



Rapport de Stage Master 1

Eaux Sols Environnement

*Modélisation, Spatialisation de
l'étendue d'une crue,
Applications au bassin de la Lèze*

Par

Renaud CHAMPREDONDE

Unité de Travail Personnel Encadré (3M86SEM)
Responsable : Jean-Louis DANDURAND (LMTG)
Maître de Stage : Denis DARTUS (IMFT)

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	3
RESUME	4
I. Introduction.....	5
II. L'hydrologie : rappel	5
III. Sélection des données et justifications.....	6
IV. Utilisation de HEC-Ras	7
1. Présentation de HEC-Ras :	7
2. Application de HEC-Ras aux données	9
3. Détermination des points berges.....	11
4. Mise en place des points digue	12
5. Résultats de la modélisation.....	14
V. Mise en forme des données pour les biefs	16
VI. Calage des profils.....	17
VII. Détermination de la tache d'eau pour chaque profil	18
1. Méthodologie de calcul de la tache d'eau.....	18
2. Récupération des points berges.....	19
VIII. Modélisation sur carte	20
1. Utilisation d'un logiciel de SIG : ArcMap.....	20
2. Conversion des résultats pour l'application sur Arcview.....	21
3. Résultats de la modélisation.....	22
IX. Discussion des résultats.....	23
1. Comparaison avec les résultats d'HEC-Ras.....	23
2. Limites de la modélisation	24
3. Perspective d'amélioration	24
X. Conclusions.....	26
BIBLIOGRAPHIE.....	27
ANNEXES	28

REMERCIEMENTS

Tout au long de ce stage, j'ai bénéficié des conseils et de l'aide de personnes que je tiens tout particulièrement à remercier.

Merci à tous les membres du groupe de recherche HydroEco de l'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse qui m'ont accueilli avec beaucoup de bienveillance, et une bonne humeur omniprésente. Je remercie particulièrement Mme Marie-Madeleine Maubourguet et Mr Jacques Chorda, avec qui j'ai travaillé et qui ont accepté de se rendre disponibles pour répondre à mes questions. Merci également à M. Jacques Georges pour ces conseils.

Mes remerciements s'adressent tout particulièrement à Monsieur Le Professeur Denis Dartus, pour la confiance qu'il m'a témoigné tout au long de ce stage et le soutien dont il a su l'accompagner : ressource d'enthousiasme et source riche d'enseignements.

Merci à tous.

RESUME

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'une action nationale des Bassins Versant Numérique Expérimentaux. Elle a pour but de spatialiser l'étendue de la crue de Juin 2000 de la rivière ariégeoise la Lèze. Après avoir établi un rappel des notions utilisées en hydrologie, nous décrivons le cheminement qui a conduit à cette spatialisation. La recherche des données et le choix des profils ont constitué la première démarche de ce projet. Une fois cette base constituée, nous avons pu utiliser le logiciel d'hydrologie HEC-Ras. Cet outil nous a permis d'établir une programmation pour l'identification des « points berge ». Les tests de modélisation de crues ont validé le travail effectué jusqu'alors. Après avoir mis en forme les résultats de MAGE sur la côte de la rivière pour chaque profil de $t=0$ à $t=120$ heures, nous avons pu mettre au point la méthodologie à adopter pour obtenir l'étendue de la tache d'eau sur un profil, puis la généraliser à l'ensemble du cours d'eau. Nous avons ensuite procédé à une modification du modèle en ajoutant des « points digue » pour mieux adapter le modèle à la schématisation de HEC-Ras. L'étape de calage des profils, d'une part effectuée avec HEC-Ras et d'autre part avec la méthode de programmation créée ad hoc, nous a permis de mettre en forme les données. Cette dernière étape nécessaire à la modélisation, nous a autorisé à projeter ce modèle sur carte à l'aide d'un logiciel de SIG (ArcMap). Une nouvelle simulation suivie de quelques corrections du modèle nous a permis de réaliser la spatialisation de l'étendue de la crue sur le bassin versant de la Lèze.

I. Introduction

Cette étude rentre dans le cadre d'une action nationale des Bassins Versant Numérique Expérimentaux (BVNE). L'IMFT s'est vue confier par la DIREN l'étude de ce projet. L'outil de modélisation MARINE conçu par l'Institut est un modèle de pluie débit en eau douce. Ce modèle a déjà été utilisé sur la Lèze, mais l'objectif de ce projet, initié par la DIREN, consiste en une réactivation de ce modèle.

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. Les principales villes traversées de la source vers l'exutoire sont Pailhès, Artigat, Le Fossat, Sainte-Suzanne, Lézat sur Lèze, Saint-Sulpice sur Lèze, et Labarthe sur Lèze. Le bassin versant de la Lèze, ayant pour exutoire Labarthe sur Lèze est globalement orienté Sud-est Nord-Ouest et dévie un peu vers l'Est en aval de Saint-Sulpice sur Lèze. Il couvre une superficie totale de 343 km². La Lèze s'écoule d'une altitude de plus de 600 mètres dans les Pyrénées à une altitude de 180 mètres à Labarthe sur Lèze. Cette rivière se révèle très instable en période de crues. Cette modélisation va définir l'étendue de ces crues pour arriver à mieux prévenir les conséquences qu'elles pourraient avoir sur tout son bassin versant. L'une d'elle fut particulièrement intense, en Juin 2000, avec un débit de pointe observé proche de 144 m³/s à Labarthe.

II. L'hydrologie : rappel

La modélisation en mécanique des fluides s'articule autour de principes qui permettent de mettre en place les équations du mouvement. La première de ces équations est le principe de conservation de la masse :

$$\operatorname{div} \mathbf{u} = 0$$

Ensuite, on peut également appliquer la conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \rho 2\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{u} + \nabla p - \rho \mathbf{g} + \nu \Delta \mathbf{u} = 0$$

{	$\mathbf{u} = (u, v, w) =$ Vecteur vitesse
	$p =$ Pression statique
	$\mathbf{g} = g\mathbf{z}$ est l'accélération de la pesanteur
	$f =$ Paramètre de Coriolis
	$\nu =$ Viscosité cinématique (moléculaire)

Après quelques approximations sur le type d'écoulement ainsi que sur les conditions aux limites, nous obtenons l'équation de Navier-Stokes suivante :

$$\boxed{\vec{\nabla} p + \left(\zeta + \frac{\mu}{3} \right) \vec{\nabla} (\operatorname{div} \vec{u}) - \mu \Delta \vec{u} = \rho \left(\vec{F} - \frac{d\vec{u}}{dt} \right)}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu = \text{viscosité cinématique} \\ \zeta = \text{viscosité dynamique} \\ \rho = \text{masse volumique} \\ F = \text{force à distance} \end{array} \right.$$

Pour faire apparaître le modèle de ST VENANT, il faut intégrer cette équation sur une colonne d'eau (Passage 3D en 2D), en utilisant la règle de LEIBNIZ. En généralisant ce modèle, nous obtenons une équation beaucoup plus complète dont l'intégration permet d'obtenir la hauteur $H(x,t)$ et la vitesse $V(x,t)$. Ces deux paramètres permettent de déduire le débit $Q(x,t)$. C'est ensuite le couplage de la hauteur $h(X,t)$ avec le débit $Q(X,t)$ qui permet d'obtenir la largeur d'eau $B(X,t)$. C'est cette variable qui nous permettra de spatialiser l'étendue de la crue de Juin 2000. Nous souhaitons donc obtenir la tache d'eau $B(X,t)$ de cette expansion sur l'intégralité de son cours. La finalité de ce travail consiste en une représentation cartographique de cette étendue d'eau. De ce fait nous aurons à projeter cette grandeur sur carte.

III. Sélection des données et justifications

Une fois les principes théoriques établis, nous pouvons maintenant nous tourner vers la pratique de cette démarche.

La première étape de l'étude est de retrouver l'ensemble des fichiers de travail sur lesquels l'Institut avait déjà travaillé au cours de la période s'étendant de 2002 à 2004. Marie-Madeleine Maubourguet (Maître de Conférences à l'INP de Toulouse) et Jacques Chorda (Ingénieur à l'IMFT) étaient alors en charge de ce projet au cours de cette période. C'est donc grâce aux conseils de ces deux personnes que nous organisons le travail. Le nombre de fichiers initiaux s'est avéré extrêmement important, et le travail de vérifications des données se révèle très long. Néanmoins la nécessité d'accorder du temps à cette démarche nous est apparue primordiale au vue du très grand nombre de fichiers sources disponibles.

La première remarque importante porte sur l'utilisation des coordonnées spatiales : Nous allons utiliser les coordonnées en Lambert II, ce qui correspond au système de coordonnées utilisé dans cette zone du Sud de la France. La précision de cette

étude est de l'ordre du cm voire même du mm sur les profils en travers. La plupart du temps une précision centimétrique sur les profils utilisés (voire décimétrique) sera la plus adaptée. L'adaptation des différentes données en fonction de leur précision est importante. En effet nous possédons un MNT défini sur une base métrique alors que les données des profils en travers sont traitées en centimètre. La cohérence entre ces différentes précisions est une notion de travail à ne pas perdre de vue durant l'ensemble de l'étude.

La suite de notre approche nous conduit à déterminer les profils en travers sur lesquels nous allons baser notre étude. Les profils dont dispose l'Institut ont été tracés par un géomètre au cours de la première étude menée. Après avoir parcouru l'ensemble des fichiers, deux types de profils en travers ont retenu notre attention. La première série de 182 profils avait la particularité de posséder des profils en travers qui étaient perpendiculaires à l'axe de la rivière. La seconde, quand à elle, ne présentait pas cette caractéristique et empêchait ainsi les profils de se croiser entre eux. Vue la caractéristique du profil de la première série, il est attendu que les profils de cette série se croisent. En effet la sinuosité du cours d'eau et la longueur des profils (entre 500 mètres et 3,5 kilomètres) impliquent donc ce phénomène, ayant comme inconvénient de croiser des informations sans qu'elles n'aient le même sens ou la même valeur. La caractéristique du croisement des profils nous est apparue primordiale pour notre perspective de travail ; c'est ainsi que nous avons basé notre travail sur cette seconde série dont les profils en travers ne se croisent pas. Nous allons donc travailler sur 158 profils en travers qui sont géo-référencé, c'est-à-dire que pour chaque point du profil, nous connaissons les trois coordonnées spatiales (X, Y, et Z).

IV. Utilisation de HEC-Ras

A ce stade, nous avons donc défini les profils avec lesquels nous allons effectuer notre travail. Nous possédons également les coordonnées de la Lèze en deux dimensions (X et Y) dans le même système de coordonnées (Lambert II).

Toutes les informations sont réunies pour débiter le travail sur le logiciel HEC-Ras.

1. Présentation de HEC-Ras :

HEC-Ras (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System) est développé au Hydrologic Engineering Center du US Army Corps of Engineers. Dans sa version

actuelle, ce logiciel permet d'effectuer des calculs d'écoulements filaires à surface libre en régime permanent. Les calculs de lignes d'eau permettent tant l'analyse de la capacité de cours d'eaux (risques de débordement, inondations) que l'étude de l'impact de modifications des conditions de bords (ponts, endiguements) pour en quantifier l'impact sur le bassin versant.

Ce logiciel s'est déjà montré très performant pour ce type d'étude, et bon nombre d'entreprises et de laboratoires le considèrent comme l'outil idéal de première approche. Il permet de visualiser les profils en travers et de modéliser des phénomènes naturels comme par exemple des crues ou une montée des eaux sans débordement. Ce logiciel utilise des données en ASCII ce qui autorise un traitement de données simplifié. Notre étude consiste en la détermination de l'étendue de la tache d'eau sur la berge gauche et sur la berge droite. Sur un profil donné, nous chercherons donc à identifier la hauteur d'eau à un temps donné. L'intégration de ce processus du temps $t=0$ à $t=t_{\text{final}}$, fin de la crue, nous permettra d'y ajouter la composante temporelle.

Un des premiers paramètres à définir représente la rugosité du lit. Ce coefficient, appelé coefficient de Manning (noté n) permet d'avoir une modélisation la plus proche de la réalité en prenant en compte la vitesse d'écoulement de l'eau sur le fond de la rivière et sur les berges. Le coefficient de Manning (n) est défini par la formule :

$$Vitesse = \frac{1}{n} * R_h^{2/3} * S^{1/2} \quad \left\{ \begin{array}{l} R_h = \text{Rayon hydraulique} \\ S = \text{Surface} \end{array} \right.$$

Le coefficient de Strickler (k) est également utilisé dans la littérature et correspond à l'inverse du coefficient de Manning :

$$k = \frac{1}{n}$$

Les différentes études effectuées sur les supports d'écoulement de l'eau ont défini des ordres de grandeur pour la valeur du coefficient de Manning ainsi que pour celui de Strickler. Ces résultats sont regroupés dans le tableau 1 :

Nature des parois	n (Manning)	k (Strickler)
Béton lisse	0.011 à 0.013	77 à 91
Béton brute	0.013 à 0.016	62 à 77
Moellons	0.020 à 0.030	33 à 50
Graviers	0.022 à 0.035	28 à 35
Galets ou herbes	0.025 à 0.040	25 à 40

Tableau 1 : Valeurs du coefficient de Manning et de Strickler pour différents types de parois.

Sur chaque profil en travers de la rivière, deux types de zones sont définis : la première correspond au lit mineur de la rivière. Pour cette portion du profil, le coefficient de Manning sera fixé à 0.033, ce qui correspond à la valeur normale pour une rivière de largeur moyenne de 10 mètres, composée d'une granulométrie grossière (galets) avec présence d'une végétation rivulaire. Au dehors du lit principal, le coefficient retenu est pris égal à trois fois la valeur du lit principal. Cette valeur correspond à une rugosité élevée car elle représente des zones qui ne sont mouillées que lors de crues. Nous considérons ces coefficients dans ces deux types de zones comme constants tout au long du cours d'eau, le lit de la rivière étant relativement uniforme du point de vue de la rugosité sur le tronçon étudié.

2. Application de HEC-Ras aux données

Nous avons donc entrepris un travail sur le logiciel HEC-Ras. La première étape effectuée a été de créer un projet autour duquel s'organisent les éléments essentiels à la modélisation. Celui-ci est construit autour d'un fichier de géométrie (.g01). Dans ce fichier, nous importons sous forme de fichier texte les coordonnées de la rivière en deux dimensions (X,Y), puis les profils en travers. Ceux-ci possèdent deux types de coordonnées : deux coordonnées X et Y en Lambert II, puis les coordonnées du profil, constitué par l'abscisse curviligne Pk et la hauteur Z. L'abscisse curviligne est définie pour deux points de coordonnées (X_n, Y_n) et (X_{n+1}, Y_{n+1}) par l'expression :

$$\begin{cases} Pk_{(n+1)} = Pk_{(n)} + \sqrt{(X_{(n+1)} - X_{(n)})^2 + (Y_{(n+1)} - Y_{(n)})^2} \\ Pk_{(0)} = 0 \end{cases}$$

On édite ensuite la description de chaque profil avec son Pk correspondant pour son identification. Après ces opérations, nous obtenons la visualisation suivante de la représentation de la ligne de la Lèze sur 52 kilomètres avec les profils en travers (figure 1) :

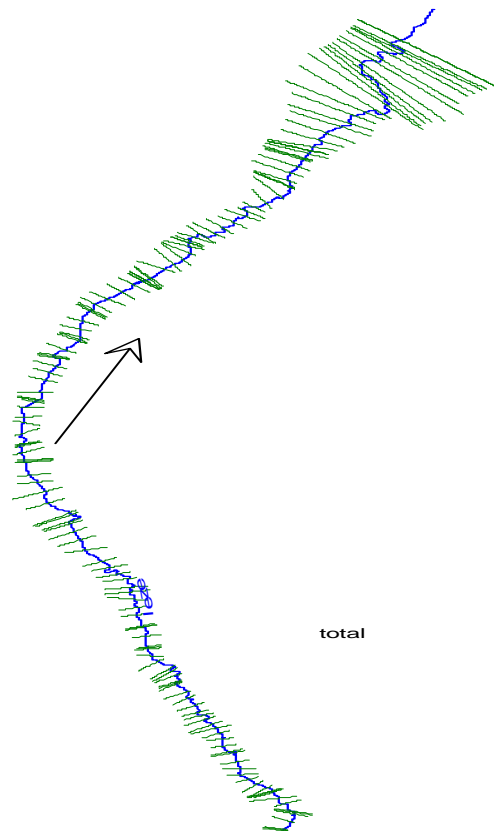


Figure 1 : Représentation sous HEC-Ras de la Lèze et des profils correspondants.

Le logiciel permet de visualiser les données entrées en traçant notamment le schéma en coupe de la rivière tout le long du parcours (figure 2):

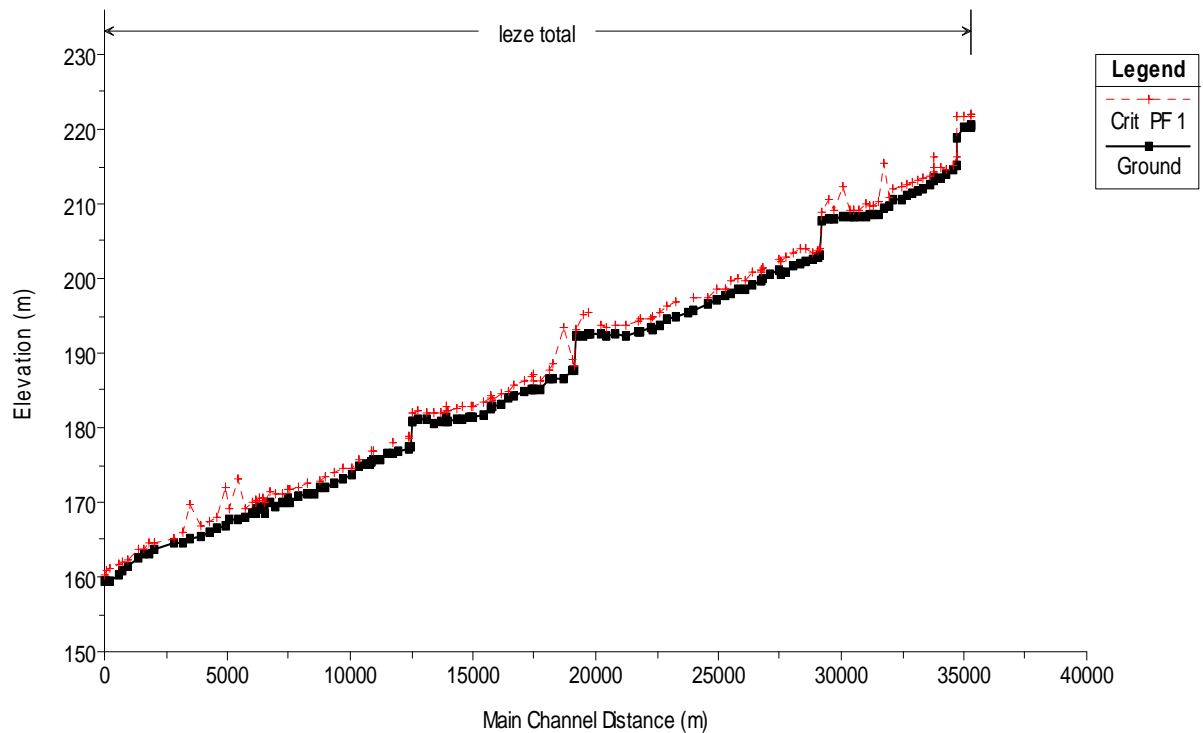


Figure 2 : Schéma en coupe des points rivière en fonction de la distance au premier profil (Ground) avec la hauteur d'eau critique correspondante (Crit PF1)

L'édition de ce graphique nous montre l'étendue du cours d'eau étudié d'une distance totale de 35 kilomètres, pour une altitude variant entre 160 et 220 mètres.

3. Détermination des points berges

Il faut ensuite déterminer les points de la berge pour définir la largeur réelle du cours d'eau. La position de ces deux points joue un rôle important dans la modélisation d'une crue. En effet, ce sont ces points qui délimitent le changement de rugosité et correspondent donc au changement du coefficient de Manning dans notre modélisation. Deux possibilités s'offrent à nous. HEC-Ras propose de les créer automatiquement, cependant ils correspondront, par défaut, aux extrémités du profil, ce qui équivaut à une valeur du coefficient de Manning constant sur tout un profil donné. Cette hypothèse ne convenant pas, nous nous orientons vers une autre possibilité. La quantité de profil à disposition dirige notre démarche vers une automatisation de cette étape. Nous créons alors un programme Fortran qui se place sur l'axe de la rivière et dont l'incrément se déplace vers la droite et vers la gauche du profil. Le premier maximum rencontré sera récupéré et stocké dans un fichier résultat. Ce programme fonctionne correctement avec des profils qui ont un certain degré de variation d'altitude. Pour ceux qui possèdent une variation linéaire à droite ou à gauche de l'axe de la rivière, le programme récupère un point qui se situe à l'extrémité du profil. Nous observons une erreur du même type si le profil possède une variation d'altitude à une distance très lointaine de l'axe de la rivière. Il nous est alors arrivé d'avoir des berges qui se positionnaient à deux cent mètres de l'axe de la rivière. Une modification du programme a consisté à fixer une largeur maximum, à partir de l'axe de la rivière, au-delà de laquelle le programme s'arrête et retourne le dernier point avant ce maximum (cf. annexe programme 1). Nous obtenons donc, pour des profils dont l'altitude augmente constamment à partir de l'axe de la rivière, un point berge qui se situe à environ 30 mètres de l'axe de la rivière. Il en va de même avec des profils dont l'altitude croît constamment jusqu'à une distance supérieure à 30 mètres (figure 3).

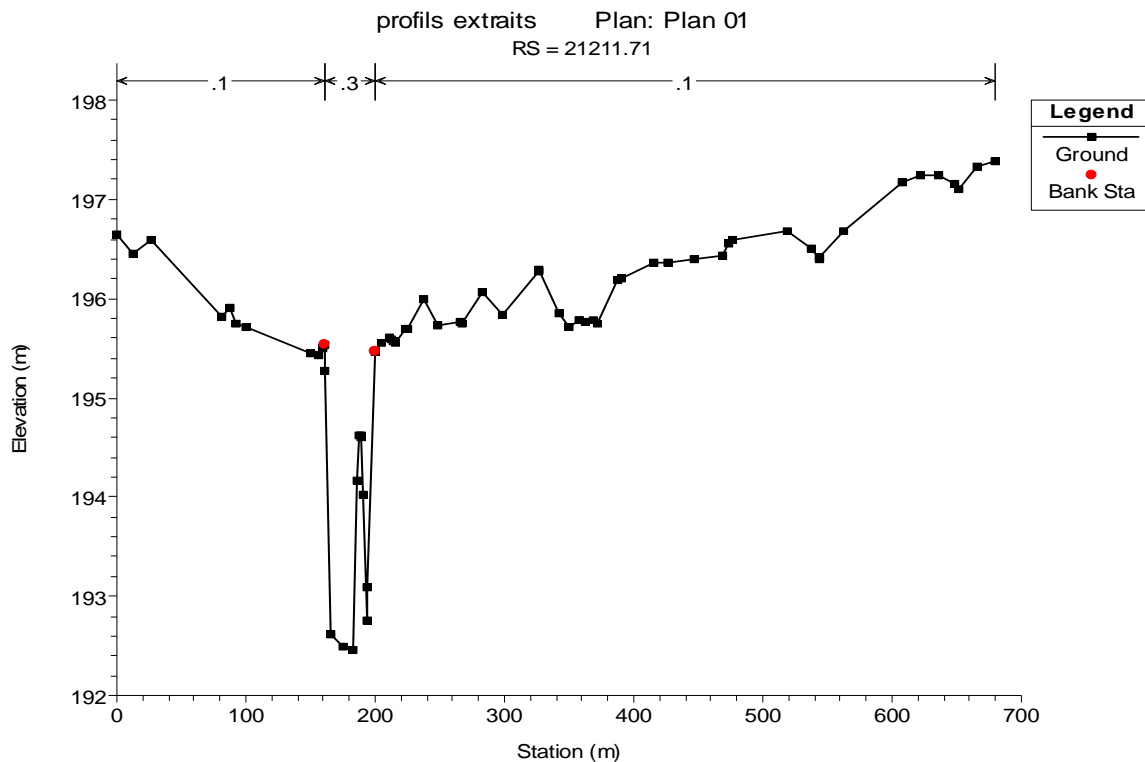


Figure 3 : Représentation d'un profil avec l'identification des points berge (Bank Station).

Pour éviter de récupérer des points berges qui ne sont en fait qu'une détection de l'irrégularité du fond de la rivière, nous décidons de rajouter une condition sur la hauteur des points berges par rapport au fond de la rivière. Un point berge ne pourra être inférieur à une hauteur de 40 centimètres par rapport au niveau de la rivière.

4. Mise en place des points digue

A cet instant le logiciel peut établir une modélisation de l'étendue d'une crue. Cependant le test effectué met en évidence une erreur récurrente sur la hauteur d'eau modélisée. Nous obtenons des résultats qui ne correspondent pas à la réalité en recouvrant des zones car elles sont en dessous du niveau maximum de l'eau, alors que le niveau des berges de la rivière n'est pas dépassé. Le profil suivant illustre le problème (figure 4) :

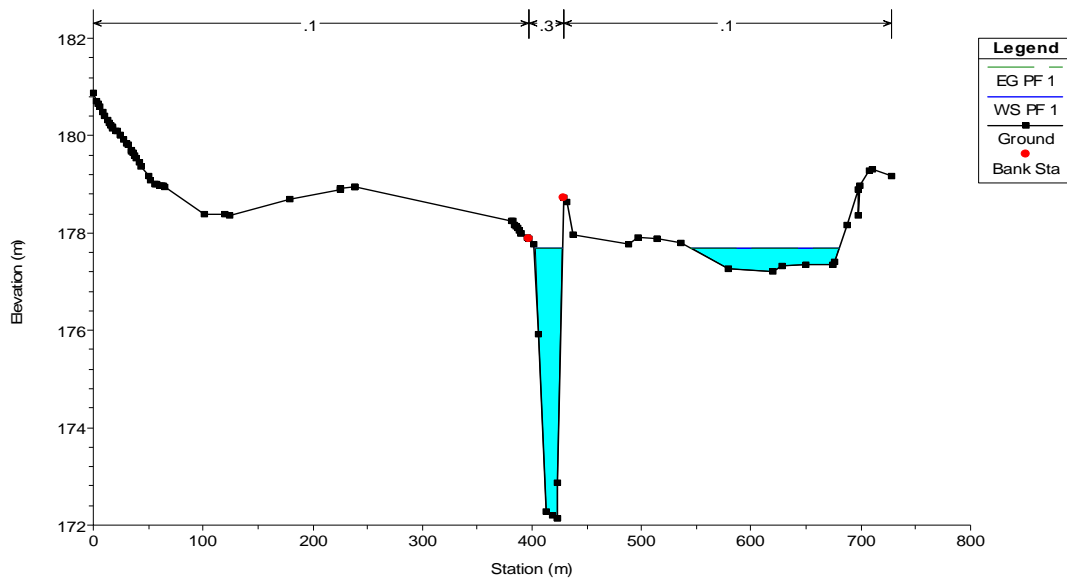


Figure 4 : Problème de l'inondation d'une zone sans débordement de berges.

Pour remédier à ce problème, le logiciel offre la possibilité de positionner des points digue (levee). Si la hauteur de l'eau dans le lit mineur est inférieure à ceux-ci, les zones à l'extérieur du lit de la rivière ne seront pas inondées. Voici le résultat de cette opération (figure 5) :

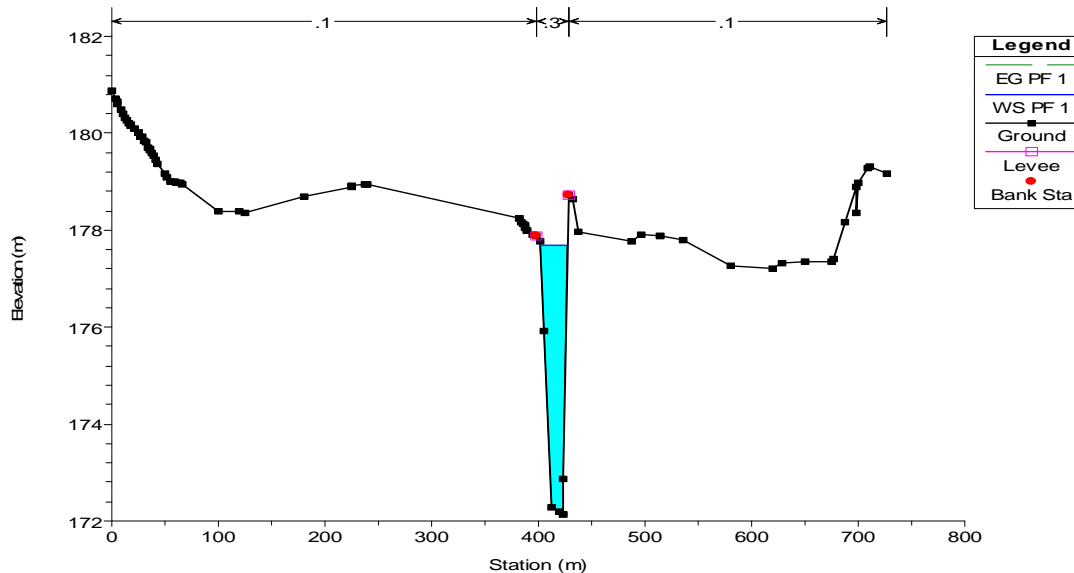


Figure 5 : Résolution de l'inondation des zones qui se trouvent en dessous du niveau de l'eau par l'installation de points digue (Levee).

La zone précédemment inondé (profil sans digues) ne l'est plus en présence de points digue. Nous décidons de positionner automatiquement ces points sur l'ensemble des profils. L'ensemble des paramètres étant maintenant correctement fixé, nous pouvons tester la modélisation que propose le logiciel.

5. Résultats de la modélisation

Le débit maximum observé pour la crue de Juin 2000 est de l'ordre de $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Le test de cette modélisation est effectué pour trois débits différents (figure 6) :

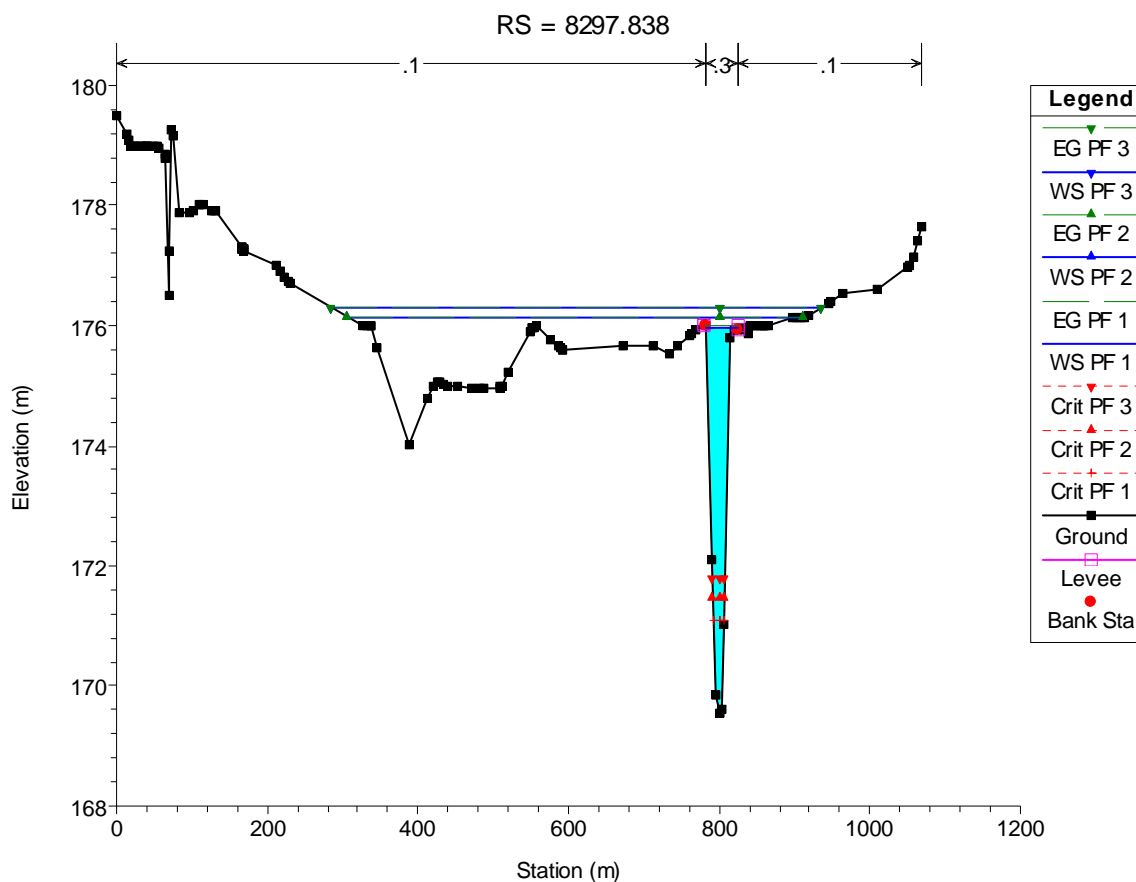


Figure 6 : Représentation de la modélisation des hauteurs d'eau (WS) sur le profil de Pk=8297.838 mètres pour trois débits différents : PF1 $50 \text{ m}^3/\text{s}$, PF2 $75 \text{ m}^3/\text{s}$ et PF3 $100 \text{ m}^3/\text{s}$.

La modélisation a été effectuée pour trois débits : PF1 possède un débit de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, PF2 un débit de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ et PF3 un débit de $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Une fois que la modélisation est effectuée, nous avons accès à plusieurs résultats. Nous pouvons obtenir des informations de notre simulation sur le profil général de la rivière. L'exemple ci-dessous, retrace, suivant la distance au profil de départ (profil aval), la hauteur d'eau induite par un débit de crue de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 7) :

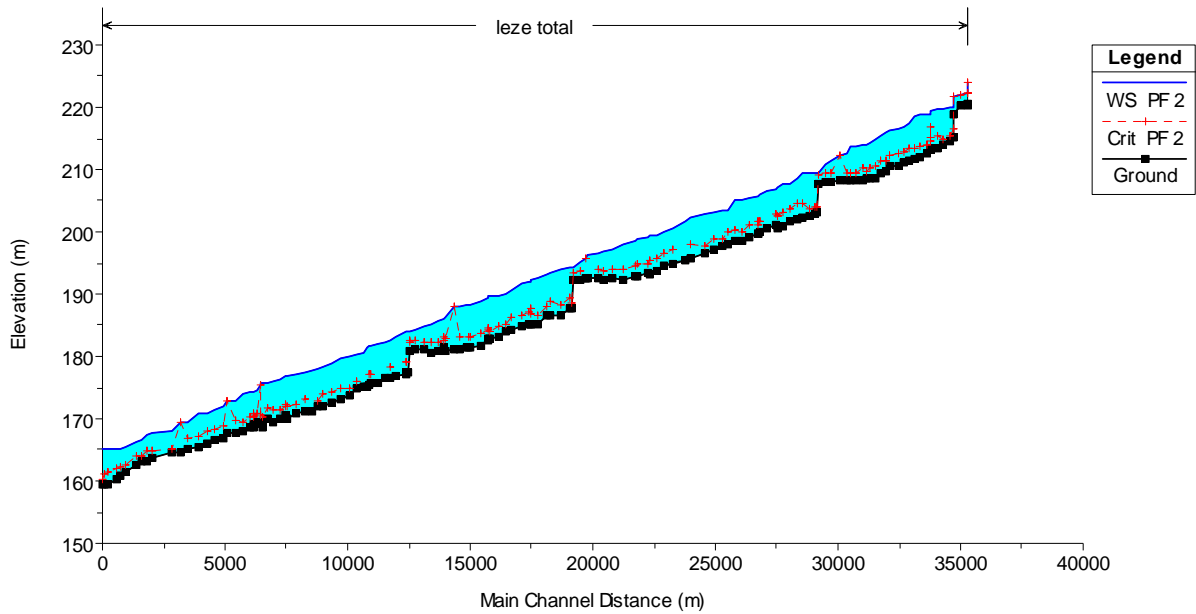


Figure 7 : Schéma en coupe de la rivière avec les hauteurs d'eau pour une crue de $75 \text{ m}^3/\text{s}$.

Sur ce graphique, nous observons que certaines portions de la rivière sont plus exposées aux crues du fait de la variation brusque de l'altitude (Pk=12.5, 18, 27.5 Kilomètres). La zone aval s'en trouve alors fortement touchée avec des hauteurs d'eau qui, ramenées au profil sont deux à trois fois plus importantes que la zone amont. Ce graphique montre le rôle de telles cassures sur le profil en long de la rivière.

Le résultat de la modélisation de la crue avec le logiciel HEC-Ras donne la représentation suivante (figure 8):

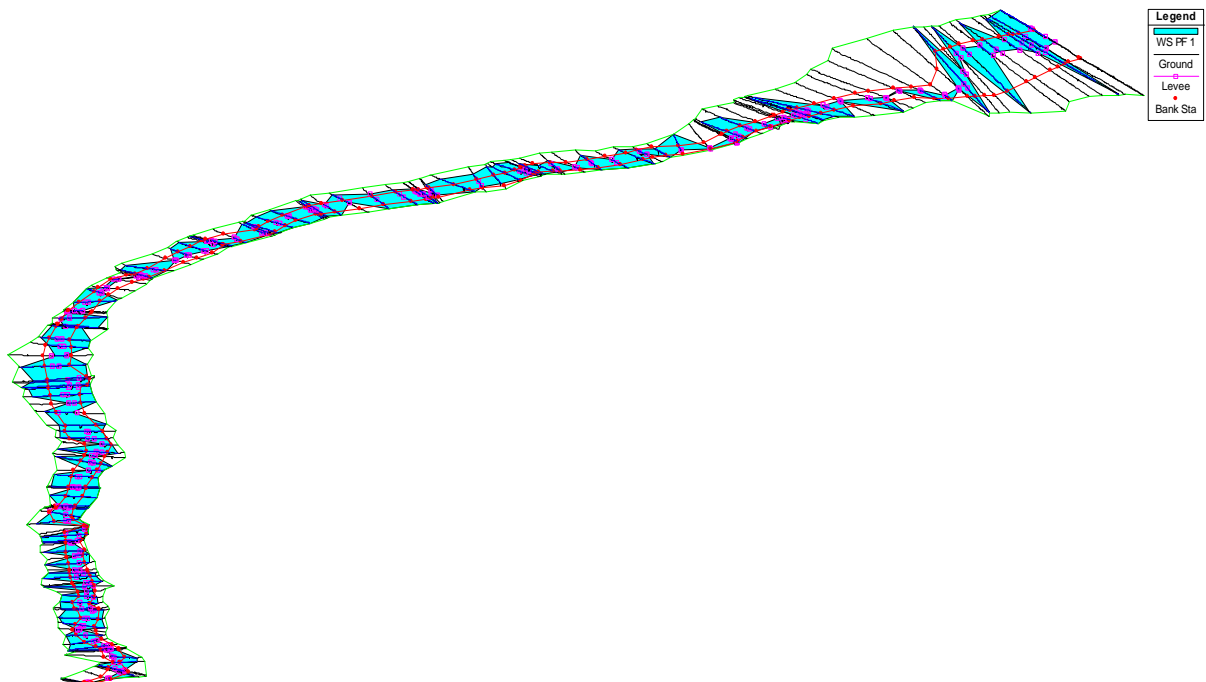


Figure 8 : Représentation sous HEC-Ras de l'étendue de la crue pour un débit $75 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour un débit constant, nous constatons que la crue recouvre la plupart des profils avec des largeurs importantes en aval. L'étendue de la crue peut alors atteindre des distances de près de 200 mètres à partir du centre de la rivière.

V. Mise en forme des données pour les biefs

Lors de la première modélisation de la crue par l'Institut, les mesures de la pluviométrie fournies par la DIREN avaient servi de base pour l'utilisation du logiciel de Pluies – Débits MARINE (Modélisation de l'Anticipation du Ruissellement et des Inondations pour des événements Extrêmes) qui met en relation les quantités d'eau qui arrivent dans le système lors des différents événements pluviométriques, et le profil de la rivière pour en estimer le débit. Ce modèle a nécessité l'intégration d'un code de calcul, appelé Mage, qui résout les équations de Saint Venant et traduit la propagation de la crue dans le cours d'eau. L'ensemble de ces résultats permet d'extrapoler les hauteurs d'eau sur chaque profil. C'est cette information qui va nous servir à modéliser l'étendue de la crue. Ce fichier, qui est une extraction de données du logiciel, contient les hauteurs d'eau au niveau de chaque profil pour la date $t=0$ heure à la date $t=120$ heures en indiquant simplement la distance à la source (Pk) pour les cinq biefs étudiés. La nécessité d'ordonner ce fichier a motivé notre démarche pour l'élaboration d'un programme. Nous choisissons, en première approche, d'effectuer un test sur le profil à $t=33$ heures (cf. annexe programme 2), qui correspond au débit maximal de la crue.

Nous décidons d'effectuer d'abord une mise en forme test au temps qui correspond au débit maximal de la crue, c'est-à-dire pour $t=33$ heures. Nous utilisons le fichier des biefs pour la date $t=33$ heures. Sur le fichier issu de l'extraction, il ne figure que le Pk du profil. Nous possédons sur un autre fichier la correspondance entre les Pk et les numéros des profils. L'élaboration de notre programme nous a permis de mettre en relation ces deux informations et de les relier au temps pour chaque profil. Nous obtenons donc un premier fichier résultat pour la date $t=33$ heures, sur lequel les informations du profil (numéro du profil et Pk) ainsi que la hauteur d'eau correspondante sont mentionnées. Le bon fonctionnement de ce test nous permet de généraliser le programme pour chaque date (cf. annexe programme 3). Nous obtenons donc pour chaque profil, en plus des informations d'identification, les hauteurs d'eau de $t=0$ à $t=120$ heures, comme le montre le tableau 2 ci-dessous :

N°profil	Pk	Heures	Cotes
194	362.2	0	244.123
194	362.2	0.167	244.123
194	362.2	0.333	244.123
...
194	362.2	119.667	244.123
194	362.2	119.833	244.123
194	362.2	120	244.123
...
24	43915.7	0	159.494
24	43915.7	0.167	159.494
24	43915.7	0.333	159.494
...
24	43915.7	119.667	159.509
24	43915.7	119.833	159.509
24	43915.7	120	159.509

Tableau 2 : Représentation du fichier résultat obtenu pour les 158 profils de t=0 à t=120 heures par pas de 0.167.

Nous obtenons donc l'ensemble des hauteurs d'eau pour toutes les dates sur chaque profil, chaque hauteur étant référencée par la date, son Pk et son numéro de profil.

A ce stade, nous avons donc l'ensemble des éléments qui vont nous permettre d'évaluer la tache d'eau.

VI. Calage des profils

La difficulté de cette étape réside dans le fait qu'il n'y a aucune correspondance entre les numéros des profils des résultats de Mage et les numéros des profils étudiés. Nous avons deux types de numérotation différente entre les profils sur lesquels nous allons établir la tache d'eau, et la numérotation des résultats de Mage. Il est donc nécessaire de trouver la correspondance entre les deux pour modéliser chaque étendue sur le profil correspondant.

Pour établir la correspondance entre les profils adoptés et les numéros de profils correspondant aux hauteurs d'eau, nous avons en première approximation supposé que les numéros des profils de Mage correspondaient à ceux des profils adoptés. A

partir de cette base, nous avons ensuite repris les profils pour lesquels nous recensons des aberrations, c'est-à-dire des hauteurs d'eau maximales qui se situaient en-dessous du niveau minimal du profil, ou à l'inverse une cote d'eau minimale qui se situaient au dessus de l'altitude maximale d'un profil. Quand nous rencontrons un problème, nous recherchons le numéro du profil de Mage qui correspond au profil défaillant. Nous obtenons donc un fichier qui nous permet d'établir la correspondance entre chaque profil étudiés et chaque séquence de hauteurs d'eau de $t=0$ à $t=120$ heures par pas de 0.167.

VII. Détermination de la tache d'eau pour chaque profil

Une fois la correspondance établie, nous pouvons donc nous pencher sur l'élaboration de la tache d'eau, sur un profil en premier lieu, puis par généralisation, étendre la méthodologie à l'ensemble des profils.

Pour récupérer l'étendue de la tache d'eau il nous faut mettre en relation l'ensemble des paramètres définis plus haut. Pour chaque profil nous avons donc la hauteur d'eau atteinte de la date $t=0$ heure à $t= 120$ heures.

Ainsi, nous allons donc pouvoir créer la tache d'eau pour chaque instant. Pour cela, nous devons récupérer les points de la berge qui correspondent à l'intersection entre la ligne d'eau et le profil. Ces points constitueront l'étendue maximale de la crue sur le profil exactement.

1. Méthodologie de calcul de la tache d'eau

Décrivons la méthodologie adoptée pour ce travail :

Nous travaillons sur un fichier qui est composé de 158 profils numérotés de 1 à 158. Sur ce fichier, quatre informations y sont notées : les P_k (abscisse curviligne), les X , les Y , et la cote du point du profil. La première solution envisagée avait été de parcourir le profil en partant du début du profil (abscisse curviligne nulle). Nous nous heurtons dans ce cas-là à un problème sur des profils dont l'altitude coupait plusieurs fois la hauteur du niveau d'eau comme le montre la figure 9.

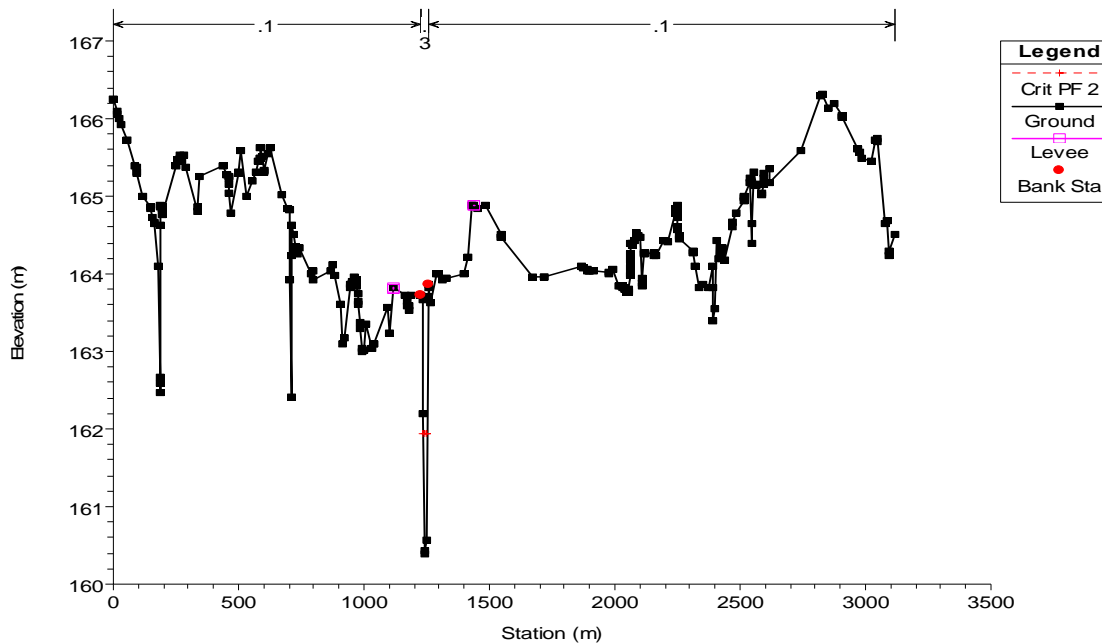


Figure 9 : Exemple de profil détaillé susceptible de couper plusieurs fois la hauteur d'eau.

Sur cet exemple, avec cette méthodologie, si le niveau de l'eau est de 163 mètres, nous récupérons un point berge sur la rive gauche qui ne correspond pas à la réalité avec un Pk égal à 200 mètres, alors que la rivière se trouve à une abscisse curviligne de 1250 mètres. Il a fallu donc opter pour une autre solution. Pour remédier à ce problème, nous avons décidé de parcourir le profil à partir du centre de la rivière (cf. annexe programme 4). Le premier point pour lequel la hauteur d'eau est supérieure à l'altitude s'identifie comme le point recherché, la condition « while » étant l'atout majeur d'une telle requête. Pour arriver à mettre en œuvre cette méthode, il nous fallait connaître les points de la rivière qui se situaient exactement sur le profil. Après avoir visualisé l'ensemble des profils sur le logiciel HEC-Ras, nous nous sommes rendu compte que la hauteur minimale des profils correspondait au point de la rivière pour 155 profils. Pour les trois profils qui ne possédaient pas cette caractéristique, une détermination manuelle a été la plus efficace. Nous avons ainsi pu créer un fichier qui récupérait pour chaque profil étudié les coordonnées X, Y, Z de la rivière qui se trouvaient exactement sur la rivière.

2. Récupération des points berges

Nous pouvons maintenant appliquer notre méthodologie aux données des hauteurs d'eau de la Lèze. Notre objectif est de récupérer les points de la rive droite et les points de la rive gauche séparément, et ce pour avoir des fichiers plus adaptés à la

modélisation (cf. annexe programme 5). Nous stockons les points de chaque berge identifiés par le programme dans un fichier résultat.

Nous obtenons donc un segment d'eau pour l'ensemble des profils et pour toutes les dates. Pour chaque date nous avons donc la tache d'eau sur tous les profils. Nous pouvons donc passer à la dernière étape de la modélisation.

VIII. Modélisation sur carte

1. Utilisation d'un logiciel de SIG : ArcMap

Nous approchons du but final de l'étude à savoir la spatialisation et le report sur carte. Cette partie nécessite l'utilisation d'un logiciel de Système d'Information Géographique (SIG) qui consiste en une base de données géo-référencée.

Présentation de ArcMap 9.1 :

Ce logiciel fait référence en matière de modélisation environnemental. Nous utiliserons son composé pour la visualisation : ArcView 9.1. Celui-ci est un puissant outil pour gérer, visualiser, interroger et analyser toutes les données comportant une composante spatiale. Le point de départ d'une étude sous ce logiciel est la création d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Nous avons fait le choix d'utiliser un MNT avec une précision de 20 mètres, c'est-à-dire que la taille du pixel est de 20 mètres par 20 mètres. Ce MNT provient des images satellites de SPOT 4 ce qui nous permet d'utiliser un support de représentation fiable et précis. Nous possédions également un MNT avec une précision plus grande, de l'ordre de 5 mètres, cependant la précision de notre étude ne nécessite pas l'utilisation d'une source aussi puissante (résolution de 11920*4220 pixels).

Ensuite, nous importons le fichier des coordonnées de la Lèze, ainsi que le fichier des 158 profils. Nous obtenons le résultat suivant (figure 10) :

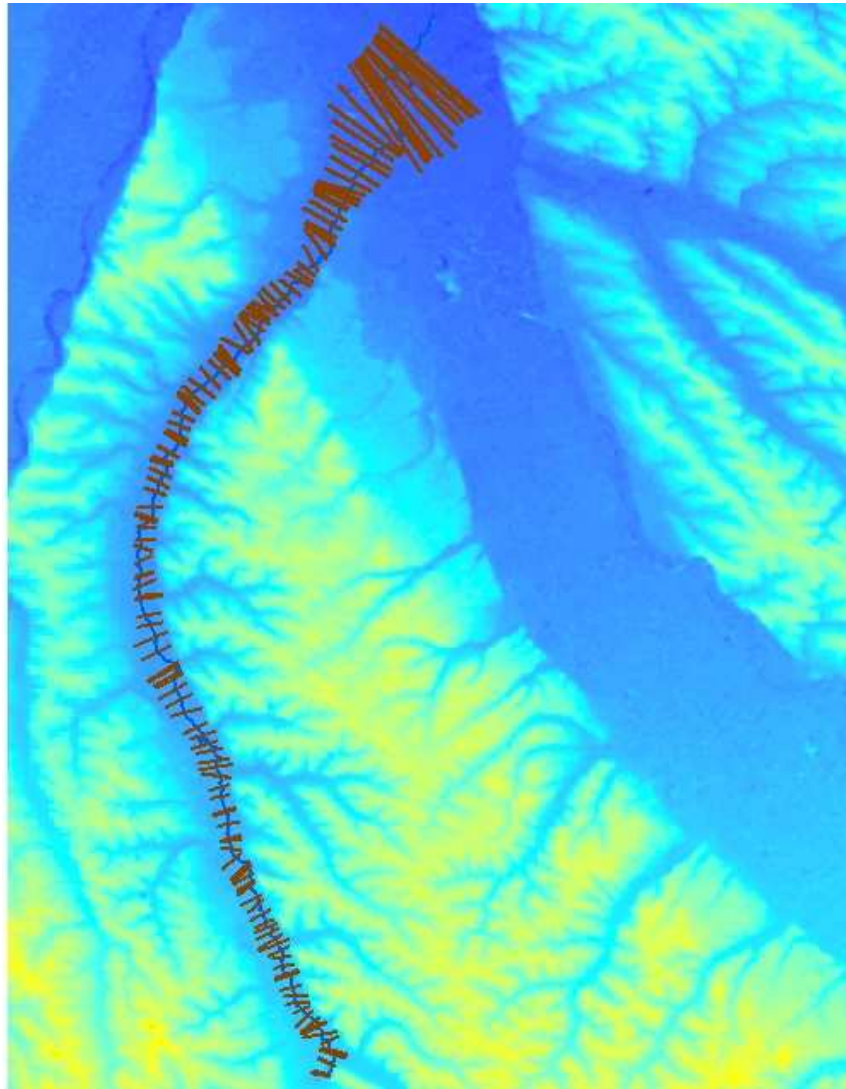


Figure 10 : Représentation sous ArcMap 9.1 de la Lèze avec les profils étudiés sur le MNT issu de SPOT 4.

De plus cette carte est géo-référencée, c'est-à-dire que pour chaque point, nous connaissons les trois coordonnées spatiales X, Y, et Z. Cette composante permet de travailler en trois dimensions.

2. Conversion des résultats pour l'application sur Arcview

Les données obtenues jusqu'ici ne permettent pas une exploitation directe sur le logiciel. C'est pourquoi une conversion des données est nécessaire pour pouvoir utiliser ce logiciel.

A l'aide du fichier de la correspondance entre les profils étudiés et les numéros de profil des résultats de Mage, nous ordonnons la séquence des profils étudiés (cf. annexe programme 6) et la séquence des hauteurs d'eau (cf. annexe programme 7) de façon à les faire correspondre pour chaque itération de $i=1,721$ (721 dates). Nous

effectuons cette opération en vue d'obtenir les taches d'eau pour chaque date. L'étendue de la tache d'eau est une zone délimitée par les points berges constitués par la rive gauche et les points berges constitués par la rive droite. Nous devons donc passer de simples points sur la carte à un regroupement de plusieurs points pour élaborer une surface. Pour cela nous avons décidé de relier le point indice « n » avec celui indicé « n+1 » de façon linéaire. La réalisation de ce travail nous a conduit à télécharger un utilitaire annexe qui donne à Arcview des fonctionnalités supplémentaires. Cet Arcscript se nomme « ET Geowizards » et permet entre autres de créer des « polyline » ou des « polygon » en deux ou trois dimensions. Une découverte de cette nouvelle application par un test sur la création d'un polygone exécuté avec le profil correspondant à la date t=30 heures (cf. annexe programme 8), a permis de montrer le type de fichier supporté par l'application (format texte espace tabulé) et l'ordre dans lequel il fallait séquencer nos données. En effet, cette application nécessite l'organisation du fichier de sorte que la lecture du fichier effectue une boucle, c'est-à-dire débute au premier point et suit un chemin qui la ramène au premier point. Nous avons donc repris nos résultats de la berge gauche et de la berge droite pour en modifier l'ordre. La berge gauche sera lue du premier profil jusqu'au dernier, alors que la berge droite sera lue du dernier jusqu'au premier. Cet agencement des données permet une lecture appropriée pour la création de notre polygone (cf. annexe programme 9). Nous créons ainsi un polygone que l'on peut facilement colorer pour visualiser l'impact de la crue.

3. Résultats de la modélisation

L'application donnant des résultats probants pour le premier profil testé, nous décidons de la généraliser pour l'ensemble des profils. Une fois cette opération effectuée, nous obtenons donc 721 taches d'eau correspondant à chaque temps (t=0 à t=120 par pas de 0.167) pour les 158 profils étudiés.

Voici la représentation de l'étendue de la crue pour la date t=35 heures (figure 11 à gauche), et la date t=45 heures (figure 12 à droite).

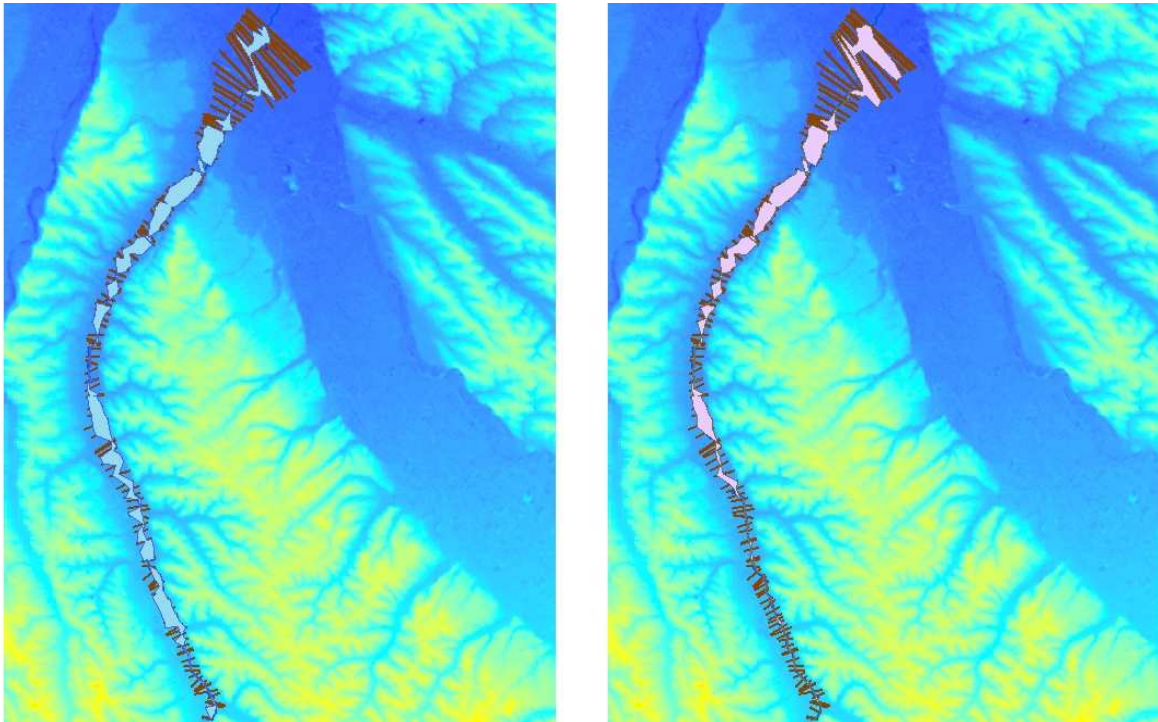


Figure 11 et 12 : Résultat de la modélisation de l'étendue de la crue pour t=35 h (à gauche) et t=45 h (à droite)

IX. Discussion des résultats

1. Comparaison avec les résultats d'HEC-Ras

Nous allons comparer les résultats de la simulation du logiciel HEC-Ras avec l'étendue de la crue modélisée. Nous reprenons la modélisation de HEC-Ras pour un débit de $75 \text{ m}^3/\text{s}$ (cf. figure 8). On s'aperçoit que la tache d'eau bleue de la modélisation sur HEC-Ras, correspond aux mêmes débordements que ceux générés par la modélisation effectuée. Ces deux modélisations permettent de mettre en évidence les zones inondables de ce bassin versant et mettent donc en valeur les zones les plus exposées.

La modélisation effectuée sous ArcMap a permis d'ajouter la composante temporelle de la crue. En effet, la modélisation effectuée par HEC-Ras ne retranscrit sur carte que l'étendue maximale de la crue, c'est-à-dire la distance maximale atteinte par l'eau lors de la crue simulée à débit constant. Notre modélisation permet de rendre compte de l'avancée de la crue en fonction du temps. Celle-ci est bien visible en comparant les deux figures de l'étendue de la crue pour t=35 heures et t=45 heures (figures 11 et 12). Pour t=35 heures, les débordements sont visibles de la partie

amont du bassin versant jusqu'à dix kilomètres avant l'embouchure avec l'Ariège, la partie aval n'étant pas encore fortement touchée. A l'inverse, la figure 12 pour $t= 45$ heures, nous montre l'effet de la dévalaison de la crue : la partie amont retrouve rapidement son lit principal alors que la partie aval est à son tour fortement touchée et subit les conséquences de l'apport d'eau supplémentaire de l'amont.

2. Limites de la modélisation

La modélisation effectuée comporte des limites, notamment pour la représentation sur carte entre deux profils comme l'illustre la figure 13 :

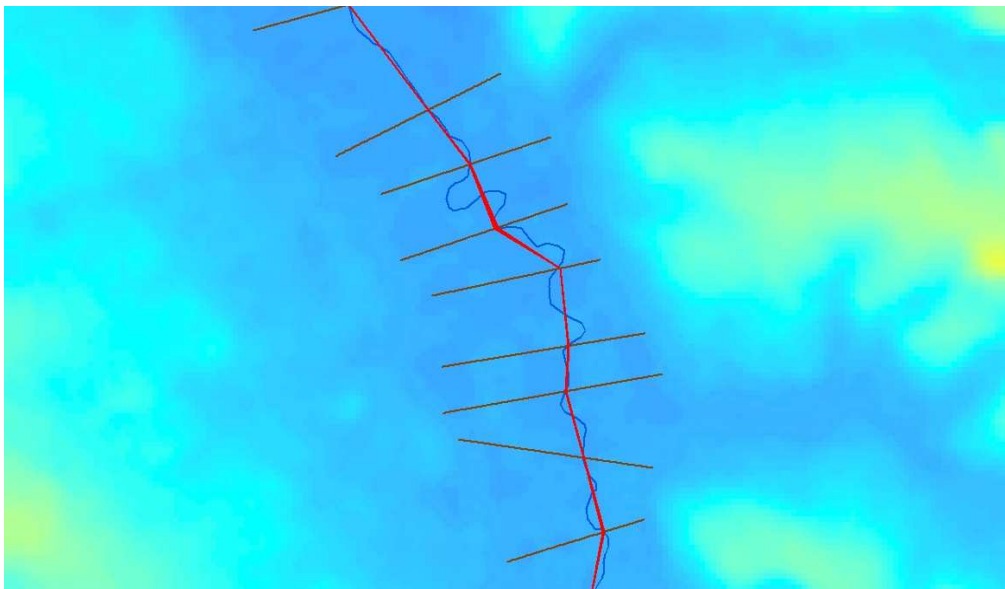


Figure 13 : Limites de la modélisation entre deux profils en travers.

Nous observons ce phénomène entre deux profils notamment pour les polygones qui correspondent à des temps proches du début ou de la fin de la crue. Le polygone rouge, formé des points récupérés sur les profils ne modélise pas les sinuosités de la rivière entre deux profils. Cependant on constate que la tache rouge passe exactement à l'endroit où la rivière coupe le profil ce qui nous permet de confirmer la validité du travail effectué.

3. Perspective d'amélioration

Le nombre de profils pour le report sur carte est insuffisant pour être représentatif de la réalité. Il est donc intéressant d'effectuer une interpolation des résultats obtenus entre deux profils. L'interpolation consiste à réduire la distance séparant deux profils en en générant des nouveaux. Ces derniers sont créés de façon linéaire entre deux vrais profils. La distance séparant deux profils étant très variable, il est souhaitable

d'établir une règle, fonction de la distance, qui divisera l'espace entre deux profils en N parties. Principe de l'interpolation adopté :

Nous connaissons les coordonnées des points N et N+1 sur chaque berge. Nous pouvons donc diviser le segment qui passe par ces deux points par le nombre de parties établies en fonction de la distance entre deux profils, et attribuer ces coordonnées aux nouveaux points. De cette manière, nous avons étendu le nombre de profils dans le but d'avoir une représentation spatiale plus adaptée à un contour détaillé de la rivière.

Entre deux profils, le logiciel HEC-Ras permet également une interpolation. Voici un exemple d'interpolation de profils initiaux (figure 14 gauche) et interpolés (figure 15 droite) :

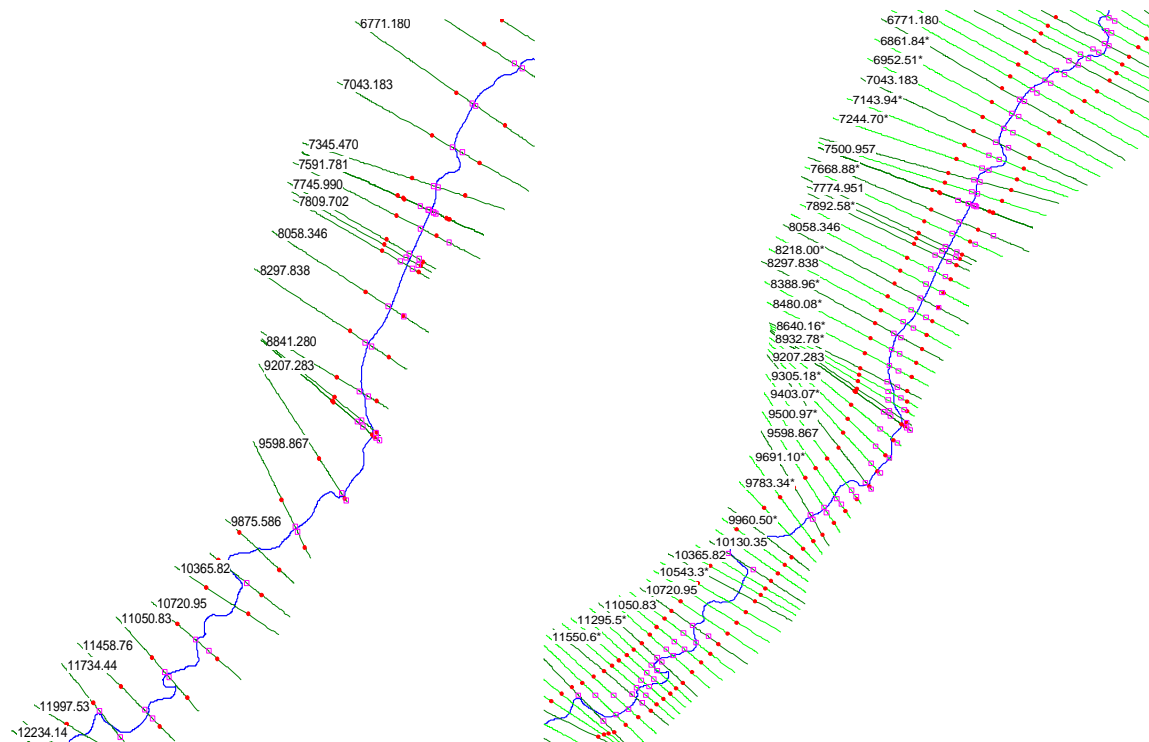


Figure 14 et 15 : Représentation de la rivière sans interpolation à gauche et avec interpolation sous HEC-Ras

Avec une extrapolation relativement fine, la modélisation serait plus fidèle à la réalité, en adaptant notamment les profils aux contours de la rivière. Une autre perspective d'amélioration possible consiste dans l'incorporation d'ouvrages hydrauliques tels que les ponts. La modélisation sous HEC-Ras permettrait de connaître l'influence de ces ouvrages sur le comportement de la rivière en période de crues.

X. Conclusions

La modélisation de la crue de Juin 2000 a montré la spatialisation de la zone inondable et les effets dévastateurs de cette instabilité du lit de la Lèze : ses débordements peuvent s'étendre jusqu'à quatre à cinq cents mètres par envahissement des plaines, maisons et cultures.

L'utilisation du logiciel HEC-Ras nous a permis d'obtenir une première visualisation de l'étendue de la crue. Ce logiciel a constitué un outil essentiel pour la représentation spatiale de l'avancée du travail tout au long de l'étude ainsi que pour le développement de la méthodologie à adopter pour une représentation temporelle à l'aide du logiciel ArcMap. L'ensemble des résultats obtenus est en accord avec les descriptions issues de HEC-Ras, et permet de confirmer la validité de nos résultats concernant l'étendue de cette crue. La discussion des résultats a mis en évidence une ouverture pour améliorer notre modèle en utilisant le principe de l'extrapolation des profils en travers.

La portée de cette étude peut être envisagée dans le domaine de l'extension urbaine : en mettant l'accent sur les coûts humains et économiques de tels évènements pluviométriques, elle invite - à la mesure de sa modestie – à approfondir ces recherches pour que les plans d'occupation des sols, notamment, soient élaborés de façon éclairée, engageant également le législateur à garantir, par son rôle de prévention, sécurité et sérénité du citoyen.

BIBLIOGRAPHIE

CANDEL, S. (2001), *Mécaniques des fluides*, Dunod, 480 p., ISBN : 2-10-005372-8

DELANNOY, C. (2002), *Programmer en Fortran 90*, Eyrolles Broché, 440 p., ISBN : 2-21-208982-1

DIREN (2001), *Crue du 11 Juin 2000 – recueil photographiques, étude géographique et hydrographique – confluence ariège-Lèze*. DIREN Midi-Pyrénées www.midi-pyrenees.environnement.gouv.fr

ESRI (2006), ArcGIS software, www.esri.com/software/arcview

ESRI (2006), Arcscript download, Support Center, www.arcscript.esri.com

ESTUPINA BORRELL, V. et DARTUS, D. (2001), *Modélisation de la genèse et la propagation des crues éclair*, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France

ESTUPINA-BORRELL, V. (2004), *Vers une modélisation hydrologique adaptée à la prévision opérationnelle des crues éclair – Applications à de petits bassins versants du sud de la France*. Thèse de doctorant, spécialité : Hydrologie, Institut National Polytechnique de Toulouse, France.

LABAT, D. (2005), *Cours d'hydrogéologie*, Laboratoire des Mécanismes de Transfers en Géologie, Toulouse, France.

OLAGNON, M. (2000), *Traitement de données numériques avec Fortran 90*, Masson, 264 p., ISBN : 2-22-585259-6

PERRIER, J. (1998), *Mécanique des fluides appliquée*, Dunod, 456 p., ISBN : 2-10-048400-1

US Army Corps of Engineers (2006), HEC-Ras Software, www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras