dans le même cas).

4.2.2 Influence de la porosité

L'utilisation d'une porosité locale sert ici à représenter l'obstruction à l'écoulement créée par les obstacles végétaux.

Pour éviter l'instabilité numérique constatée pour une variation brutale de porosité locale dans le secteur des haies, des zones de transition de 2m, à porosité progressive ont été rajoutées de part et d'autre de celui-ci (zones entre pointillés dans les figures 7,8 et 9). Cette modélisation peut représenter ce qui se passe dans la réalité : contact de l'eau avec les premières branches éparses, puis densification progressive de la végétation.

Les calculs ont été effectués avec des porosités allant de 100% (absence de végétation) à 50% (végétation très dense). Les 7,8 et 9 présentent les variations de la hauteur d'eau et de la vitesse dans le canal pour différentes porosités :

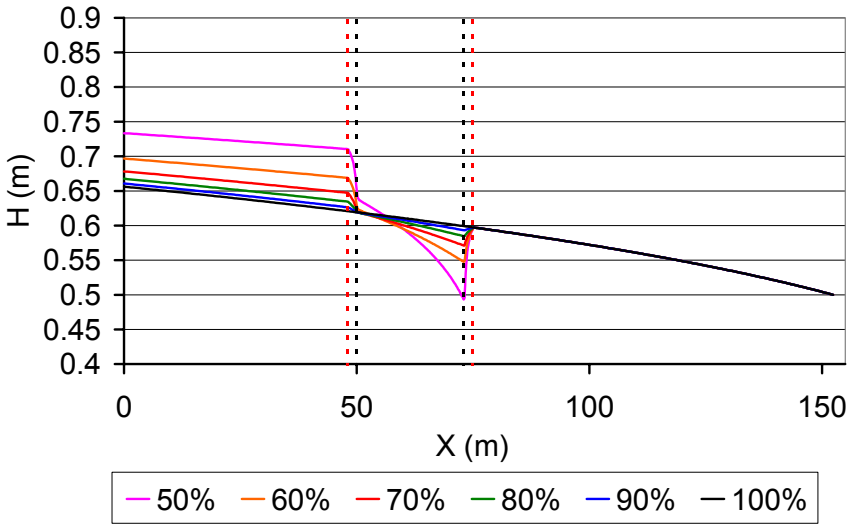


Figure 7 : influence de la porosité sur les hauteurs d'eau

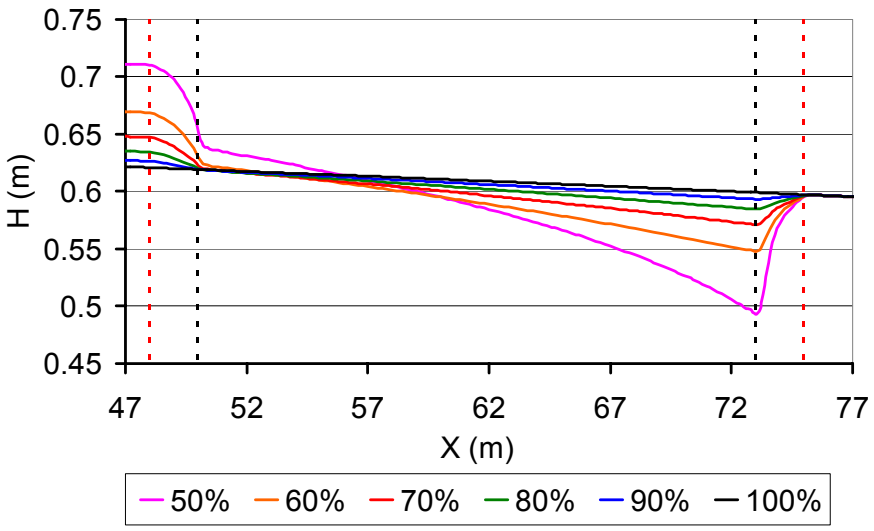


Figure 8 : influence de la porosité sur les hauteurs d'eau (détail)

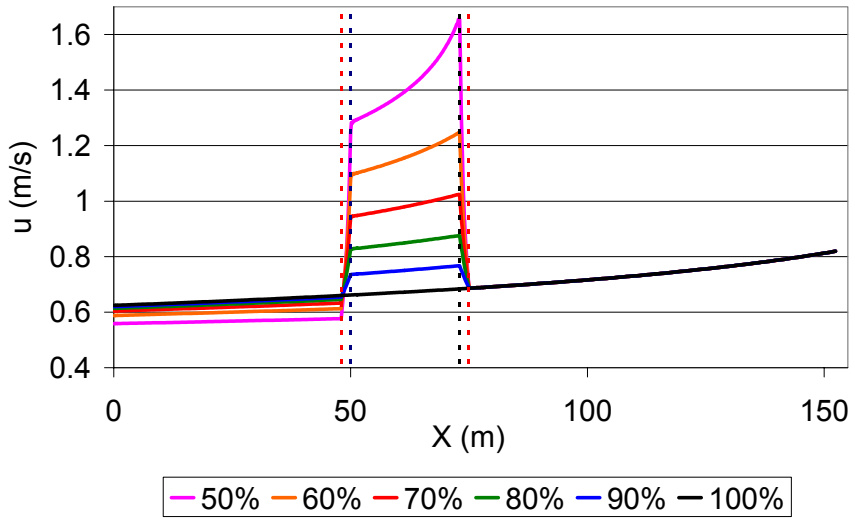


Figure 9 : influence de la porosité sur les vitesses

L'allure des deux graphes précédents montre la faible incidence de la porosité seule sur les hauteurs d'eau : une porosité de 50%, correspondant à une densité de végétation irréaliste en milieu naturel ne conduit qu'à une élévation de 8cm de la hauteur d'eau en amont de la zone de test. Une porosité plus réaliste, même pour une haie très dense, se situerait autour de 90%, auquel cas la variation de hauteur d'eau ne serait plus que de 1 cm.

La porosité a une incidence sur la vitesse d'écoulement, ce qui était à prévoir (elle équivaut à un rétrécissement de section de la zone d'étude), mais ne conduit là encore, dans le cas d'une porosité « réaliste » de 90%, qu'à une diminution de la vitesse d'écoulement amont de 0.1 m/s.

Parallèlement à l'analyse des hauteurs d'eau et des vitesses, la rugosité équivalente générée par cette porosité dans la zone d'étude a été calculée Tableau 3), à partir des variations de la ligne d'eau, permettant d'extraire ensuite un coefficient de Manning moyen ntot (comprenant la rugosité du fond et celle induite par la végétation), puis un Ks moyen (Ktot = 1/ntot) :

Tableau 3 : évolution de la rugosité avec la porosité

	1	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
n tot	0.030	0.030	0.030	0.030	0.031	0.032
K tot	33.0	32.9	32.9	32.9	31.5	31.2

Le tableau 3 et la Figure 10 mettent en évidence la faible incidence de la porosité sur le coefficient de Strickler :

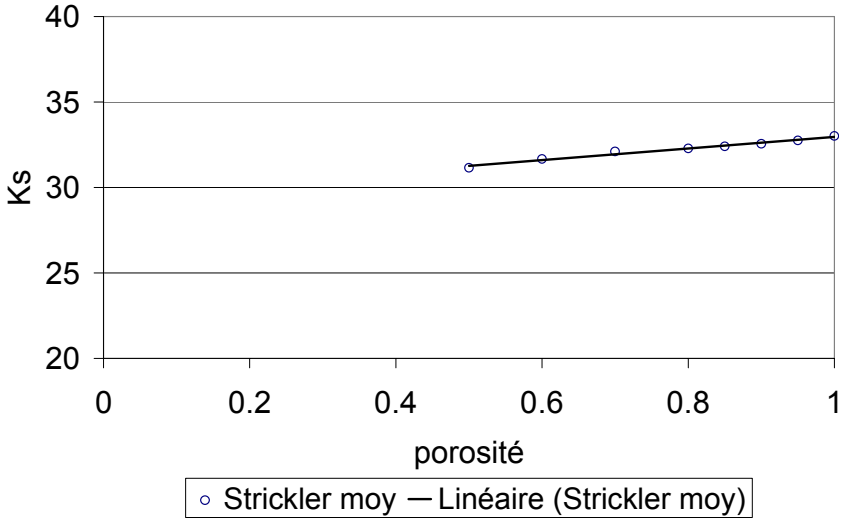


Figure 10 : relation affine coefficient de Strickler – porosité

L'augmentation de la porosité augmente peu (de l'ordre de 3.5%) la rugosité déjà présente sur le fond. On peut ainsi négliger l'effet de la porosité dans le modèle « haies », point important pour l'utilisation possible d'un code 1D qui ne prend pas en compte la porosité.

4.2.3 Représentation de la traînée

Une force de traînée a été introduite dans la zone d'étude pour simuler la présence de structures verticales (tiges).

- Le coefficient de traînée C_d a été fixé à 1.5, et le diamètre des cylindres à 0.01m.
- La densité de cylindres varie de 2 à 100 éléments/m².
- Le coefficient de traînée ayant été approximé, la densité de cylindres est finalement le seul paramètre qui a été modifié pour agir sur l'intensité de la traînée.
- La pente du canal est de 1.5 ‰.

Les figures Figure 11 Figure 12 présentent les variations de la hauteur d'eau et de la vitesse U dans le canal :

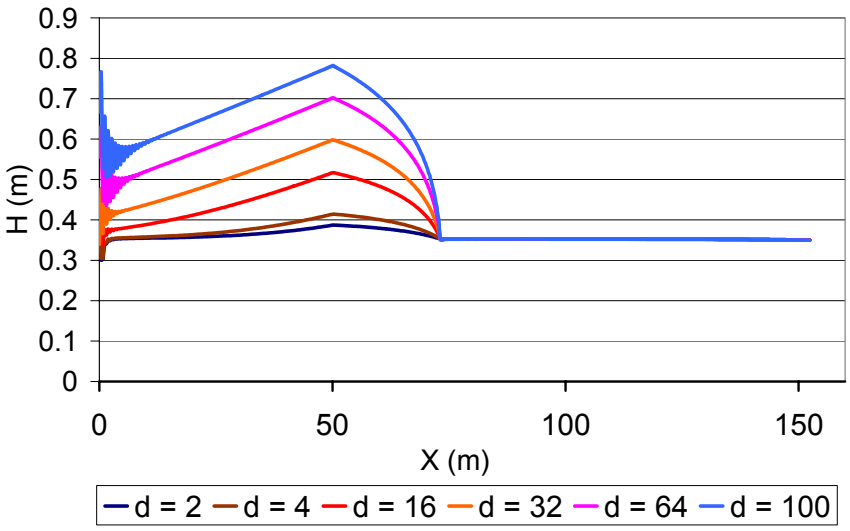


Figure 11 : influence de la densité de végétation sur les hauteurs d'eau

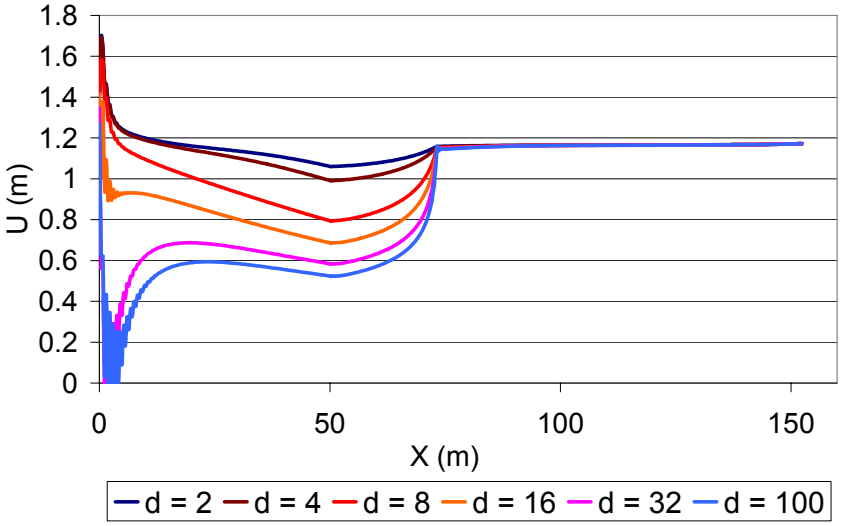


Figure 12 : influence de la densité de végétation sur les vitesses

Comme dans le cas étudié précédemment, on constate l'augmentation des hauteurs d'eau et la diminution des vitesses en amont de la zone de test. Le Tableau 4 synthétise les résultats obtenus de part et d'autre de la zone de test :

Tableau 4 : influence de la densité de végétation (éléments / m²)

	d2	d4	d8	d16	d32	d64	d100
ΔH (m)	0.03	0.06	0.10	0.16	0.24	0.34	0.41
DU (m/s)	-0.10	-0.16	-0.24	-0.34	-0.43	-0.50	-0.54

Les coefficients de Manning liés à ces différentes densités de végétation ont été comparés à ceux obtenus à partir de la ligne d'eau dans les tableaux 5-6 (Cd=1.5, D=0.01m) :

Tableau 5 : rugosité calculée à partir des caractéristiques végétales

rugosité calculée à partir des caractéristiques végétales					
h50	**d=r/A**	**nvég**	**Ksvég**	**ntot**	**Kstot**
	2				
0.41	4	0.03	32.54	0.04	23.3
0.46	8	0.05	21.57	0.06	18.1
0.52	16	0.07	14.04	0.08	12.9
0.60	32	0.11	9.01	0.12	8.7
0.70	64	0.17	5.72	0.18	5.6
0.78	100	0.23	4.26	0.24	4.2

Tableau 6 : rugosité calculée à partir de la ligne d'eau

rugosité calculée à partir de la ligne d'eau		
d=r/A	**ntot**	**Kstot**
2	0.04	27.20
4	0.04	23.59
8	0.05	19.20
16	0.07	14.64
32	0.09	10.73
64	0.13	7.65
100	0.16	6.09

La hauteur d'eau h50 utilisée pour le calcul du Manning dans le tableau du haut correspond à la hauteur d'eau dans l'axe du canal au point d'abscisse x = 50m, soit à l'entrée de la zone de test dans laquelle une force de traînée a été introduite.

Les coefficients de Manning calculés à partir des caractéristiques de la végétation et de la ligne d'eau sont très proches ; on peut attribuer les différences existantes à l'approximation due au choix de la hauteur d'eau h50 pour effectuer les calculs.

La Figure 13 montre l'évolution de la rugosité (calculée à partir de l'étude de la ligne d'eau ou des caractéristiques végétales) en fonction de la densité de végétation :

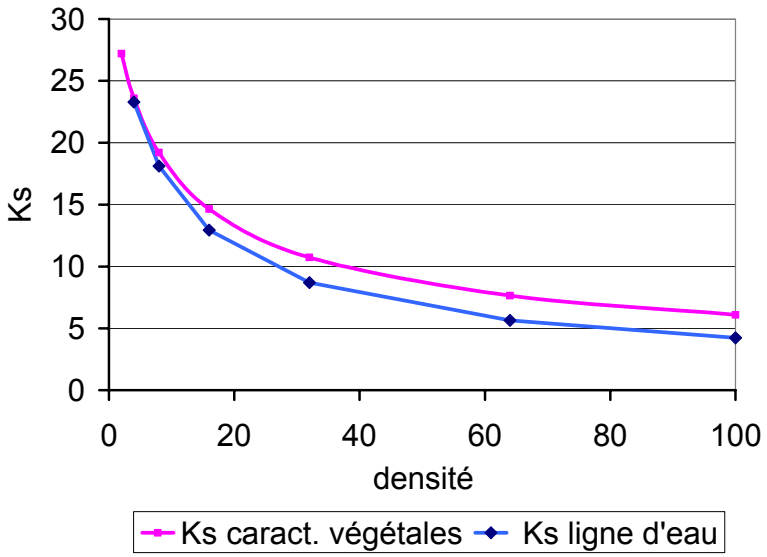


Figure 13 : évolution de la rugosité avec la densité de végétation

L'augmentation de la rugosité avec la densité de végétation est ainsi mise en évidence, ainsi que la bonne concordance des rugosités équivalentes obtenues par les deux méthodes.

Cette concordance montre que la modélisation de végétation par adjonction de forces de frottement est une approximation raisonnable permettant, par exemple, d'utiliser des codes de calculs 1D, beaucoup moins consommateurs de temps calcul et permettant de multiplier les simulations sur des zones spatialement étendues.

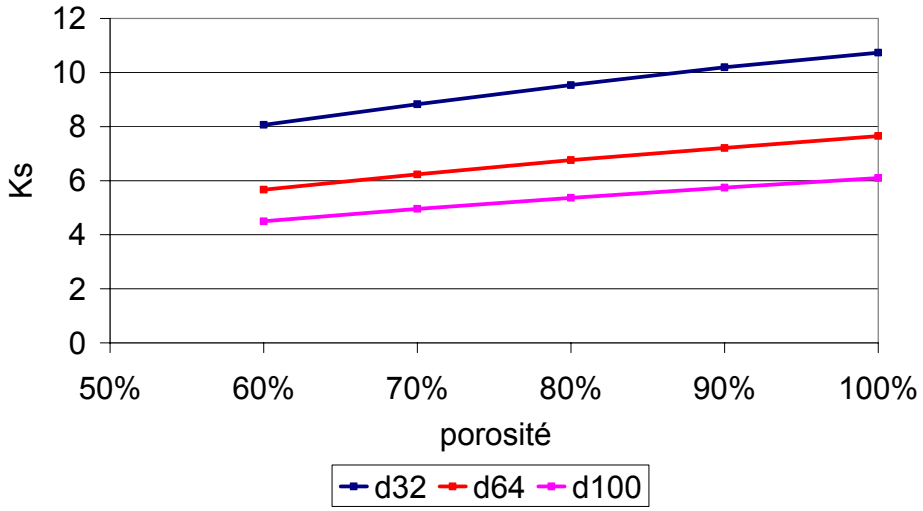


Figure 14 : composition densité de végétation - porosité

5 HAIES EN REGIME INSTATIONNAIRE SUR UN TRONÇON TYPE

5.1 Le modèle 2D

L'application des résultats précédents a été appliquée à la propagation d'un hydrogramme de crue type sur un tronçon de 5 kms représentant de façon très schématique par une forme trapézoïdale le lit de la Lèze dans sa partie amont. Le modèle a été développé sous Telemac2D. Le profil en travers (Figure 15) comporte un lit mineur et un lit majeur pour étudier les débordements. Le choix de la longueur du tronçon a été dicté par les temps calculs nécessaires en 2D mais cette longueur est suffisante pour permettre une comparaison entre résultats 1D et 2D.

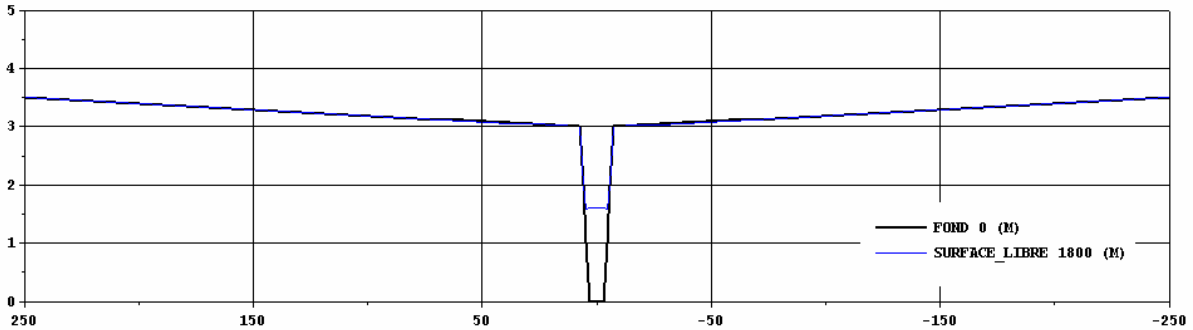


Figure 15 – Profil en travers de la section type

Caractéristiques du modèle :

- Longueur : 5000m
- Largeur totale : 500m
- Largeur du lit mineur : 6m (15m entre berges)
- Pente des versants du lit majeur : 2/1000

- Pente longitudinale : 1.5/1000

Un premier calcul a été réalisé sans insertion des haies. Les haies ont été implantées tous les 500m sur le lit majeur, perpendiculairement au lit mineur. La méthode utilisée est celle d'une augmentation locale de rugosité : le coefficient de Strickler initial caractérisant le fond du lit mineur et le lit majeur est fixé à Ks=33 (voir tableau des Manning HEC-RAS en Annexe 1).

Sur les bandes à rugosités modifiées simulant les haies, le coefficient de Strickler a été fixé à Ks=5. Pour permettre la comparaison 2D-1D et étant donné la faible incidence constatée au paragraphe 4.2.2 de la diminution de porosité sur l'écoulement, cette dernière n'est pas modifiée ici au passage des haies. On notera que la largeur des bandes de haies est de 20m alors que les spécifications du SMIVAL portent sur des largeurs de 5 m. Il s'agit ici de réaliser une référence de calage du modèle et la reproduction de haies de 5m conduirait à des tailles de mailles de moins de 1m, tailles préjudiciables au temps de calcul.

Le maillage utilisé est non structuré en lit majeur et réglé sur le lit mineur (Figure 16Figure 17) et densifié au niveau des haies, et comporte 71600 mailles.

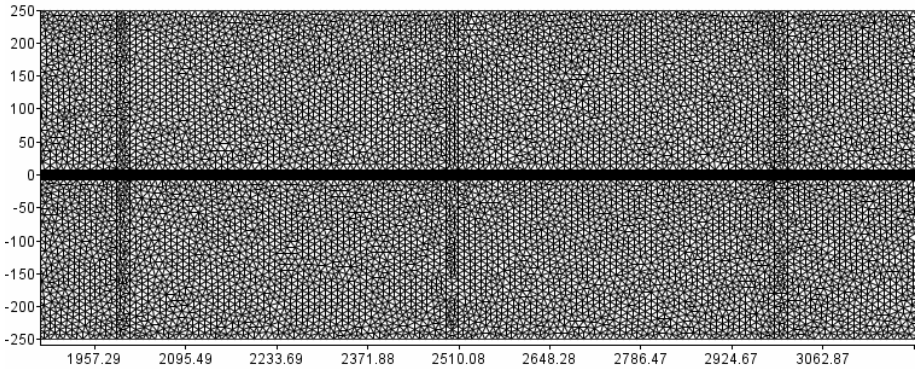


Figure 16 : maillage du modèle avec haies symétriques

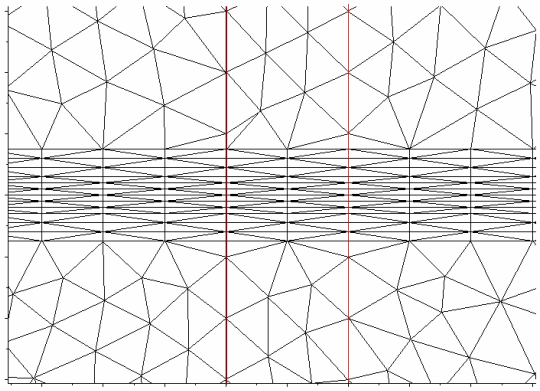


Figure 17 : détail du maillage réglé dans le lit mineur au droit d'une haie

Un calcul instationnaire avec un pas de temps de 0.5s a été lancé avec pour condition limite amont un hydrogramme de crue type (Figure 18-A) et une condition aval de type régime uniforme (hauteur normale) (Figure 18-B)

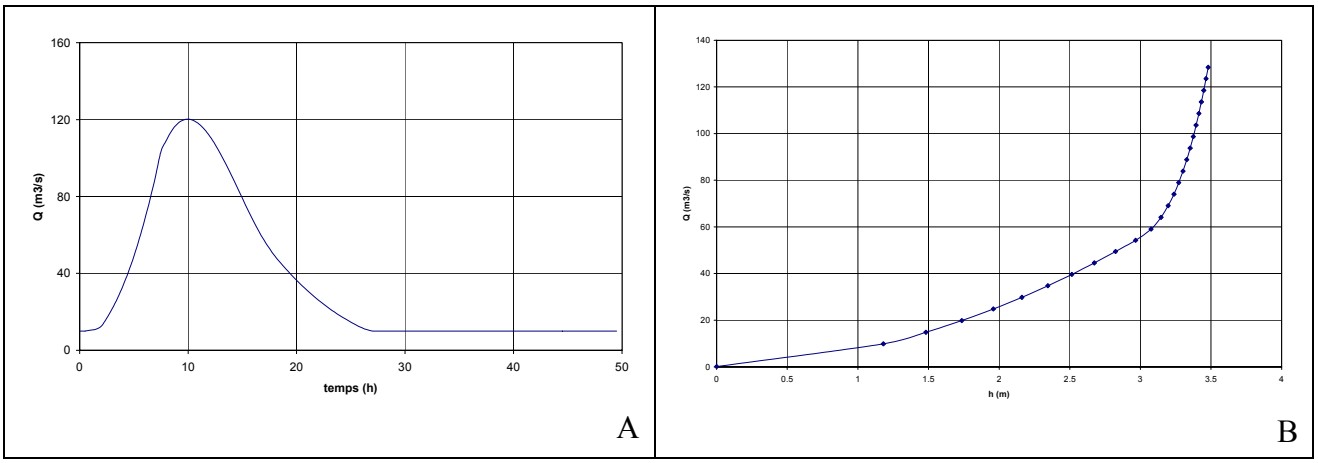


Figure 18 : Hydrogramme amont (A) – loi de tarage section aval (B)

Cet hydrogramme (figure A) atteint à l'entrée du modèle et au temps t=10h le débit maximal Q=120 m^3/s relevé à Lézat sur Lèze lors de la crue de juin 2000. Il s'agit donc d'une crue de même amplitude que celle de 2000 mais plus rapide dans le but de réduire les temps de calcul en 2D.

5.2 Résultats

La Figure 19 montre les cartes en plan des hauteurs d'eau dans le lit majeur[1] et vitesses longitudinales à t=10h (pic de crue amont), pour le cas sans haies et avec haies implantées symétriquement sur les deux rives tous les 500m. L'atténuation des vitesses à l'aval du canal correspond à la condition limite aval basée sur la calcul du débit en fonction de la cote de la surface libre, la répartition des vitesses étant uniforme au lieu d'être « libre » comme pour tout nœud intérieur au domaine de calcul. Ce choix ne modifie pas la valeur du débit total à travers la section aval et donc l'hydrogramme.

Une représentation des cartographies des hauteurs d'eau et des vitesses est présentée en Figure 20.

[1] La charte couleur de la palette a été ici limitée à 0.6m pour rendre compte des différences de hauteurs en li majeur

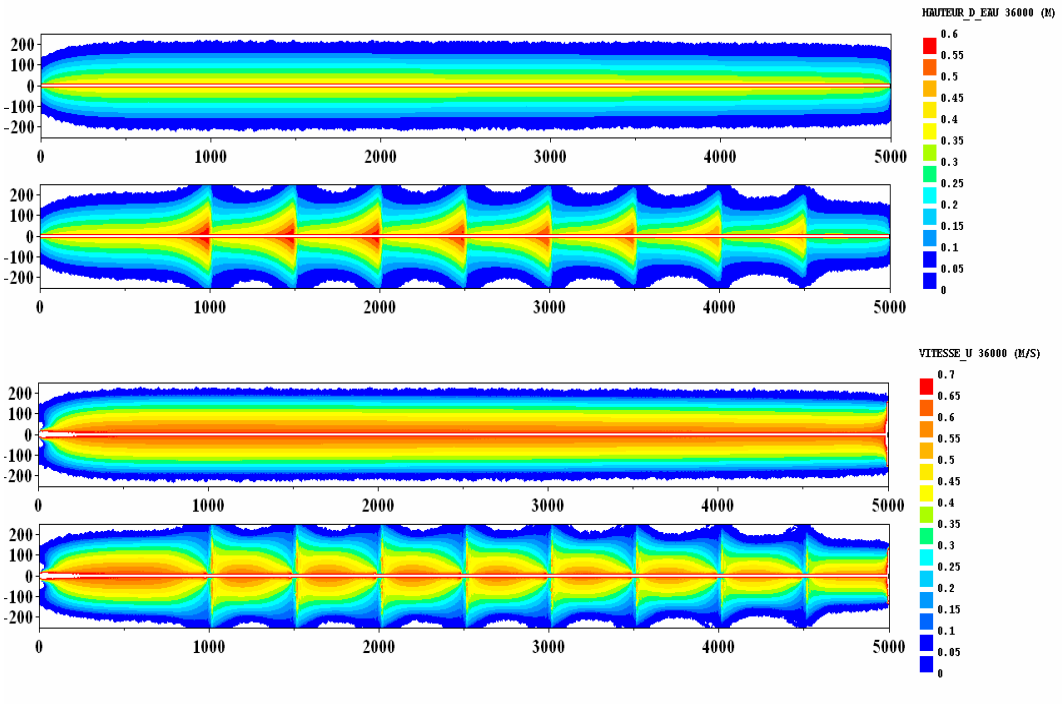


Figure 19 : hauteurs d'eau dans le lit majeur et vitesses longitudinales sans et avec haies

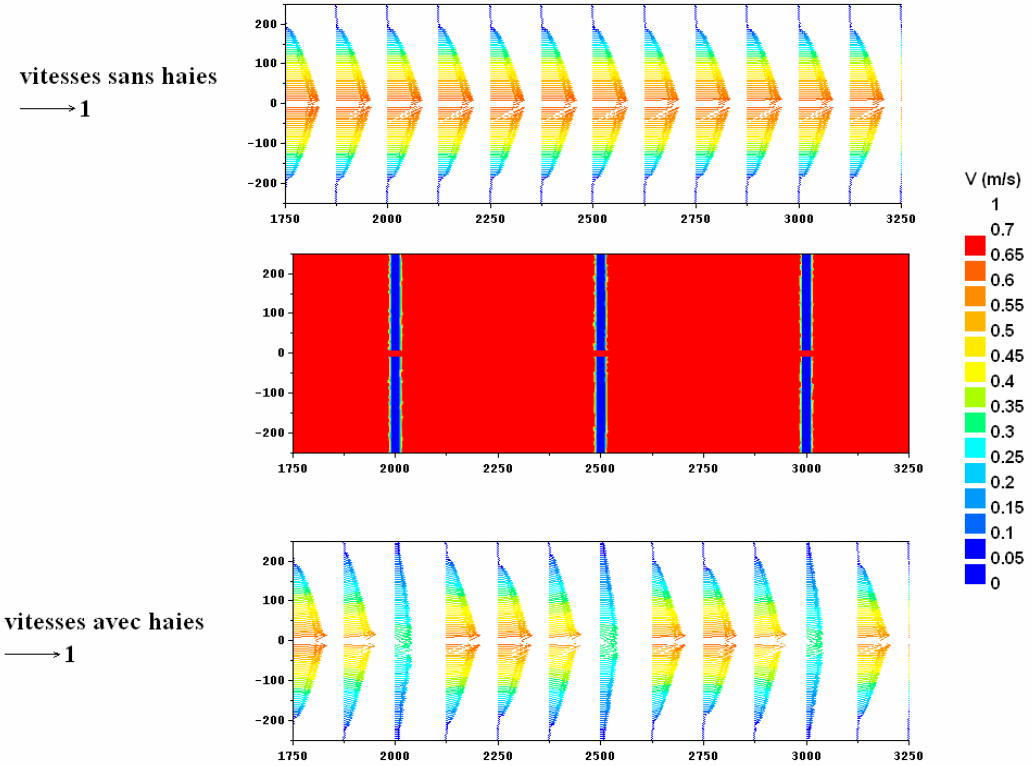


Figure 20 : Vitesses sans/avec haies (vecteurs)

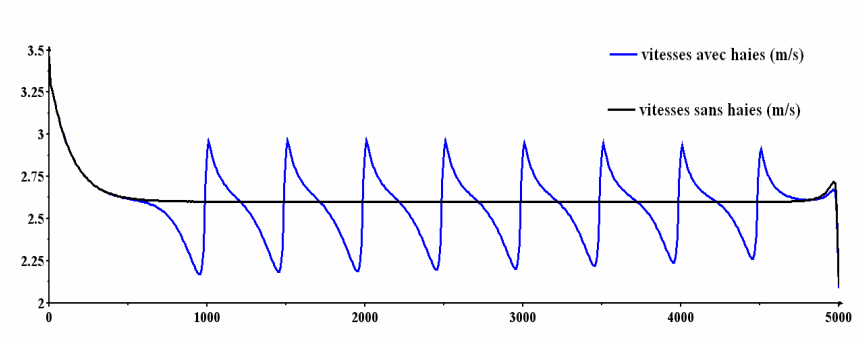


Figure 21 : évolution de la vitesse (coupe longitudinale au centre du lit mineur)

L'allure du champ des vitesses (Figure 21) montre l'effet local ralentisseur des haies sur l'écoulement en lit majeur, accompagné d'une augmentation des vitesses en lit mineur.

La Figure 22 présente un agrandissement de l'allure de la surface libre dans les lits mineur et majeurs au passage d'une haie, pour des haies symétriques de 20m espacées de 500m.

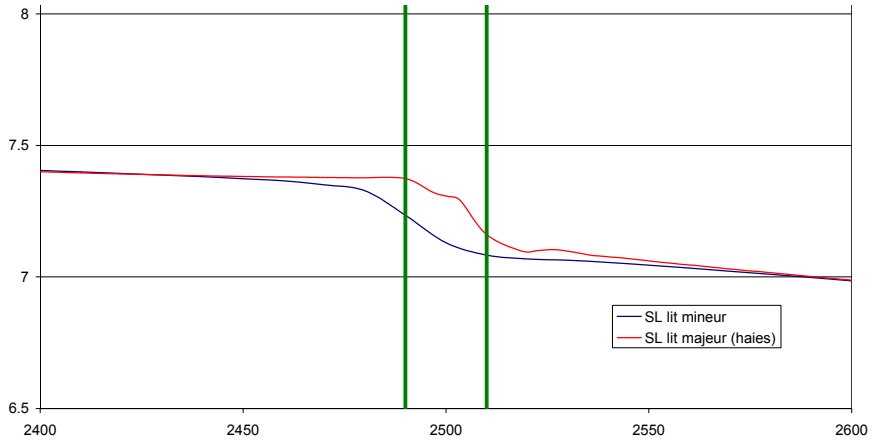


Figure 22 : allure de la surface libre au passage d'une haie (agrandissement)

L'écart au temps de passage du pic de crue constaté avec et sans haies est de 21 minutes (Figure 23) pour un temps de propagation du pic de crue de 2 heures environ et pour des haies de 20m d'épaisseur et espacées de 500m.

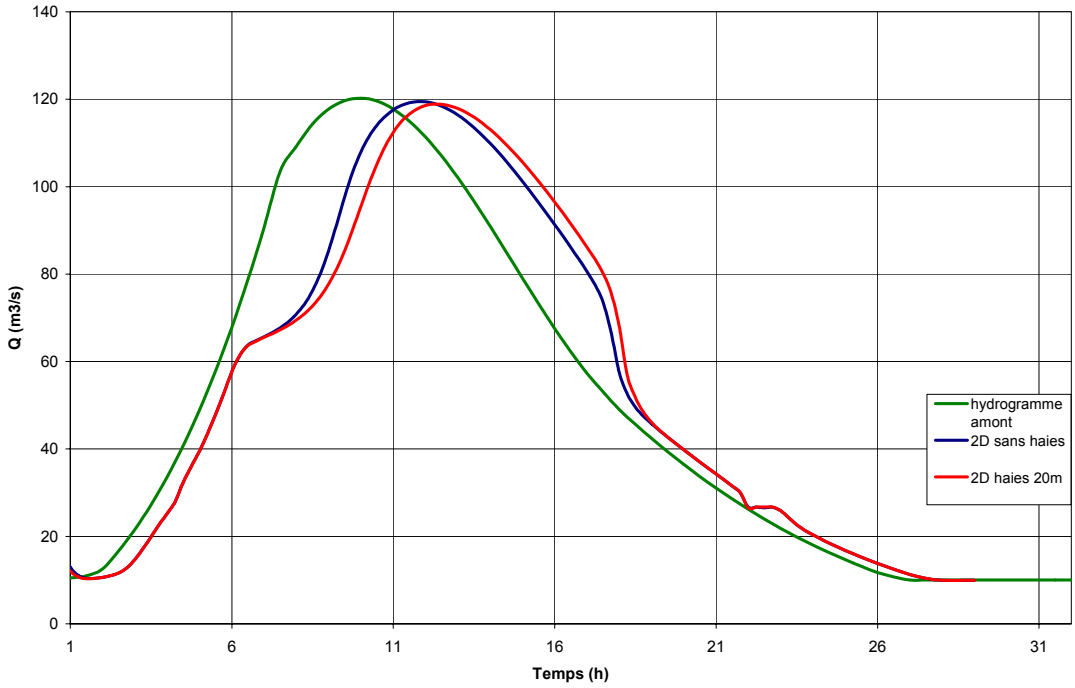


Figure 23 : Hydrogrammes amont et aval avec et sans haies

Un calcul 2D a été réalisé en représentant les haies distantes de 1000m et de 500m comme des digues imperméables et insubmersibles. Le détail des résultats est fourni en annexe 3 et ceux-ci montrent que le retard maximal au pic de crue d'un dispositif de freinage sous forme de casiers en lit majeur communiquant par une brèche située au droit du lit mineur est d'environ 3 heures pour les épis à 1000m et de 5 heures pour 500m.

5.3 Le modèle 1D

Dans le but de pouvoir substituer aux calculs 2D ne permettent pas d'envisager des simulations de longue durée (les derniers calculs effectués dans Telemac duraient environ 7h sur un serveur de calcul en utilisant 8 processeurs en parallèle) des calculs 1D, il était nécessaire de comparer les résultats de Telemac2D à ceux du code 1D HEC-RAS.

5.3.1 Modèle numérique

La géométrie est la même que celle employée précédemment sous Telemac et correspond au profil en travers type (Figure 24) reproduit sur le tronçon de 5km avec un espacement de 100 m entre profils suivant la pente longitudinale de 0.0015.

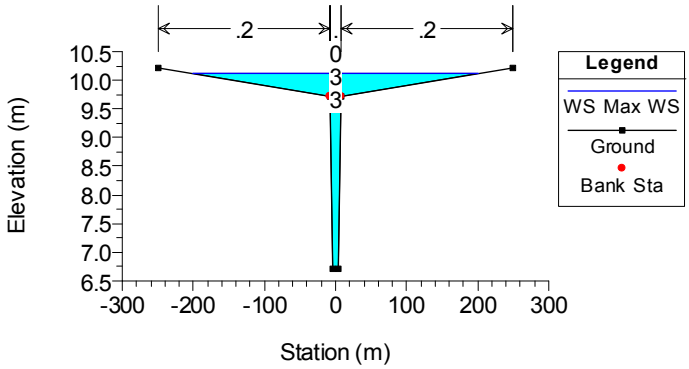


Figure 24 : section avec présence de haies sur les deux rives

Le coefficient de Manning, caractérisant la rugosité du fond (lit majeur et mineur), est fixé à 0.03 (Ks=33) – voir Annexe 2.

Pour reproduire les « haies » sur le lit majeur (Figure 25), ont été introduites dans le modèle des « bandes de rugosité » (Ks=5) distantes de l'emprise de la haie (20m pour le calage) encadrées par 2 profils de proximité[2] à rugosité (Ks=33). Ainsi, 8 haies de 20m d'épaisseur espacées de 500m ont été représentées entre les abscisses X = 4000m et X = 500m. On notera (Figure 26) que 4 sections de calcul sont utilisées pour chaque haie afin de limiter la zone d'influence du changement de rugosité soit deux sections centrales espacées de 5m (la largeur de la haie) à Manning 0.2 et encadrées par 2 sections distantes de 5m mais à Manning 0.03.

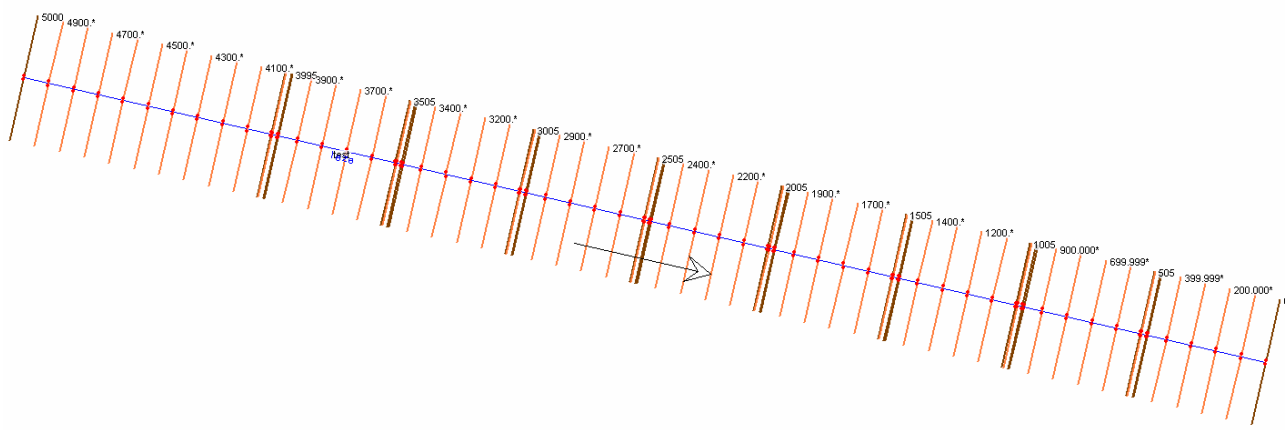


Figure 25 : vue globale du modèle avec les haies

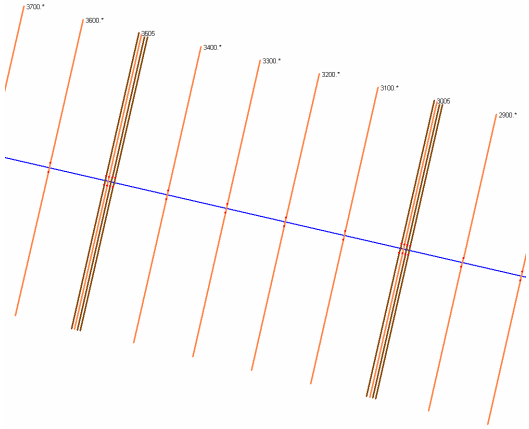


Figure 26 : modélisation des haies (détail des sections haies)

Pour comparaison avec Telemac ont été effectuées les simulations suivantes:

- pas de haies (rugosité uniforme)
- haies de 20m d'épaisseur sur les deux rives.

L'hydrogramme type a été imposé en amont du tronçon. La condition limite aval correspond au régime uniforme pour I=0.0015. Ces conditions sont représentées sur la Figure 18.

Les vitesses d'écoulement et débits des 2 configurations ont été calculés au temps t=10h après le début de la crue (pic de crue).

[2] Ces profils évitent de propager l'effet de rugosité des haies aux sections distantes de 100m.

5.3.2 Vitesses et lignes d'eau

La Figure 27 représente les profils de vitesses lit mineur et lit majeur au temps t=12h15' soit au maximum de la crue en aval. Dans la représentation HEC-RAS l'origine de l'axe des abscisses 0 correspond à l'aval du modèle.

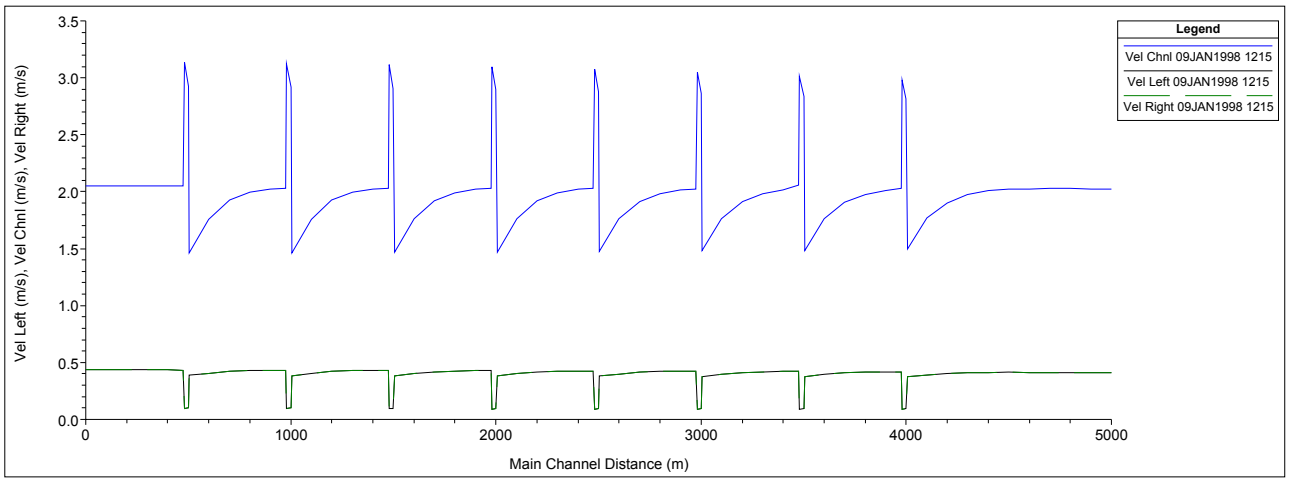


Figure 27 : évolution des vitesses en lits mineur et majeur

Les vitesses dans le lit mineur diminuent à l'amont immédiat de la zone d'entrée de la haie (de 2m/s à 1.45m/s pour augmenter sur 5m à 2.9m/s (début haie) à 3.1m/s (fin haie 20m plus loin) et repasse à 2m/s sur 5m en aval. Ces variations brusques justifient la prise en compte de coefficients de contraction/expansion exposée plus haut. En lit majeur, on relève une diminution locale de la vitesse de 0.40m/s à 0.1m/s au passage de la haie.

Remarque importante : il s'agit d'un code 1D et non 2D ce qui implique que la distribution des vitesses est faite par le code basée sur les rugosité du fond et en partant de l'hypothèse de la constance sur la section en travers de la cote de la ligne d'énergie. Ceci explique les différences relevées entre les codes 1D et 2D, ce dernier étant évidemment plus physique.

la Figure 28 montre le profil en long de la surface libre à t=12h15' avec remontée locale de celle-ci à l'approche des haies et abaissement au passage. En 1D, la cote de la surface libre est identique sur tout le profil en travers.

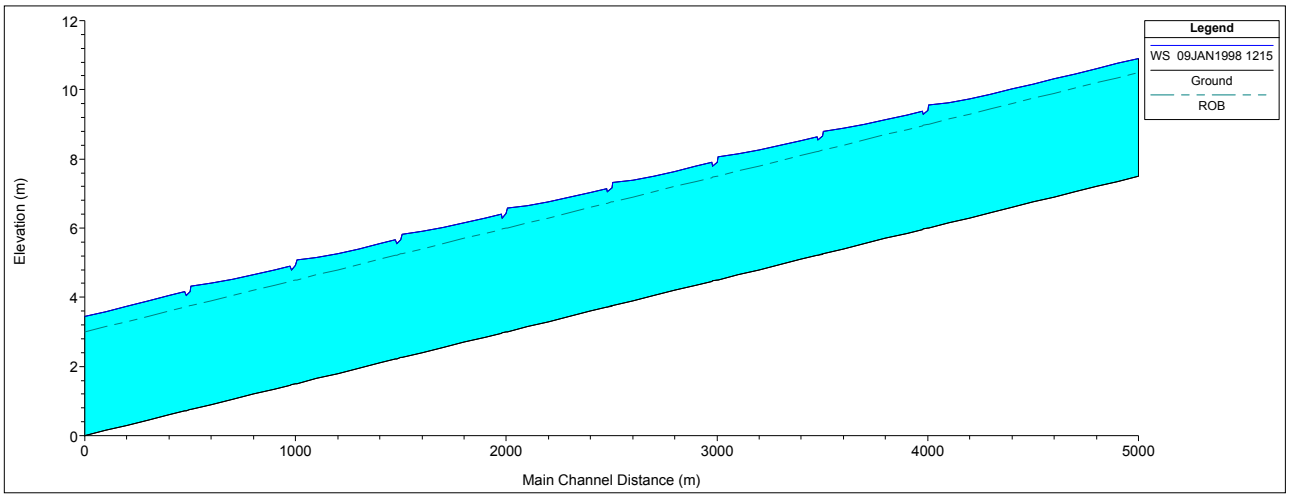


Figure **28** *: Allure de la ligne d'eau au paroxysme de la crue, la ligne pointillée correspond à la berge*

6 COMPARAISON DES RESULTATS 2D-1D

Compte tenu des différences conceptuelles liées à la nature des deux modèles, la seule comparaison faisant foi pour notre étude est celle des hydrogrammes aval sur notre tronçon test.

La Figure 29 représente les résultats des simulations et montre que les résultats sont proches à première vue à l'exception de la phase de débordement qui diffère entre le 1D et le 2D : le 1D montre un palier de débit à 58 m3/s mais rejoint les valeurs du 2D vers t=9h.

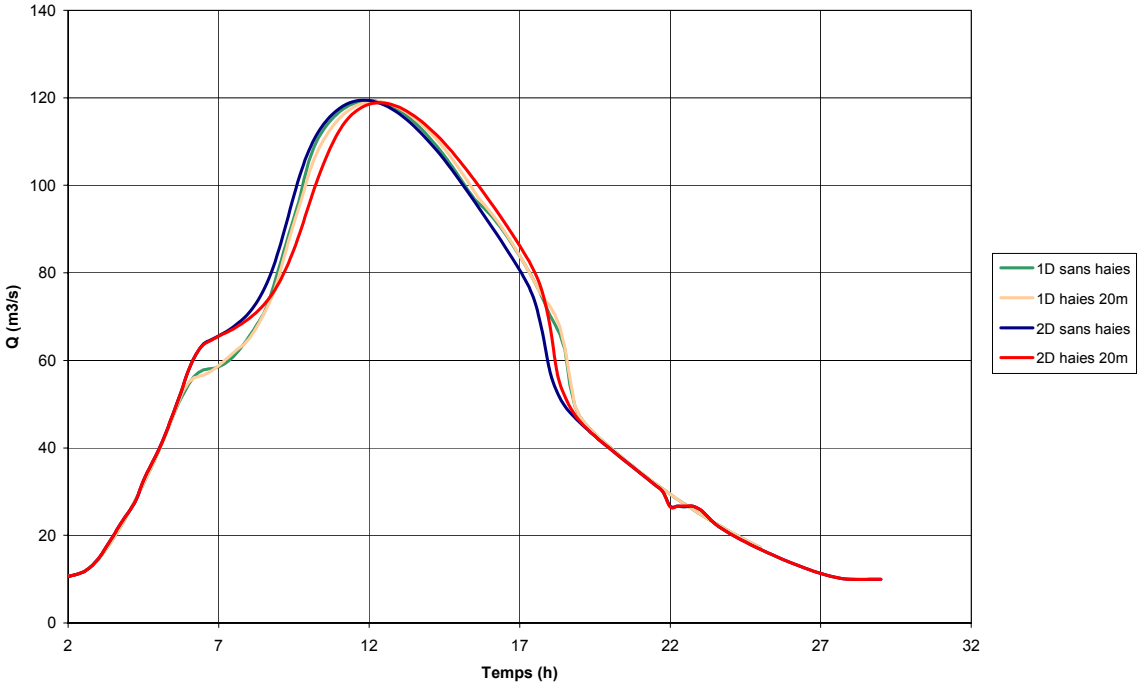


Figure 29 : Hydrogrammes à l'aval

Toutefois, un agrandissement des courbes au niveau du pic de crue permet de constater les points suivants (Figure 30) :

- sans haies, le pic 2D survient à t=11.9h soit en avance de 0.1h = 6 minutes par rapport au 1D ;
- avec les haies le pic 2D est obtenu à t=12.25h soit un Dt = 0.35h = 21 minutes généré par les haies ;
- pour le 1D le pic est obtenu à t=12.25h soit un Dt= 0.25h = 15 minutes ;
- l'amplitude des pics de crue n'est quasiment pas diminuée avec ou sans haie : les haies n'ont pas d'effet amortissement pour la crue.

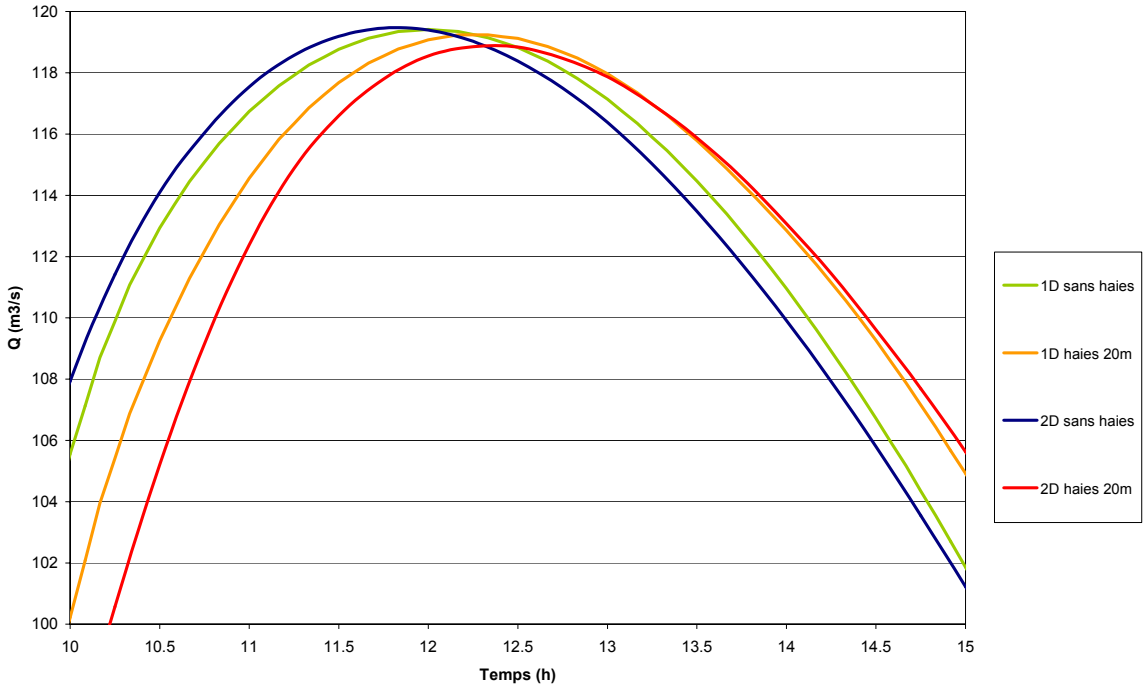


Figure 30 : Détail du pic de crue

En résumé, le code 1D ne permet pas de retrouver sur 5 kms le même écart sur le pic de crue que le 2D. Toutefois, le retard de 6 minutes entre les deux prévisions de passage de pics va dans le sens de la sécurité si l'on considère que les hypothèses prises lors de la modélisation des haies correspondent à des plantations très denses (au-delà des plus fortes valeurs K=7 testées par (Freeman et al. 2000). Dans tous les cas, ce type de modélisation correspond aux limites des modèles tant au niveau des hypothèses sur les effets des feuillus que de la précision des résultats numériques. Nous avons tenté de maximiser, tout en restant réalistes, l'effet des haies.

Le paragraphe suivant donne les résultats d'une simulation 1D sur une distance de l'ordre du bassin de la Lèze.

7 EFFET DES HAIES SUR UN TRONÇON DE GRANDE LONGUEUR

La bonne concordance des temps d'arrivée du pic de crue et sa valeur entre les modélisations sans et avec haies pour les codes 1D et 2D nous permet de poursuivre par une simulation 1D sur un tronçon de 40 kms, ce qui serait inenvisageable en 2D. Il s'agit d'évaluer l'effet cumulatif des haies sur l'hydrogramme aval pour un linéaire de rivière similaire à celui de la Lèze. Les hydrogrammes sont donnés sur la Figure 31.

Etant donné le nombre de haies à représenter (80 haies soit 320 sections ...),il a été nécessaire de générer les profils en travers au format HEC-RAS par programmation Fortran.

Le retard au passage du pic de crue sur un temps de propagation de environ 18 heures est de 1h40' pour des haies disposées de part et d'autre du lit mineur et espacées de 500m (Figure 32). L'atténuation de l'amplitude du pic de crue est inférieure à 1 m^3/s.

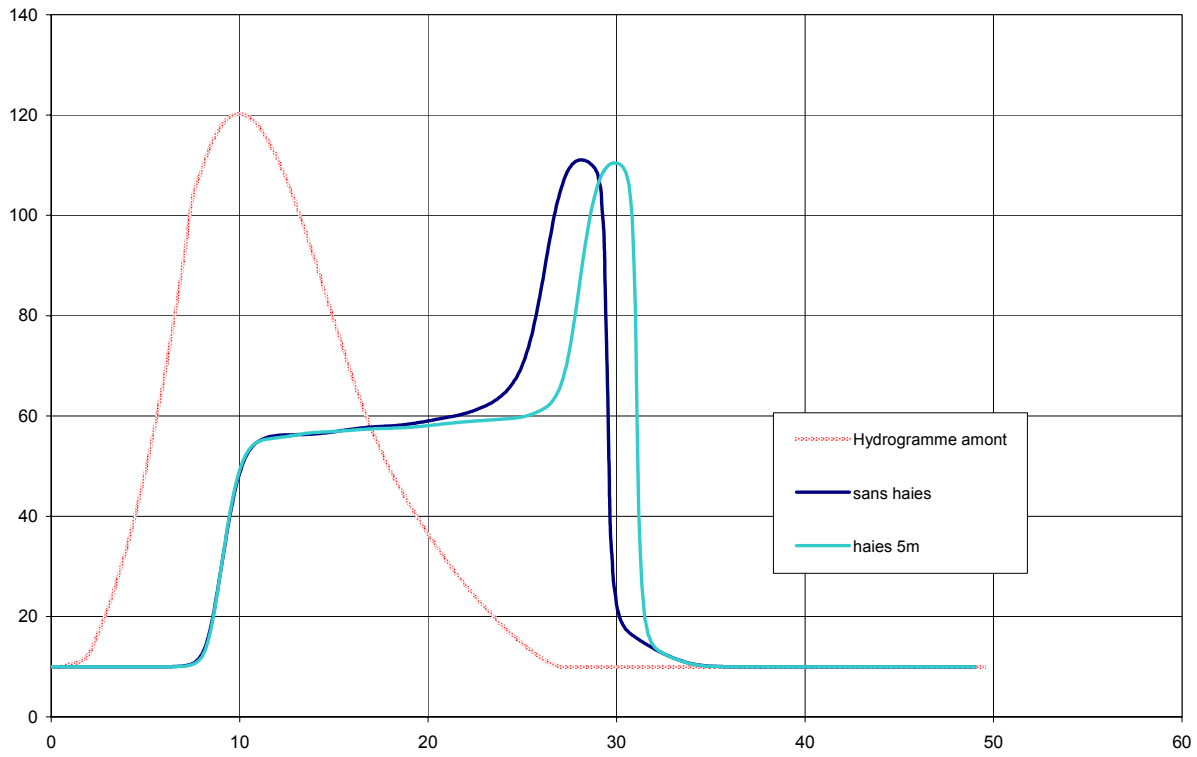


Figure 31 : Hydrogrammes amont et aval (40 kms)

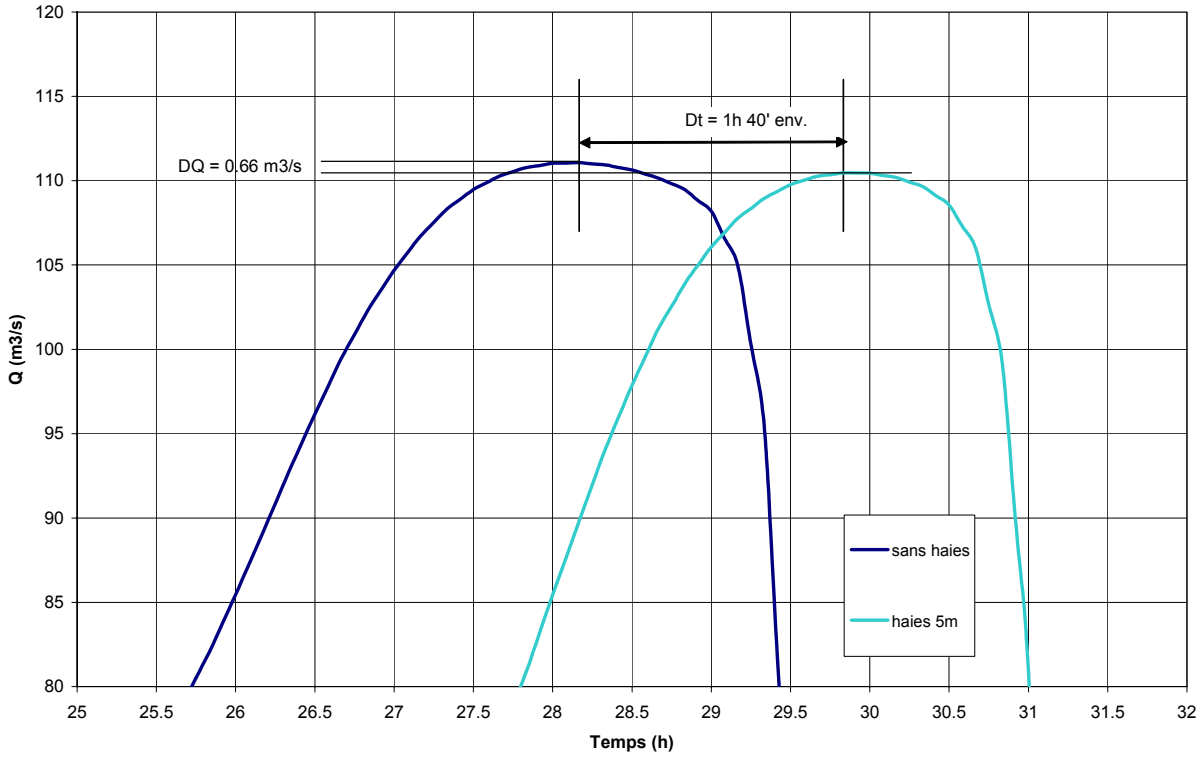


Figure 32 : Ecarts de temps et de débit des pics de crue

8 CONCLUSION

Cette étude s'appuie sur une modélisation simplifiée de l'implantation de haies dans le lit majeur d'une rivière. On ne cherche donc qu'à comprendre l'effet de ces haies sans chercher à reproduire la réalité dans toute sa complexité. Cependant, la méthode préconisée et les tendances que l'on dégage doivent permettre à un bureau d'études de finaliser l'utilisation des haies et leur répartition spatiale sur un cours d'eau en fonction des objectifs de ralentissement dynamique désirés.

L'étude permet de préciser l'influence de plantations de haies de forte densité en lit majeur sur le ralentissement dynamique des crues. Le recours à deux types de modélisations : 2D, plus physique, et 1D, beaucoup plus rapide, a permis, compte-tenu des incertitudes liées à la complexité du problème, et de la représentation de l'intéraction fluide-structures végétales, d'obtenir des résultats comparables au niveau de l'hydrogramme par les deux méthodes.

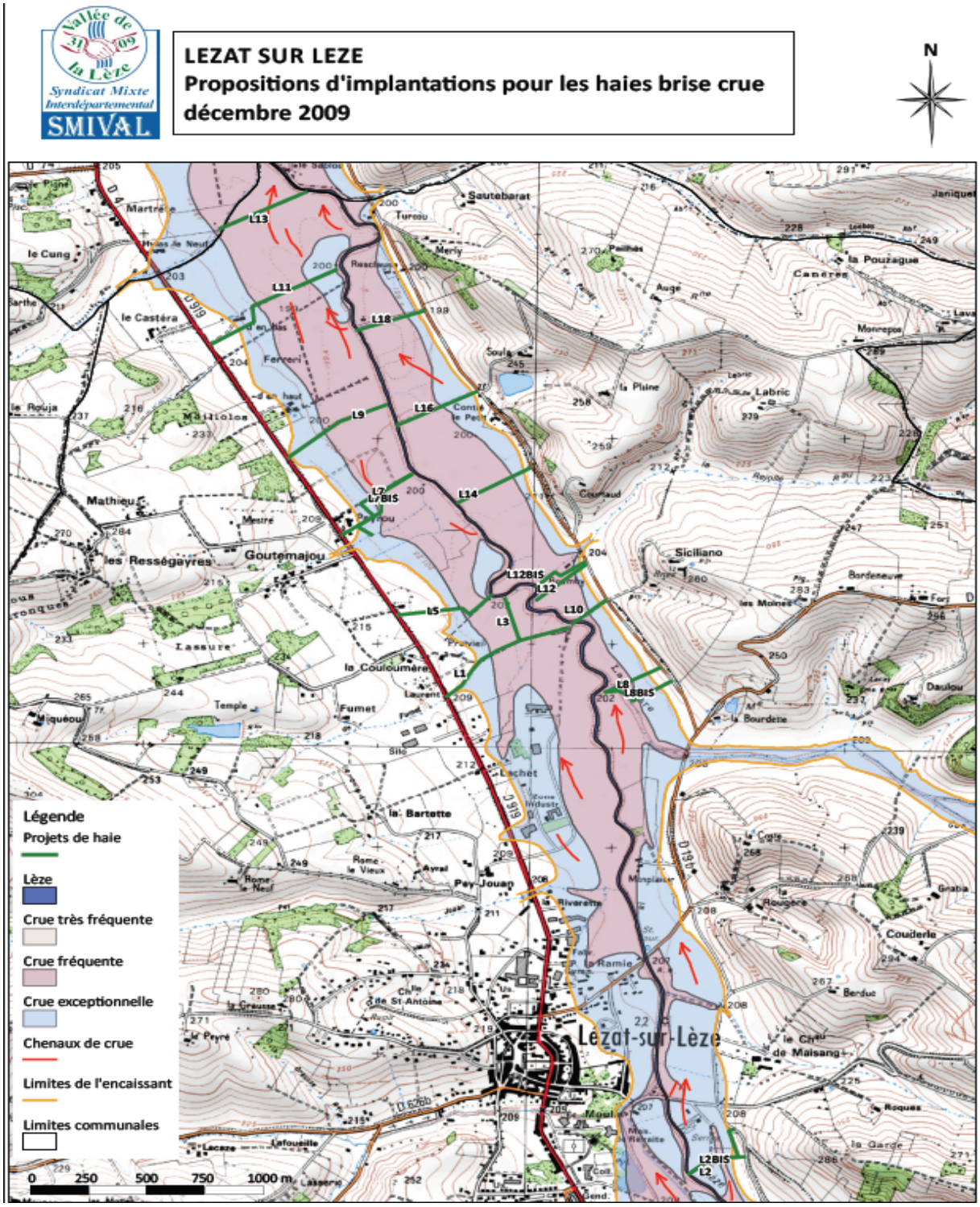
L'utilisation d'une majoration locale de la rugosité du fond en vue de représenter les haies a été validée. La valeur du coefficient de rugosité (K=5) a été déterminée à partir des données bibliographiques dans le but d'atteindre un effet maximal (choix d'une forte densité).

Nous observons sur un tronçon de 40km pour des haies denses de 5m d'épaisseur espacées de 500m, un retard du pic de l'hydrogramme d'environ 2 heures sur un temps de propagation de 18 heures et un écrêtement de $1m^3/s$ sur $100m^3/s$. L'augmentation exacte du temps de propagation pourrait être obtenue en appliquant les résultats de cette étude à une modélisation de rivière plus réaliste et pour des crues plus ou moins débordantes. Une intégration de données LIDAR du cours de la Lèze et des observations in situ devrait permettre de préciser l'effet des haies.

Par ailleurs, l'utilisation de haies réparties sur la partie amont du bassin versant peut déphaser les hydrogrammes de sous-bassins versants. La combinaison de ces déphasages conduit, en général, à une atténuation des effets d'une crue. Seule une étude dédiée du bassin peut permettre d'éviter une concomitance néfaste des déphasages.

Annexes

Annexe 1 : proposition d'implantation de haies brise crue à Lézat sur Lèze (les haies sont représentées en vert sur le document)



Annexe 2 : Tableau des Manning d'après HEC RAS – Reference guide

Type of Channel and Description	Minimum	Normal	Maximum
A. *Natural Streams*			
1. **Main Channels**			
a. Clean, straight, full, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.033
b. Same as above, but more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
c. Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
d. Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
e. Same as above, lower stages, more ineffective slopes and sections	0.040	0.048	0.055
f. Same as "d" but more stones	0.045	0.050	0.060
g. Sluggish reaches, weedy. deep pools	0.050	0.070	0.080
h. Very weedy reaches, deep pools, or floodways with heavy stands of timber and brush	0.070	0.100	0.150
2. **Flood Plains**			
a. Pasture no brush			
1. Short grass	0.025	0.030	0.035
2. High grass	0.030	0.035	0.050
b. Cultivated areas			
1. No crop	0.020	0.030	0.040
2. Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. Mature field crops	0.030	0.040	0.050
c. Brush			
1. Scattered brush, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. Light brush and trees, in summer	0.040	0.060	0.080
4. Medium to dense brush, in winter	0.045	0.070	0.110
5. Medium to dense brush, in summer	0.070	0.100	0.160
d. Trees			
1. Cleared land with tree stumps, no sprouts	0.030	0.040	0.050
2. Same as above, but heavy sprouts	0.050	0.060	0.080
3. Heavy stand of timber, few down trees, little undergrowth, flow below branches	0.080	0.100	0.120
4. Same as above, but with flow into branches	0.100	0.120	0.160
5. Dense willows, summer, straight	0.110	0.150	0.200
3. **Mountain Streams, no vegetation in channel, banks usually steep, with trees and brush on banks submerged**			
a. Bottom: gravels, cobbles, and few boulders	0.030	0.040	0.050
b. Bottom: cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070

HEC RAS –Reference guide copy from p 3-14
values issued from (Chow 1959)

Annexe 3: Test d'épis imperméables et insubmersibles sur TELEMAC2D

Il s'agit là de tests extrêmes qui ont pour objet d'évaluer le ralentissement maximal basé sur la création de casiers inter épis dans le lit mineur. Deux espacements ont été modélisés : épis à 1000 m de distance et à 500m.

Le modèle à 500m est représenté sur la Figure 33.

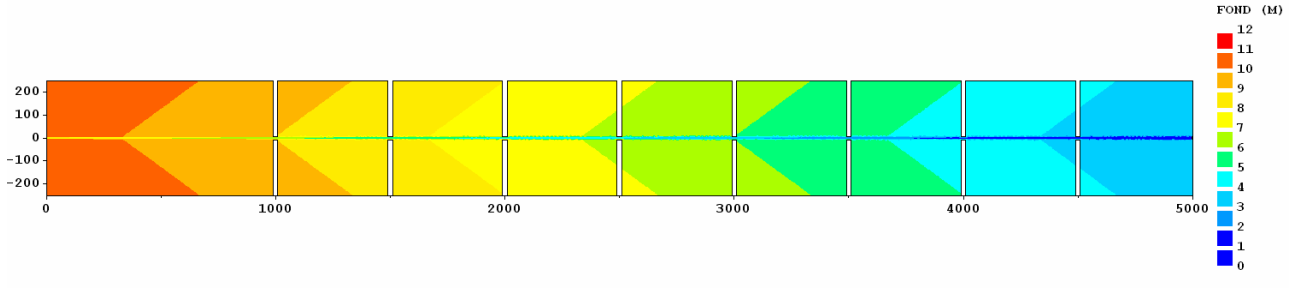


Figure 33 : modèle rivière avec épis insubmersibles

Au temps t=10h soit au paroxysme de la crue, le champ des vitesses ( ) khjj.

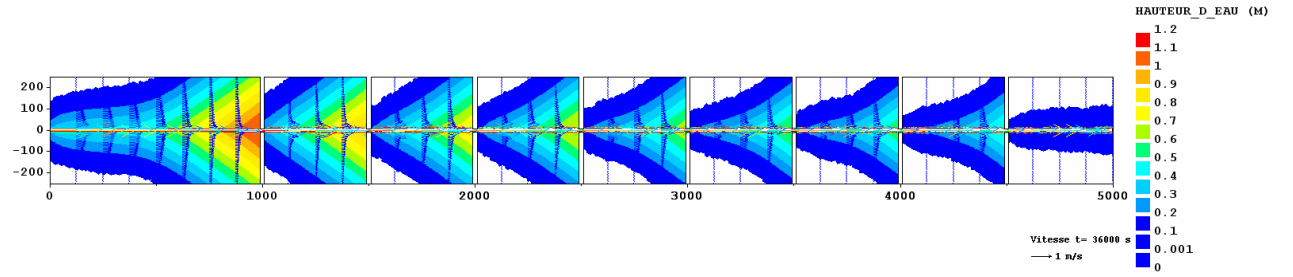


Figure 34 : champ des hauteurs d'eau et profils de vitesses

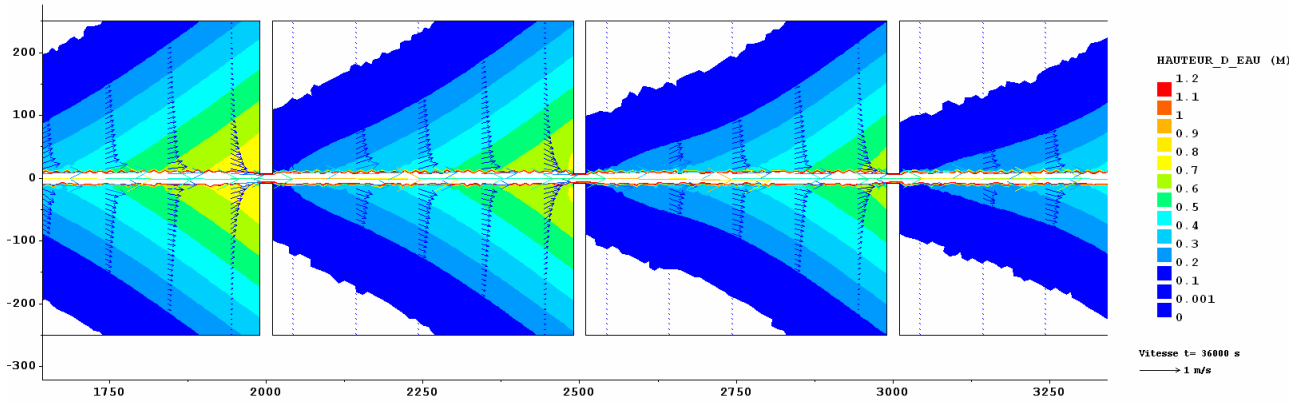


Figure 35 : détail

Les calculs sont longs car les instabilités numériques constatées particulièrement pour un espacement de 500m nécessitent l'utilisation de pas de temps de calcul très petits (0.1s et même 0.05s). Le calcul complet de la crue pour 500m est de 1 jour 10h sur station de travail à 8 processeurs en parallèle !

Les hydrogrammes à l'aval sont représentés sur la Figure 36 – Effet des épis

Les décalages des temps de passage des pics de crue sont d'environ 3 heures pour les épis à 1000m et de 5heures pour 500m. L'amortissement, quant à lui, est de 10/120 m^3/s et 13/120 m^3/s.

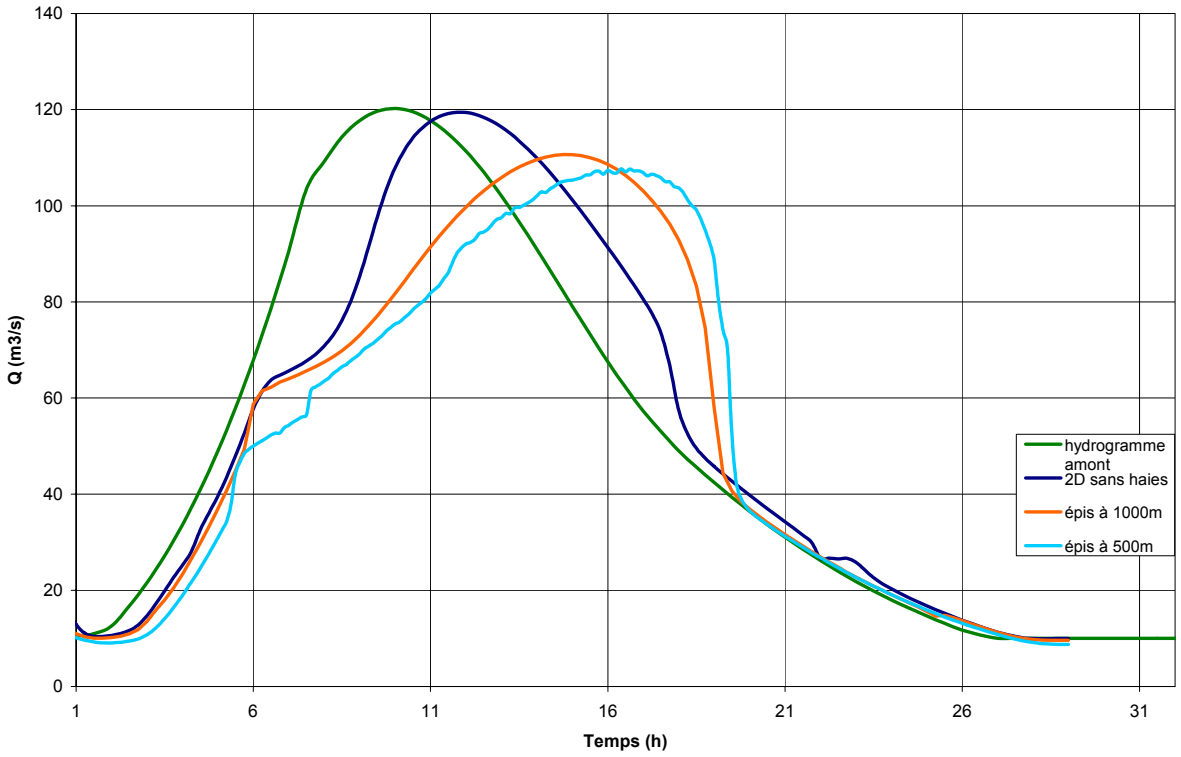


Figure 36 – Effet des épis

Références bibliographiques

Citées dans le document

Chow, V. T. (1959). Open-channel Hydraulics, Mc Graw-Hill, New-York, USA.

Cowan, W. L. (1956). "Estimating hydraulic roughness coefficients." Agricultural Engineering, 37(7), 473-475.

Dalton, P. A., Smith, R. J., et Truong, P. N. V. (1996). "Vetiver grass hedges for erosion control on a cropped flood plain: Hedge hydraulics." Agricultural Water Management, 31(1-2), 91-104.

Freeman, G. E., Rahmeyer, W. J., et Copeland, R. R. (2000). "Determination of Resistance Due to Shrubs and Woody Vegetation." Technical Report ERDC/CHL TR-00-25, US Corps of Engineers.

G.J. Arcement, J.and Schneider, V. R. "Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains." 2339.

Grant, P. F.and Nickling, W. G. (1998). "Direct field measurement of wind drag on vegetation for application to windbreak design and modelling." Land Degradation & Development, 9(1), 57-66.

Hervouet, J.-M. (2000). "TELEMAC modelling system: an overview." Hydrological Processes, 14(13), 2209-2210.

Hervouet, J.-M. (2003). Hydrodynamique des écoulements à surface libre : Modélisation numérique avec la méthode des éléments finis, Presses de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Järvelä, J. (2004). "Determination of flow resistance caused by non-submerged woody vegetation." Intl. J. River Basin Management, 2(1), 61-70.

Kadlec, R. H. (1990). "Overland-Flow in Wetlands - Vegetation Resistance." Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 116(5), 691-706.

Kouwen, N.and Fathi-Moghadam, M. (2000). "Friction factors for coniferous trees along rivers." Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 126(10), 732-740.

Lopez, F.and Garcia, M. H. (2001). "Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation." Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 127(5), 392-402.

Rameshwaran, P.and Shiono, K. (2007). "Quasi two-dimensional model for straight overbank flows through emergent vegetation on floodplains." Journal of Hydraulic Research, 45(3), 302-315.

Struve, J., Falconer, R. A., et Wu, Y. (2003). "Influence of model mangrove trees on the hydrodynamics in a flume." Estuarine Coastal and Shelf Science, 58(1), 163-171.

Wu, F. C., Shen, H. W., et Chou, Y. J. (1999). "Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation." Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 125(9), 934-942.

Wu, Y., Falconer, R. A., et Struve, J. (2001). "Mathematical modelling of tidal currents in mangrove forests." Environmental Modelling & Software, 16(1), 19-29.

Autres publications utiles non mentionnées dans le rapport :

James, C. S., Birkhead, A. L., Jordanova, A. A., and O'Sullivan, J. J. (2004). "Flow resistance of emergent vegetation." Journal of Hydraulic Research, 42(4), 390-398.

Klaassen, G. J., and Zwaard, J. J. V. D. (1974). "Roughness Coefficients Of Vegetated Flood Plains " Journal of Hydraulic Research, 12(1), 43-63.

Musleh, F. A., and Cruise, J. F. (2006). "Functional relationships of resistance in wide flood plains with rigid unsubmerged vegetation." Journal of Hydraulic Engineering-Asce, 132(2), 163-171.

Autres documents

- HEC RAS Reference guide (US Corp. of Eng.)
- Documents Amac (Amélioration de l'Alerte aux crues)
- Documents SMIVAL : Bulletins du SMIVAL
- Système de Modélisation Telemac-Hydrodynamique bidimensionnelle -Manuel De L'utilisateur (EDF-DRD)