

SOMMAIRE.

REMERCIEMENTS

RESUME FRANÇAIS / ANGLAIS.....page 2

PRESENTATION EN ANGLAIS (ENGLISH PRESENTATION).....page 3

INTRODUCTION.....page 10

I) PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL.....page 11

II) CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE.....page 14

III) PRESENTATION GENERALE.....page 17

**IV) ETUDE HYDROLOGIQUE : REGIME HYDROLOGIQUE
DU COURS D'EAU, ARCHIVES ET CRUES ANCIENNES...page 27**

**V) ETUDE HYDRAULIQUE ET REALISATION DU MODELE
NUMERIQUE D'ECOULEMENT.....page 32**

CONCLUSION.....page 56

BIBLIOGRAPHIE.....page 57

TABLE DES MATIERES.....page 58

TABLES DES FIGURES ET PHOTOS.....page 59

ANNEXES.....page 61

RESUME

La réalisation de l'Atlas des Zones Inondables (AZI) de la vallée de la Théols constitue la première étape à l'élaboration d'un Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI).

Pour sa réalisation, un certain nombre de méthodes et d'outils ont été employés. Des recherches bibliographiques et d'archives, ainsi que des investigations de terrain ont permis de recenser les crues anciennes et de déterminer la crue de projet.

Après analyse hydrogéomorphologique du terrain et une étude soignée du contexte physique du bassin versant, une étude hydraulique fut réalisée. Celle-ci a nécessité de nombreuses opérations de terrain, et l'utilisation du logiciel de modélisation hydraulique unidimensionnel HEC-RAS, permettant de définir des zones d'aléa plus ou moins fort.

Ceci a abouti à la réalisation de cartes détaillées constituant l'AZI, qui permettront une information du public sur les aléas d'inondation les concernant.

MOTS CLES : Atlas des Zones Inondables (AZI), prévention des crues, approche hydrogéomorphologique, modélisation hydraulique numérique.

ABSTRACT

The achievement of the "Atlas des Zones Inondables, (AZI)" (Floodable Area Atlas) on Théols valley, is the first step for the development of the "Plan de Prevention des Risques d'Inondations, (PPRI)" (Flood Risks Prevention Plan).

For its achievement, some methods and tools have been employed. Bibliographical and archives research, along with field investigations have allowed us to list old floods and to determine plan flood.

After an hydrogeomorphological analysis of the field, and a carefully done study of the catchment physical context, an hydraulic study has been realised. It has needed of numerous field operations, and the use of an unidimensionnal hydraulic modelling software called HEC-RAS, that have permitted to define the differents hazards area.

It led to the achievement of detailed maps which constitute the AZI. It will permit public information about hazards area for people who are concerned by.

KEYWORDS : Floodable Area Atlas (French AZI), floods prevention, hydrogeomorphological approach, digital hydraulic modelling.

PRESENTATION EN ANGLAIS / ENGLISH PRESENTATION

Introduction.

Among the major natural risks which are concerning France, floods are certainly the most common and frequent disasters that affects human and equipment features.

The political will about prevention and public information concerning this risk is nowadays particularly strong. Actually, after the dramatical events of Nîmes in 1988 or Vaison-la-Romaine in 1992, the government and its departments are mobilized for a better taking in account of the flooding risk. On this perspective, some regulatory documents have been created.

The achievement of an “Atlas des Zones Inondables (AZI)” (Floodable Area Atlas), is a first step in the development of a “Plan de Prévention des Risques d’Inondation (PPRI)” (Flood Risks Prevention Plan). The AZI, which has only the aim to inform the public about flood hazard, constitute subsequently the basis for the achievement of the PPRI which fix town planning rules according to risk.

It is thus at the request of the DDE of Indre (36), that the “Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois” (Regional Laboratory of the Bridges and Roads of Blois), in which I carried out my training course, was charged to achieve the AZI of the Théols river.

This study reports the various steps and methods putted in work for this realization during my training course.

After a short presentation of this structure, and a detailed presentation (hydrographic network, land occupation, geology...) of the studied catchment area, we will endeavour to reconstitute the hydrological working of the river (census of old floods, water levels...).

Once this work done, we carried out a first characterization of the flooded zones by photo-interpretation. As this one wasn't be sufficiently precise, the recourse to a digital hydraulic modeling was decided. After some recalls on hydraulics in rivers, the methodology concerning acquisition of the data on field, as well as the implementation of modeling, is then clarified.

I) Study problematic.

The cartography of the flooded areas, in the form of an atlas (AZI) carried out by the services of the State, falls under the policy stopped by the Government as regards management of the flooded areas. The knowledge of the flooded areas zones meets two principal aims relating to the risk of floods:

- To prohibit the human establishments in the most dangerous zones where, whatever installations, the safety of the people cannot be guaranteed completely and to limit them or authorizing them if it subject to a good taking into account of the risk in the other flooded zones
- To preserve the capacities of flow and expansion areas in order to not worsen the risks for the zones located upstream and downstream.

The atlas of the flooded areas constitutes a tool of reference for the taking into account of the risk of flood in the regional planning (see fig. 1).

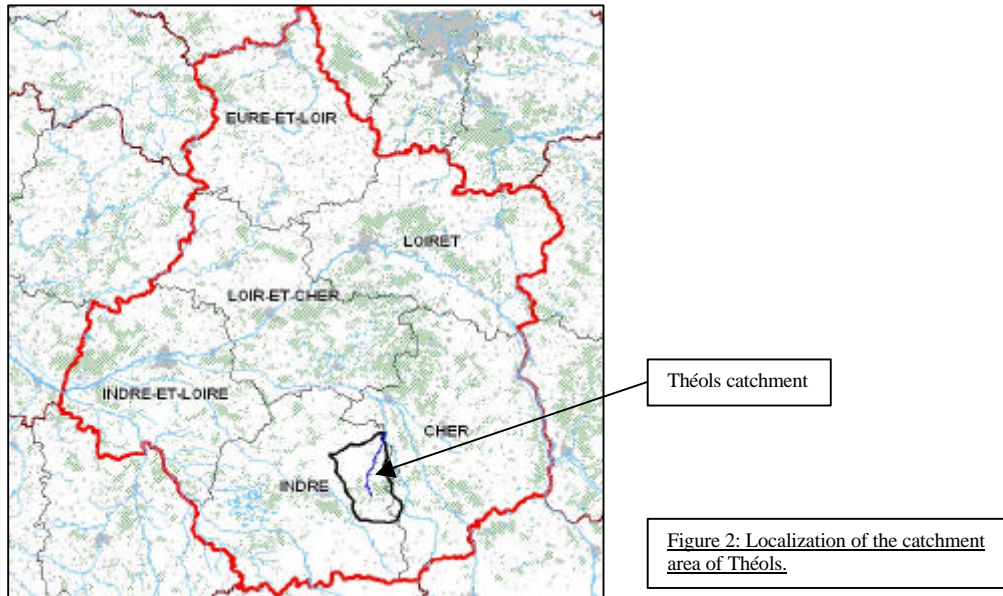
	Weak issue	Strong issue
Weak hazard	Weak risk	Weak risk
Strong hazard	Weak risk	<u>Strong Risk</u>

Figure 1 : Principle of characterization of the risk by combination of the concept of hazard and vulnerability.

It should be noted that this study approaches only the determination of the hazards of flood on the Théols river. The characterization of the different issues, and in fine of the risks and the measures to be taken to limit them fall within the competence of the PPRI.

II) General presentation.

The catchment area of Théols river is located in the “Region Centre”, in the department of Indre (36). It forms in its part the border with the department of Cher (18). It belongs to the country of Berry and more precisely to the Champagne berrichonne (see fig. 2)



The Théols catchment area offers a total surface of approximately 840km². Théols takes its source on the place “les sapins” at 150m of altitude and joins Arnon in the department of “Cher” on the commune of Lazenay, on the place “la Ferté”, at 112m. Its total length is 49 km approximately, which gives us an average slope of a little less than 0.1% (0.07%).

Théols which joins out left bank of Arnon river receives a certain number of tributaries. Those are listed on figure 3.

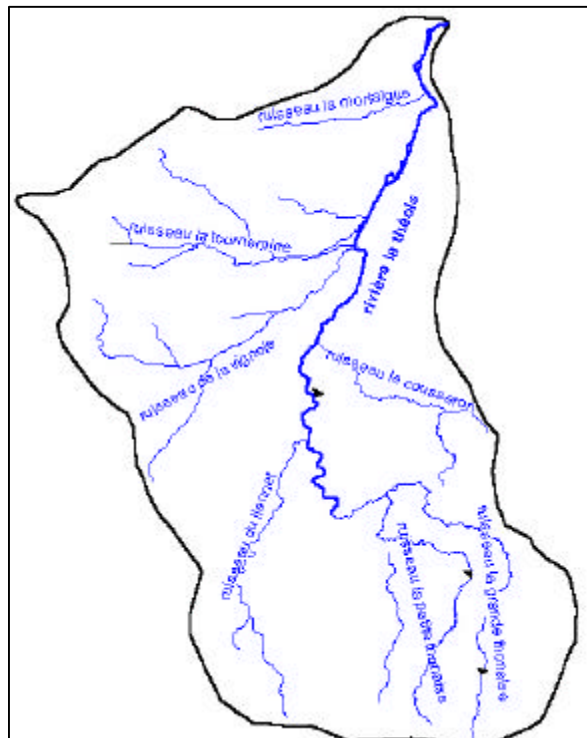


Figure 3 : Hydraulic network of the Théols river

The study sector is mainly agricultural, the only town of importance is Issoudun, which counts a little more than 13000 inhabitants.

Geology is relatively little diversified since the whole of the “Champagne berrichonne” fits in limestones of the Jurassic superior, valleys are filled by an old and modern alluvial filling on a thickness of 4m approximately. The boggy and marshy levels are very frequent and are relatively developed.

With regard to subsoil waters, knowledge is very partial. Indeed, the presence of complex karstic networks is proven. Those generate an underground circulation of water, with many resurgences throughout linear of the affluent and river. Those would influence then strongly the behavior of the catchment during floods and in particular its response (time of concentration, longitudinal distribution of the flows) at the time of the rainy phases, according to the activation or not of such or such underground network.

The valley of Théols was quarry and recalibrate since its junction with the river Arnon until its source between 1975 and 1986. The minor bed of the river was sometimes even moved.

III) Hydrological study.

One of the main characteristic of the catchment area of Théols, is the total absence of automatic station of measurement of the water levels managed by the services of state (DIREN or DDE). It results from this situation, a very significant lack of reliable data concerning the hydrological working of Théols.

Within the framework of the realization of an AZI, it is essential to count the most significant floods, to try to determine their hierarchy, and if possible, the heights of water and flows corresponding.

The four most important floods are, by order of intensity:

1. January 22, 1910
2. December 21, 1979
3. December 29, 1999
4. July 04, 1977

The floods of 1979, 1977 and 1999 are relatively comparable in intensity (approximately 60m³/s at Meunet-Planches)

The flood of 1910, is detached clearly from the other events, since the found watermarks (relatively very few unfortunately, but distributed on all the catchment), attest water heights definitely higher than the others, (generally 0.5 with 1m moreover in the upstream part) and constitutes the flood of “Plus Hautes Eaux Connues (PHEC)” (Highest Water Levels Known).

The flow value retained for the flood of 1910 is of 150m³/s at the catchment outlet. This value was obtained by an extrapolation by the formula of Myer. In addition, various preceding studies (Clemont R. 1994; COMIREM 2000) as of measurements of gauging made it possible to advance like centennial flow with Issoudun, a figure about 70m³/s. This figure corresponds roughly to floods of the type 1977, 1979 or 1999.

We can thus conclude that the 1910 flow on Théols was quite higher than the statistically calculated centennial rising. It constitutes moreover the flood of the PHEC.

The **1910 flood** will be thus the **plan flood**, with a plan flow **at the catchment outlet of 150m³/s**.

IV) Hydraulic study and realization of the digital flow model.

The realization of an AZI is based on the application of the method known as: "Hydrogeomorphological". This one is thus based quite naturally on a fine observation of the field, supplemented by the detailed morphological analysis of the floodplain of the river by the intermediary of the air photographs.

Nevertheless, if this approach is relevant whenever morphology is well marked, it also has some limit. Thus, this morphology gives an account of a dynamics which could be modified by the Man (damming up or re-calibration, as it was the case for Théols). It is also relatively inoperative in the residential areas or when the structural constraint is too strong.

We decide thus to call upon hydraulic modeling to supplement and refine datas.

When a hydraulic modeling is considered, a certain number of complementary data must then be collected.

We achieved then, some numerous field operations, using various methods (topography, differential GPS, GIS cartography) that permits us to acquire different type of datas as : river

cross sections, determination and evaluation of the hydraulic parameters (roughness and ineffective flow areas), water level heights during floods...

All that datas are implemented in the hydraulic model.

The general principle consists in the establishment of a mathematical model, which reproduce with the finest level of precision possible, the reality observed on the field. In the case of an AZI, we will ask the model to be able to calculate a theoretical waterlevel which corresponds to the PHEC.

The model was achieved with the software HEC-RAS (Hydrological Engineering Corps - River Analysis System). This one is a unidimensional (1D) Saint-Venant type which can solve the equations of Navier-Stokes of volume conservation, and momentum conservation.

The whole steps and data necessary to the realization of the model are synthesized in the figure hereafter (see fig. 4):

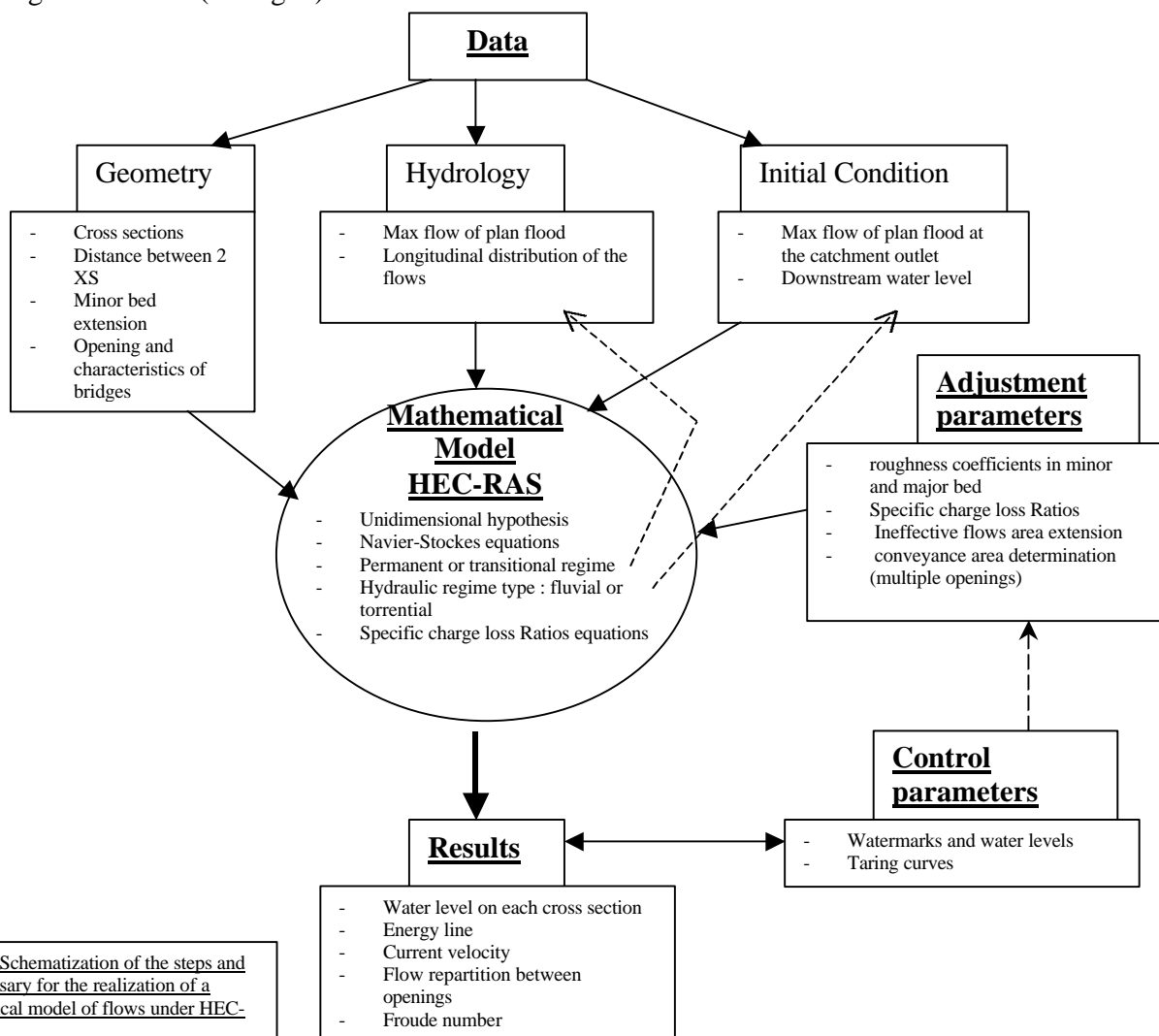


Figure 4 : Schematization of the steps and data necessary for the realization of a mathematical model of flows under HEC-RAS.

The results provided by HEC-RAS are presented in graphic form (longitudinal profile, charge line, water level for each cross sections, 3D view of bridges and water level...) or in the form of tables (current velocity, Froude number...).

Keeping in mind the limits of the models, and after some adjustments in order to fit it with field observations (as longitudinal flow adjustment), we managed to obtain a satisfactory result.

With the inevitable uncertainties, the rule will be to privilege the safety of the goods and people. Thus, whenever the model indicates to us a flood level higher than the watermarks (case in Issoudun, because of the new bridges) we takes into account the highest waterlevel. A contrario, when the the bed of the river modifications obviously allowed a lowering of the waterlevel, the old watermarks will then be taken into account for the realization of the AZI.

Hazards levels are given according to the intensity of the physical parameters of the plan flood . In the case of Théols, they are primarily the water height and the flow velocity.

We distinguish four hazards levels: weak, average, strong and very strong, according to current speeds and water heights (see fig. 5).

Heights \ Velocity	Velocity	
	Low	High
$H < 0.5\text{m}$	Weak	Average
$0.5 < H < 1\text{m}$	Average	Strong
$H > 1\text{m}$	Strong	Very Strong

Figure 5: Hazards classes qualification according to the current velocity and the height of immersion.
Source: Leï lani Bonnin.

The extension of the hazards areas on the maps which constitutes the AZI are determined by orthogonal projection in the plan of water heights calculated by the model.

V) Results.

the analysis of the maps emphasizes the following points : In the rural sectors upstream, we notes only few threatened infrastructures (only some slightly submerged roads, a certain number of mills, dwellings or barns slightly flooded).

With the approach of the urbanized sector of Issoudun, on the other hand, many cases can cause problems, indeed, the situation for the agglomeration of Issoudun is relatively alarming, with a great number of dwellings classified in strong or average risk, and a vulnerable road and railway communication network.

INTRODUCTION

Parmi les risques naturels majeurs auxquels la France doit faire face, les inondations sont certainement les catastrophes les plus fréquentes et les plus dévastatrices sur les plans humain et matériel.

La volonté politique de prévention et d'information des populations vis-à-vis de ce risque est aujourd'hui particulièrement forte. En effet, après les événements catastrophiques de Nîmes en 1988 ou de Vaison-la-Romaine en 1992, l'Etat et ses services se sont mobilisés pour une meilleure prise en compte des risques d'inondations. Il a ainsi été décidé la création et la réalisation de différents documents à valeur réglementaire dans ce but.

La réalisation d'un Atlas des Zones Inondables (AZI), est ainsi une première étape dans la constitution d'un Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI). L'AZI, s'il n'a pour but que le porté à connaissance des aléas aux populations, constitue ensuite la base pour la réalisation du PPRI qui fixe les règles d'urbanisme à respecter en fonction du risque.

C'est ainsi à la demande de la DDE de l'Indre (36), que le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (LRPC de Blois), au sein duquel j'ai effectué mon stage, a été chargé de réaliser l'AZI de la rivière Théols.

Cette étude relate ainsi les différentes étapes et méthodes mises en œuvre pour cette réalisation lors de mon stage.

Après une brève présentation de l'organisme d'accueil, et la présentation détaillée (réseau hydrographique, occupation du sol, géologie...) du bassin versant étudié, nous nous attacherons à reconstituer le fonctionnement hydrologique du cours d'eau (recensement des crues anciennes, niveaux d'eau...).

Une fois ce travail effectué, nous avons réalisé une première caractérisation des zones inondables par photo-interprétation. Celle-ci n'étant pas suffisamment précise, le recours à une modélisation hydraulique numérique fut décidé. Après quelques rappels sur l'hydraulique fluvial, la méthodologie d'acquisition des données de terrain nécessaires, ainsi que la mise en œuvre de la modélisation, est ensuite explicitée.

Après avoir discuté des limites d'une telle approche, nous commenterons les résultats obtenus.

I) Présentation de l'organisme d'accueil.

1. Le CETE Normandie Centre

Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Blois est une division du Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) Normandie Centre qui est sous la tutelle du Ministère de l'Equipement, des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer. Il est également en relation avec les ministères de la Recherche et de l'Ecologie et du Développement Durable.

Il existe 7 Centres d'Etudes Techniques de l'Equipement répartis sur l'ensemble de la France (CETE méditerranée, Sud-Ouest, Nord-Picardie, Lyon, Normandie-Centre, Est, Ouest) et la DREIF (Direction Régionale de l'Equipement d'Ile de France). Ils ont, en leur sein, 17 Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées et 4 Centres Spécialisés.

Le CETE Normandie Centre, créé en 1971, est constitué de plusieurs divisions localisées à Rouen et à Blois (voir figure 1).

1.1 Le site de Rouen

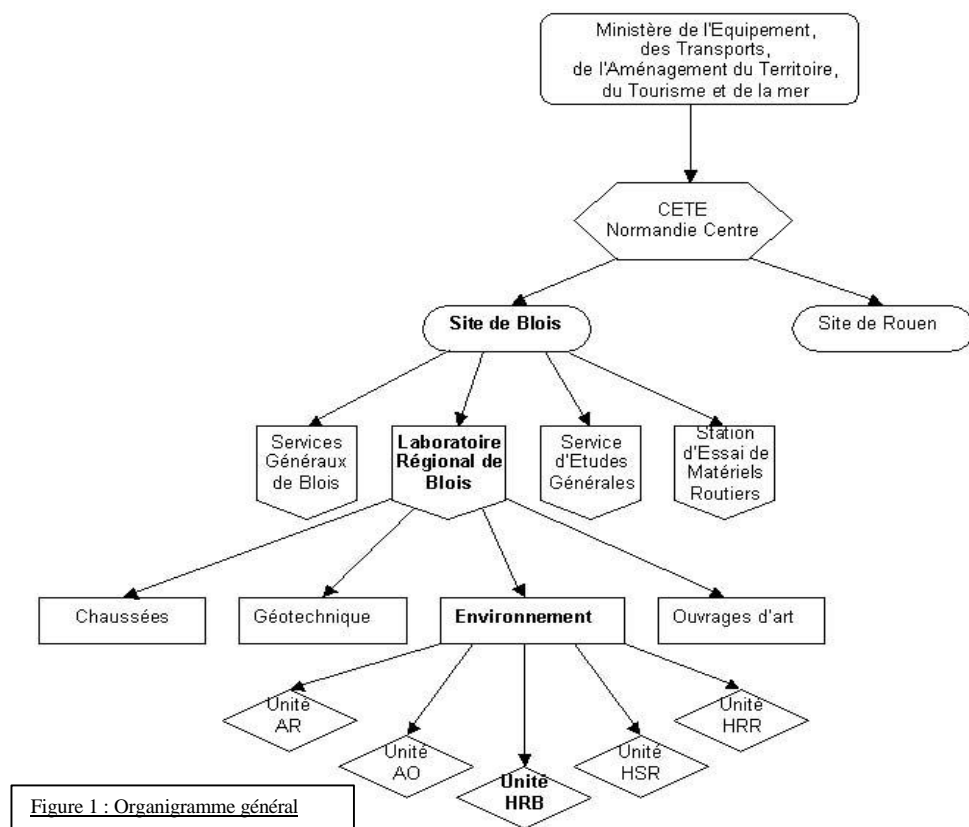
Il comprend :

- la division Aménagement Construction Transports (ACT) ;
- la division Environnement Infrastructures et Ouvrages d'Art (DEIOA) ;
- la division Exploitation Sécurité Gestion des Infrastructures (DESGI) ;
- la division Gestion Télématique Informatique (GTI) ;
- le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Rouen (LRPC) ;
- le Centre d'Expérimentation Routière (CER) ;
- le Centre d'Etudes et de Construction de Prototypes (CECP) ;
- les Services Généraux (SG).

1.2 Le site Blois

Le site de Blois est une subdivision qui regroupe quatre grands services :

- le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois (LRPC);
- le Service d'Etudes Générales (SEG);
- la Station d'Essais de Matériels Routiers (SEMR) ;
- les Services Généraux de Blois.



2. Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Blois.

Le Laboratoire des Ponts et Chaussées de Blois, créée en 1959, est rattaché au CETE depuis sa création en 1971. Il est divisé en quatre départements selon leurs activités (voir figure 2).

Départements	Géotechnique	Chaussées	Ouvrages d'Art	Environnement
Activités	géologie, hydrogéologie et prospection de matériaux, géotechnique routière	dimensionnement – Aide au choix technique d'entretien	bétons armés, précontraint, à hautes performances	reconnaitances des fonds aquatiques : cartographie bathymétrique
	tracés routiers	recueil de données routières	constructions métalliques	détermination des zones inondables
	terrassement	auscultation des chaussées : déflexions, carottages	ciments et coulis d'injection ; analyses physico-chimiques des bétons et des ciments	impact hydraulique des ouvrages
	mécanique des sols et roches : ouvrages en terre, fondations-renforcement des sols	études de formulations de matériaux de chaussées	produits, systèmes et méthodes de réparation	assainissement routier
	risques naturels : mouvement des sols, pollution des sols	contrôle extérieur : aide à la rédaction des DCE : validation des PAQ, contrôle de travaux	peintures, systèmes anticorrosion, et panneaux de signalisation	études d'environnement, bruit de chantier, industriel
			visites, inspection et instrumentation des ouvrages (ponts, buses, portiques)	bruit routier : études prévisionnelles, mesures, recherche de moyens de protection
			normalisation et recherche ; investigations gammagraphiques	Sédimentologie

Figure 2 : Les quatre départements du LRPC de Blois et leurs activités.

Le Département Environnement qui m'a accueilli est lui même composé de cinq unités :

- Acoustique Recherche (AR)
- Acoustique Opérationnelle (AO)
- Hydraulique-Sédimentologie-Recherche (HSR)
- **Hydraulique-Risque d'inondation-Bathymétrie (HRB)**
- Hydraulique-Risque d'inondation-Ruisselement (HRR).

J'ai effectué mon stage au sein de l'unité « Hydraulique - Risque d'inondation - Bathymétrie (HRB) », dirigé par Jean-Claude Jouanneau également directeur du département Environnement.

II) Contexte et problématique de l'étude.

1. Contexte de l'étude.

L'étude et la détermination des zones inondables de la Théols sont effectuées dans le cadre de la réalisation d'un Atlas des Zones Inondables (AZI). Cet Atlas a pour vocation de servir de base à l'élaboration d'un document réglementaire à valeur légale fixant des règles d'urbanismes et d'aménagement stricte dans les zones inondables : Le Plan de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI).

Cette étude fait suite à différents travaux et études préliminaires, concernant tout ou partie des sujets abordés dans la présente étude :

- Etude Hydraulique en vue de l'établissement d'une carte d'inondabilité sur la Théols et sur l'Indre dans la région de la Châtre. Réalisée en 1994 par Régis Clemont (IMACOF, Tours) pour le compte du LRPC de Blois. Premiers travaux de recherche bibliographique sur l'hydrologie et les crues anciennes sur la Théols.
- Etude générale et cartographie réglementaire d'inondabilité de la vallée de la Théols. Commune d'Issoudun, Meunet-Planches et Ste-Lizaigne. En trois volumes, réalisés par le bureau d'étude COMIREM en 2000 et ayant vocation à établir l'AZI réglementaire de la vallée de la Théols. Après contrôle par le service environnement du LRPC de Blois, l'étude est rejetée, et reprise à son compte par le LRPC de Blois.
- Synthèse bibliographique sur l'hydraulique et l'hydrologie de la Théols. Réalisé en 2005 par Guillaume Féréol pour le compte du LRPC de Blois. Mise à jour et complément sur l'hydrologie et l'hydraulique de la Théols.
- Atlas des zones inondables de la Théols. Réalisé en 2005 par Lei Iani Bonnin pour le compte du LRPC de Blois. Réalisation de la cartographie réglementaire de l'AZI, mais traite uniquement de la Théols de sa confluence avec l'Arnon jusqu'à Ste-Lizaigne (partie aval). La présente étude complète ce travail.

2. Problématique de l'étude.

La cartographie des zones inondables, sous forme d'atlas (AZI) réalisés par les services de l'État, s'inscrit dans la politique arrêtée par le Gouvernement en matière de gestion des zones inondables. La connaissance des zones inondables répond à deux objectifs principaux relatifs au risque d'inondations :

- Interdire les implantations humaines dans les zones les plus dangereuses où, quels que soient les aménagements, la sécurité des personnes ne peut être garantie intégralement et les limiter ainsi que les autoriser sous réserve d'une bonne prise en compte du risque dans les autres zones inondables
- Préserver les capacités d'écoulement et d'expansion des crues pour ne pas aggraver les risques pour les zones situées en amont et en aval.

La réalisation et le porter à connaissance des atlas de zones inondables répond également au droit des citoyens à l'information sur les risques majeurs auxquels ils sont soumis (art. L. 125-2 du code de l'environnement).

L'atlas des zones inondables constitue un outil de référence pour la prise en compte du risque d'inondation dans l'aménagement du territoire. Selon les cas, il sert :

- D'élément à l'utilisation de l'article R. 111-2 du code de l'urbanisme dans l'application du droit des sols par les services de l'État ou par les collectivités pour la prise en compte des risques d'inondations dans les documents d'urbanisme
- De source d'information pour l'élaboration des plans de prévention des risques naturels prévisibles (PPR).

Il prend essentiellement la forme d'une cartographie fine (généralement au 10000^{ème}) de l'enveloppe alluviale, indiquant l'extension spatiale, pour un bassin donné, d'une crue correspondant aux Plus Hautes Eaux Connues (PHEC), si elles sont supérieures à la crue centennale, ou à défaut la crue centennale théorique. On se base donc si possible sur les PHEC, ce choix répond à la volonté de se référer à des événements qui se sont déjà produits, et qui sont donc *a priori* non contestables et susceptibles de se produire de nouveau. Il privilégie ainsi la mise en sécurité des populations en retenant des fréquences rares ou exceptionnelles. Cette cartographie indique également les profondeurs de submersion et les vitesses de courant ainsi que parfois, les temps de submersion.

Elle définit alors en fonction de ces paramètres des classes dites : « d'aléa », qui serviront de base aux prescriptions du PPRI (pour plus de détails se reporter à la suite de ce travail, concernant spécifiquement la réalisation de l'AZI).

Se rajoute parfois également à cette cartographie des PHEC, une cartographie de la crue de fréquence décennale.

3. Définition de la notion d'aléa, de vulnérabilité ou d'enjeu, et de risque.

- L'aléa est défini par la probabilité qu'un événement donné (une crue par exemple), d'une intensité donnée, se produise en un lieu donné. Il est généralement caractérisé par une fréquence de retour en fonction de son intensité, appelé récurrence (crue de fréquence décennale, centennale...). Cette fréquence exprime la probabilité que cet événement se produise (une crue centennale aura statistiquement, chaque année, 1 chance sur 100 de se produire).
- La vulnérabilité ou l'enjeu sont définis par la présence, sur une partie de l'espace envisagé, d'éléments considérés comme vulnérables. Cette définition varie bien évidemment en fonction du contexte et fait toujours appel à une hiérarchie des enjeux. Sont toujours considérés comme des enjeux primordiaux, les habitations, écoles, hôpitaux..., et plus généralement tous les lieux qui accueillent le public, l'enjeu premier étant toujours la population. Divers autres enjeux peuvent être également importants, tels que les routes ou réseaux de transport permettant l'évacuation des personnes, les centres de secours, de décisions... Viennent ensuite généralement les outils de productions et autres équipements.

- Le risque (ou risque naturel dans le cas d'un aléa d'origine naturel), est défini par la combinaison des deux premiers termes. Il rend compte de la probabilité qu'un événement de récurrence donné se produise à l'emplacement d'un élément considéré (ou non) comme vulnérable (voir figure 3).

On comprend ainsi que le risque d'avalanche peut, par exemple, être considéré comme nul pour une école installé en plaine (vulnérabilité forte, mais aléa improbable). De la même façon, le risque d'avalanche sera également considéré comme nul dans l'axe d'un couloir d'avalanche où aucune infrastructure n'a été répertoriée (aléa très fort, mais vulnérabilité nulle).

	Enjeux Faible	Enjeux Fort
Aléa Faible	Risque Faible	Risque Faible
Aléa Fort	Risque Faible	<u>Risque Fort</u>

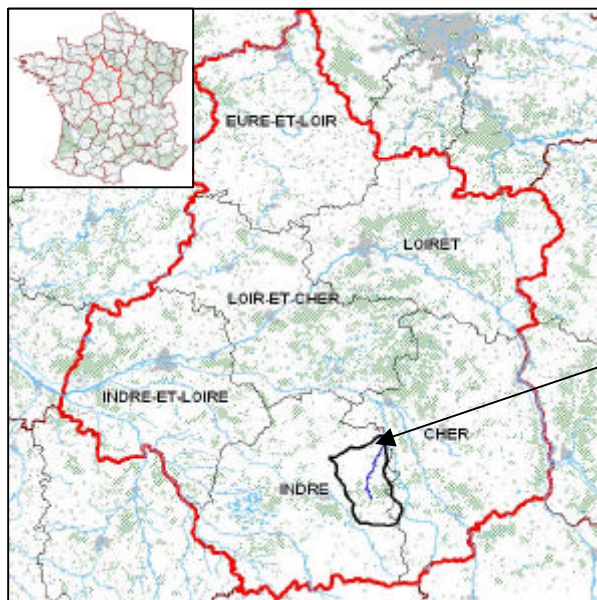
Figure 3: Principe de caractérisation du risque par combinaison de la notion d'aléa et de vulnérabilité.

Il est à noter que cette étude n'aborde uniquement que la détermination de l'aléa d'inondation sur la rivière Théols. La caractérisation des enjeux, et *in fine* des risques et des mesures à prendre pour les limiter sont du ressort du PPRI.

III) Présentation générale.

1. Situation.

Le bassin versant de la Théols se situe en région Centre, dans le département de l'Indre (36). Il forme dans sa partie est la frontière avec le département du Cher (18). Il appartient au pays du Berry et plus précisément à la Champagne berrichonne (par analogie avec les paysages de Champagne). (voir figure 4).



Bassin versant de la Théols

Figure 4: Localisation du bassin versant de la Théols.

2. Description du bassin versant de la Théols et des sous-bassin versants : approche morphométrique et réseau hydrographique.

Le bassin versant de la Théols est d'une superficie totale d'environ 840km², son périmètre est de 131 km environ. La Théols prend sa source au lieu dit les sapins à 150m d'altitude et conflue avec l'Arnon dans le département du Cher sur la commune de Lazenay, au lieu dit de la Ferté, à 112m. Son linéaire total est de 49 km environ, ce qui nous donne une pente moyenne d'un peu moins de 0.1% (0.07%). La vallée est orientée grossièrement Sud-Nord. Le bassin-versant est relativement allongé, puisque son Indice de Compacité ((F), voir figure 6) est de 1.26. Cette conformation amène théoriquement à un fonctionnement du bassin où l'onde de crue est étalée dans le temps et où le pic de crue est atténué par rapport à un bassin plus circulaire. (cas A sur la figure 5).

La Théols qui conflue en rive gauche de l'Arnon reçoit un certain nombre de tributaires. Ceux-ci sont recensés sur la figure 3 page suivante. La totalité du linéaire des drains nous amène à une longueur totale d'environ 245km. Les drains secondaires sont ainsi relativement développés (indice de densité de drainage de 0.29), mais sont en

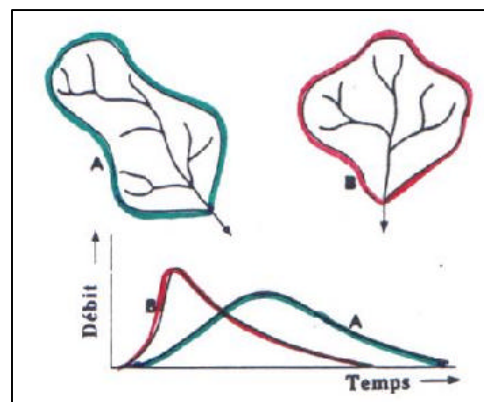


Figure 5 : Relation entre le coefficient de Gravelius et le débit à l'exutoire (d'après Knapp, 1979)

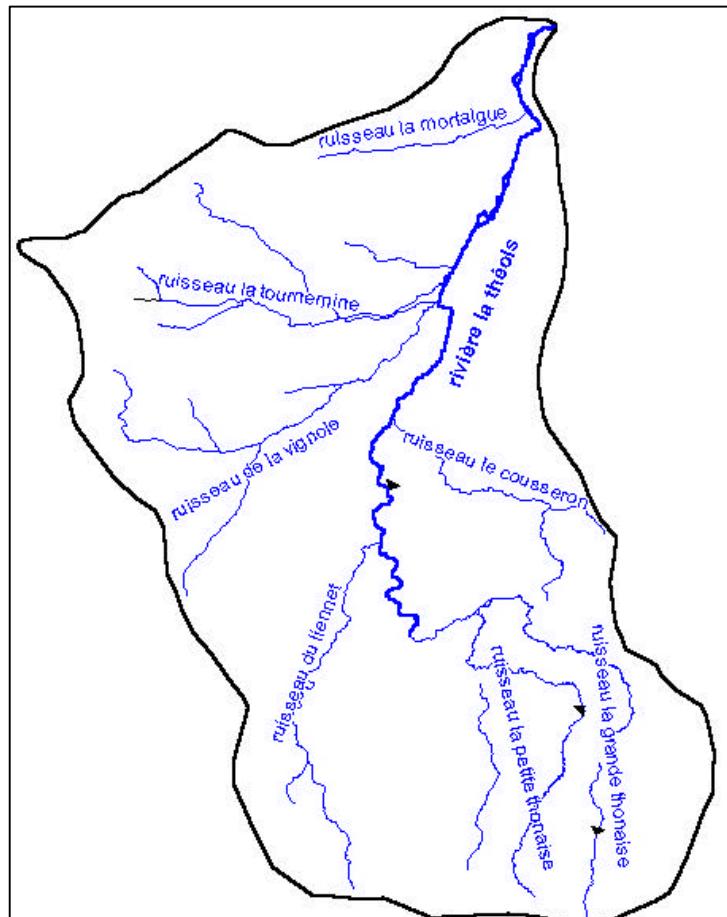


Figure 6: Synthèse des paramètres morphométriques du bassin versant de la Théols.
Détermination des surfaces et distances d'après le scan25 IGN.

Caractéristiques du bassin-versant :

Surface du bassin : 840km²

Périmètre du bassin : 131km

Indice de compacité (Gravelius 1932) : $[F=0.28*(p/\sqrt{A})]$
(A : Surface du bassin ; p : périmètre du bassin)

F= 1.26

Longueur des drains permanents :

Théols : 48.9 km

Rive gauche :

Liennet : 24.4 km

Vignole : 37.5 km

Tournemine : 37 km

Mortalgue : 10.85 km

Rive droite :

Cousseron : 20.6 km

Grande Thonaise : 27.45 km

Petite Thonaise : 38.5 km

Total : 245.2 km

Indice de densité de drainage : $[D=Ld/A]$ (Ld : longueur totale des drains ; A : surface du bassin)

D= 0.29

Indice de fréquence de drainage : $[N=Nd/A]$ (Nd : nombre de drains ; A : surface du bassin)

N= 0.01

Indice de sinuosité : $[Si/i]$ (Si : distance curviligne ; i : distance Euclidienne)

Is= 1.44

revanche relativement peu nombreux (indice de fréquence de drainage de 0.01).

L'ordination de Strahler donne ainsi un rang 4 à la Théols au niveau de sa confluence avec l'Arnon, ce qui est relativement faible pour un bassin de cette superficie (voir figure 7). Les affluents les plus importants selon cette classification semblent être la Tournemine et la Vignole puisque ceux-ci se rejoignent pour atteindre le rang 3 juste en amont de leur confluence avec la Théols. Ces deux cours d'eau drainent la partie ouest du bassin-versant de la Théols. Ce sont également eux qui, avec la Thonaise, possèdent les sous-bassins les plus développés (voir figure 8). On pourra ici noter une particularité du bassin de la Théols. En effet, le bassin de la Thonaise, considérée comme affluent de la Théols est bien plus vaste que celui de la Théols au niveau de leur confluence. Habituellement, dans une telle configuration, le cours d'eau prend le nom de l'affluent le plus important, or il conserve ici le nom de Théols.

La structure des sous-bassins versants est importante, comme nous le verrons par la suite, dans les apports respectifs de chaque cours d'eau en phase de crue.

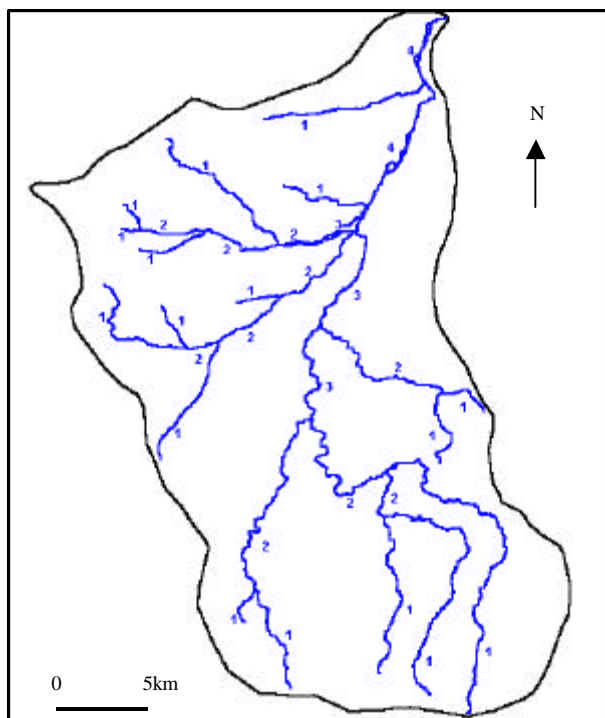


Figure 7: Ordination de Strahler de la Théols et de ses affluents. D'après le Scan25 IGN.

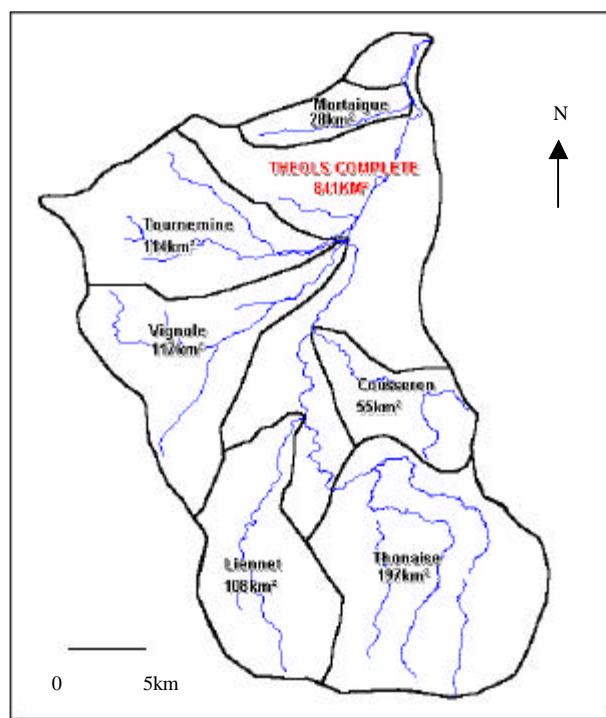


Figure 8: Superficie des sous bassins-versants de la Théols. Sous-bassins > à 20km².

Le cours de la Théols est relativement sinueux (indice de sinuosité 1.44), notamment dans sa partie amont, et ce malgré les travaux de rectification qui furent effectués.

La topographie du bassin est relativement peu marquée. Les pentes sont relativement faibles, et la vallée peu encaissée. Cette dernière est assez large (en moyenne 300m), avec quelques étroiture naturelles ou artificielles qui correspondent également à un raidissement local de la pente (étroiture naturelle du site de la ville d'Issoudun, accentuée par la présence d'ouvrages de franchissement de la rivière anciens, ou encore, étroiture à Meunet-Planches, après la confluence avec le Liennet). (voir figure 9).

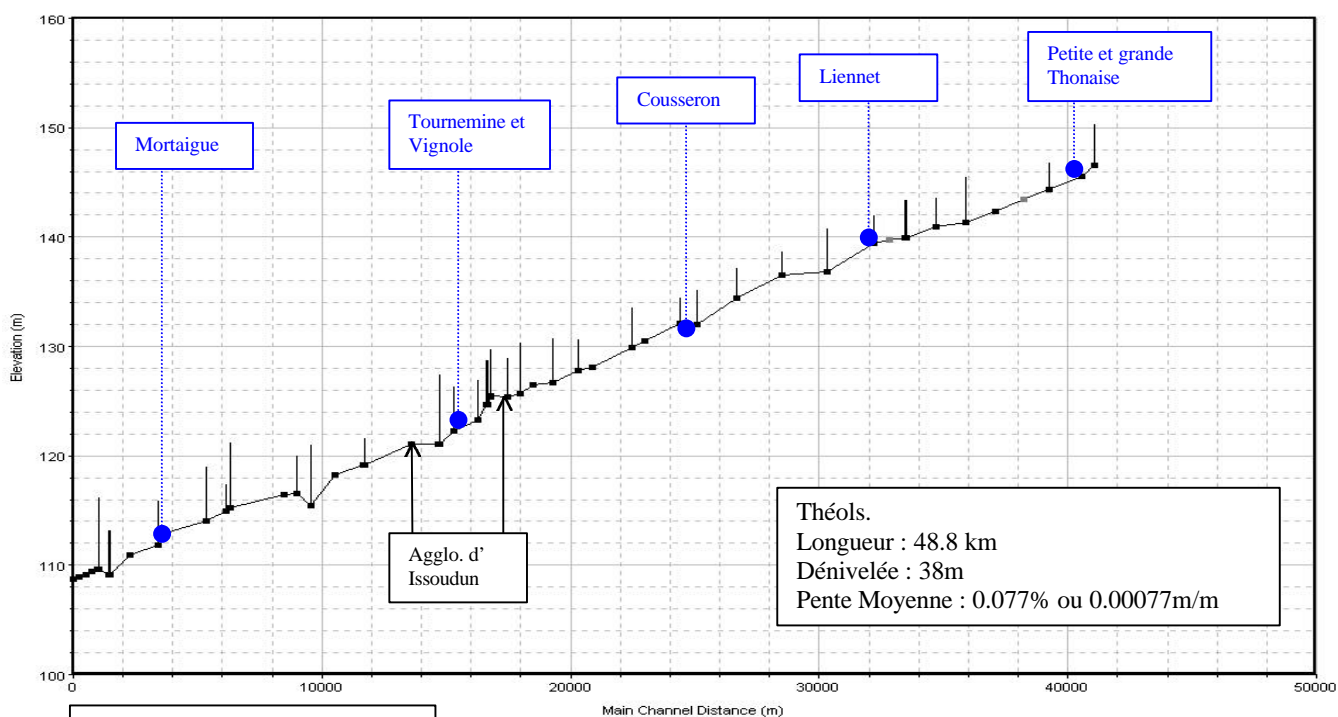


Figure 9 : Profil en long de la Théols.

Il est à noter que tous ces éléments de caractérisation ne concernent que le bassin-versant topographique de la Théols, le seul à être bien connu. Le bassin-versant réel, c'est à dire celui qui intègre les éventuelles circulation d'eaux souterraines (substrat calcaire) est quant-à lui pour une grande partie inconnu (voir plus loin, la partie traitant de l'hydrogéologie).

3. L'occupation du sol.

Le secteur d'étude est principalement agricole. Il s'étend sur 13 communes différentes, soit d'amont en aval : Bommiers, Ambrault, Meunet-Planches, Brives, Condé, Thizay, Issoudun, St Georges/Arnon, Ste-Lizaigne, Migny, Diou, Lazenay et Reuilly (voir annexe 1). La seule commune d'importance est Issoudun, qui compte un peu plus de 13000 habitants (*Source : INSEE, 1999*). Cette dernière occupe une surface construite très modeste sur le bassin, et son expansion est limitée. La macadamisation des sols ne joue donc pas un rôle significatif dans le fonctionnement hydrologique de la Théols. La très grande majorité du bassin est cultivée en céréales sur un mode intensif, sur de grande parcelles en « open-fields ». L'organisation spatiale des usages du sol répond à la nature pédologique de ceux-ci : les sols calcaires sont intensément cultivés (blé, orge, colza), les sols acides sont abandonnés à la forêt (forêt de Bommiers au sud du bassin), alors que les alluvions des vallées sont la plupart du temps laissés en pâture ou en friche, avec une forte progression du boisement en peupliers. (voir figure 10).

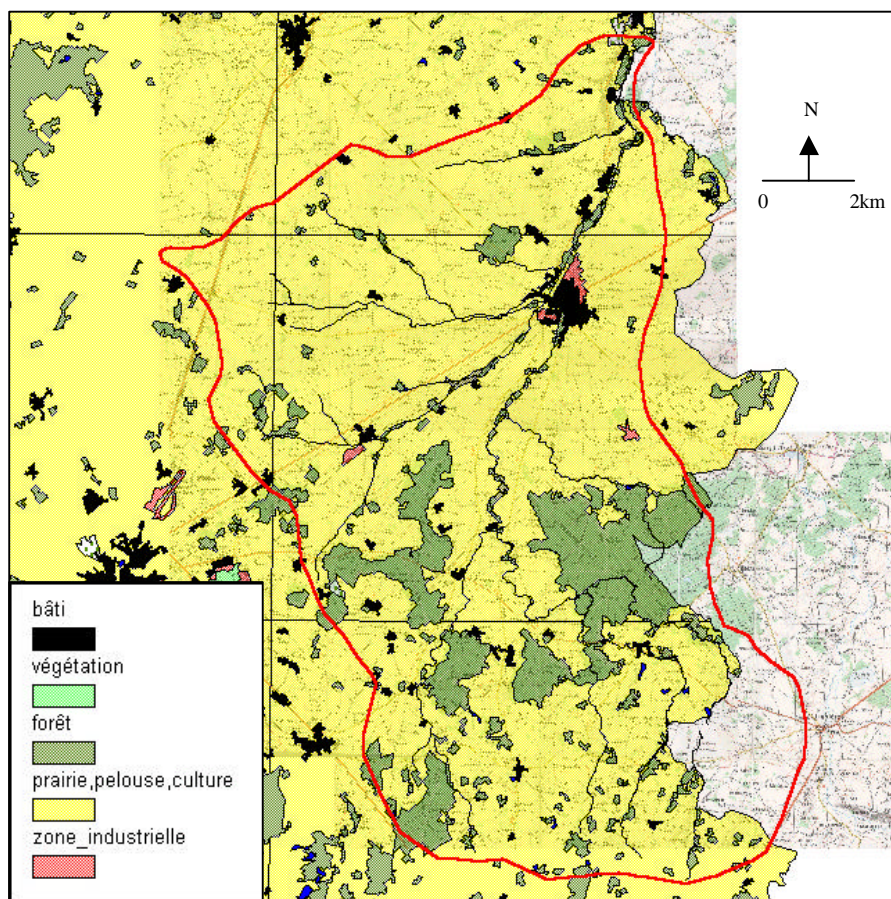


Figure 10 : Carte de l'occupation des sols du bassin de la Théols.
Source : BdCarto2004, dpt. 36.

En dehors d'Issoudun, l'habitat est très dispersé. Généralement sous la forme de fermes ou de hameaux isolées. On notera l'utilisation presque intégrale du lit majeur de la Théols au sein de

la commune d'Issoudun à des fins de maraîchage. Ces nombreux jardins, de type « jardins ouvriers », marquent alors bien souvent la limite de la plaine inondable.

4. Contexte climatique : températures, précipitations.

Le bassin versant de la Théols est situé dans la région Centre. Cette région est soumise à un climat de type océanique caractérisé par des précipitations de valeurs modestes mais sur une longue durée.

Le régime hydrologique du Département de l'Indre n'est pas homogène. Il se caractérise par l'augmentation de la hauteur des précipitations annuelles du Nord vers le sud. La ligne « La Châtre, Argenton-sur-Creuse, Ingrandes » sépare, au Nord, des régions d'altitude 80 à 200 mètres de « climat Séquanien », avec, au Sud, les contreforts du Massif Central d'altitude 200 à 450 mètres de climat central. La Théols se situe dans la partie nord.

La répartition des précipitations sur les 12 mois de l'année y est assez homogène tant en quantité qu'en fréquence. La hauteur annuelle d'eau reçue est d'environ 500 à 600 millimètres à l'extrême nord, et 600 à 700 en Champagne Berrichonne et au Boischaut Nord (voir figure 11). Celles-ci sont essentiellement dues à des perturbations océaniques venant d'ouest.

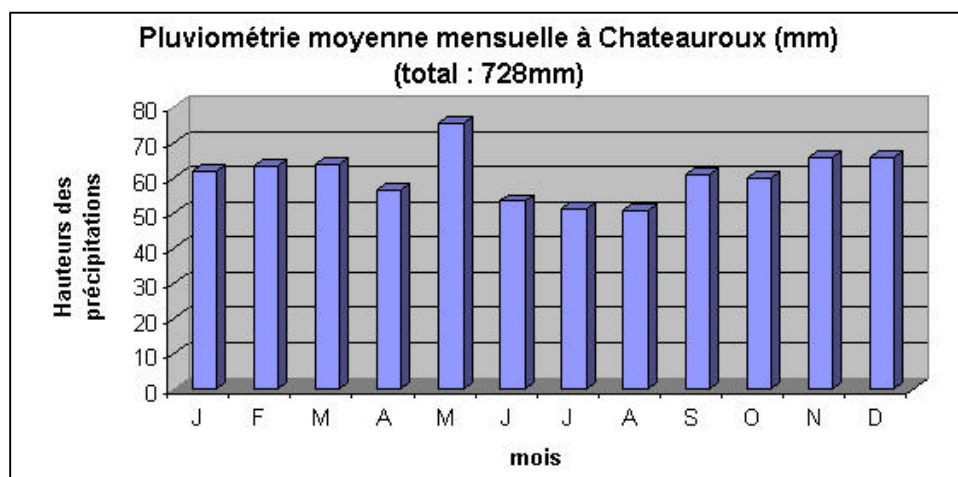


Figure 11 : Diagramme de la pluviométrie moyenne mensuelle à Chateauroux.
Source : Météo France.

D'un point de vue plus local, les témoignages recueillis sur le terrain font état d'une hétérogénéité dans la répartition des précipitations sur l'ensemble du bassin. Ainsi le massif forestier des Bommiers, au sud, semble constituer un point préférentiel de survenue des précipitations orageuses. Celles-ci affectent alors le sous-bassin du Liennet, de la Théols amont ainsi que de la Thonaise. Ce type de précipitations orageuses survenant surtout au printemps peut rappeler les événements de type « Cévenol » avec survenue d'orage brutaux et localisés sur des sols préalablement saturés par des précipitations océaniques. Ce type d'événements peut conduire à des crues importantes de la Théols.

Les hivers sont généralement assez doux. Les périodes froides sont moins nombreuses et plus courtes qu'au Nord de la Loire, 10 à 14 chutes de neige en moyenne par an dont 50% ne dépassent pas 1 centimètre d'épaisseur. La persistance sur le sol excède rarement une semaine. Le nombre annuel de jours de gelée est de 50 dans la zone nord.

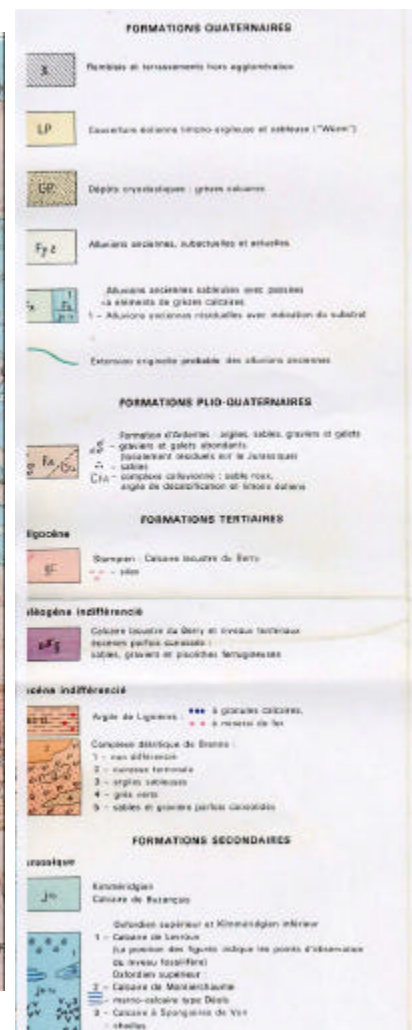
L'amplitude de la variation annuelle de la température moyenne de l'air est d'environ 15°C. La température moyenne de janvier est de 3 à 4°C. Celle de Juillet est de l'ordre de 19 à 20°C.

5. Contexte géologique. (source : carte géologique au 50000^{ème} et notice, feuille Issoudun)

La géologie est relativement peu diversifiée puisque l'ensemble de la Champagne berrichonne s'inscrit dans les calcaires du jurassique supérieur (Oxfordien supérieur et Kimméridgien inférieur : calcaires lités fossilifères sur une épaisseur de plus de 200m) (voir figure 12, en bleu sur la carte, noté J^{6-7a}). Se surimposent ponctuellement à ces formations calcaires, des formations plus récentes d'origine continentales et d'âge Plio-Quaternaire : argile, sables et graviers dont l'épaisseur peut atteindre 7m (en beige sur la carte, noté FA). On note également localement, sur la partie amont du bassin (Secteur de la forêt des Bommiers et Thonaise) l'affleurement de formations d'âge Eocène et constituées principalement d'argiles sables et grès (en orange sur la carte, noté e⁵⁻⁷). Cette dernière formation, imperméable, correspond pédologiquement aux sols acides décrits précédemment. Ce secteur amont correspond également, comme on l'a vu à la partie précédente, à un point de précipitations privilégié des orages. Cela amène donc à penser que les eaux précipitées préférentiellement dans ce secteur lors des orages arrivent relativement rapidement (bien qu'une certaine part soit interceptée par la végétation) au thalweg, et qu'une interrelation pluie-débit assez directe soit de mise dans ce secteur. Le réseau hydrographique principal suit une direction sud-nord qui correspond aux grands axes de fracture tectonique.



Figure 12 : Extrait de la carte géologique au 50000^{ème}, Issoudun. Partie sud du bassin de la Théols.



Les vallées sont comblées par un remplissage alluvial ancien et moderne sur une épaisseur de 4m environ. Les niveaux tourbeux et marécageux sont très fréquents et relativement développés (voir figure 13).

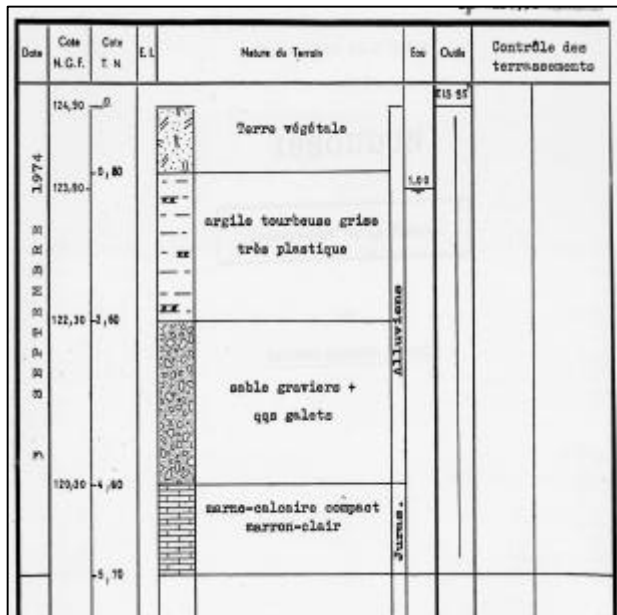


Figure 13 : Exemple de sondage réalisés sur la Théols par le laboratoire Sogéo (1974) en vue de l'aménagement de la Théols. (Situé dans le secteur du quartier St-Denis à Issoudun)

6. Eléments d'hydrogéologie.

Concernant les eaux superficielles, la présence d'un réseau de thalweg dense peut laisser penser à un drainage intense de la Champagne berrichonne en général ainsi que de la zone d'étude. Néanmoins, celui-ci est la plupart du temps sénile et incapable d'évacuer efficacement les eaux de ruissellement durant les épisodes pluvieux intenses. Les thalwegs principaux, comme la Théols, débordent alors largement en noyant leurs plaines alluviales.

En ce qui concerne les eaux souterraines, les connaissances sont très partielles. En effet, la présence de réseaux karstiques complexes est avérée. Ceux-ci engendrent une circulation souterraine des eaux, avec de nombreuses résurgences tout au long du linéaire du cours d'eau et de ses affluents. (voir photos 1 et 2).

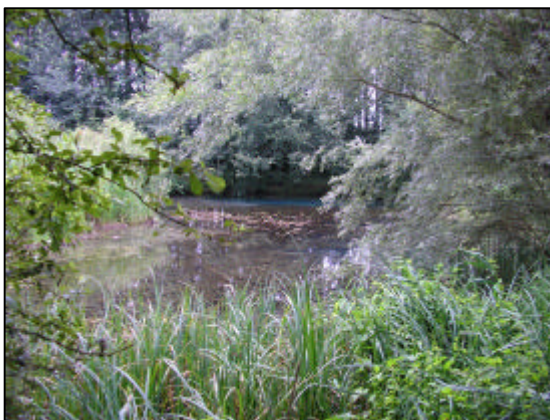


Photo 1 et 2 : Type d'exurgences karstiques rencontrées sur le bassin de la Théols. A gauche : source de l'Orté. A droite : source de la Théols.

Ces apports souterrains, la plupart immergés ont un important rôle de soutien d'étiage. En crue leurs apports sont difficilement évaluables, mais sont certainement réduits du fait de la pression hydrostatique des eaux superficielles qui empêche les sources de débiter. Elles jouent en revanche certainement un rôle assez important dans l'allongement de l'hydrogramme de crue.

D'autre part, des circulations souterraines importantes, sur plusieurs niveaux et ne suivant pas nécessairement strictement l'organisation du réseau hydrographique de surface sont tout à fait probables. Celles-ci influeraient alors fortement sur le comportement du bassin lors des crues et notamment sa réponse (temps de concentration, répartition longitudinale des débits) lors des phases pluvieuses, en fonction de l'activation ou non de tel ou tel réseau souterrain.

La réalimentation de la vallée par la nappe du substratum est à l'origine de la nature tourbeuse de la vallée. Ceci induit une vallée très plate, sans chenaux marqués.

7. Anthropolisation du bassin, actions et effets de l'homme sur le milieu.

Depuis l'époque gallo-romaine, la Théols a fait l'objet d'aménagements hydrauliques entre sa source et Issoudun. Au 19^{ème} siècle, on trouve 14 moulins et forges. Aujourd'hui, 12 sont encore présents. La faible pente du cours d'eau, voisine de 0,1 %, n'autorisait pas de chutes d'eau de hauteur supérieure à 1,5 mètres, les moulins construits étaient dits à forçage par en dessous : l'eau du bief fournissait son énergie à la base de la roue à aubes.

La vallée de la Théols a été curée et recalibrée depuis sa confluence avec la rivière l'Arnon jusqu'à sa source entre 1975 et 1986. Le lit mineur de la rivière a parfois même été déplacé.

7.1 Objectifs de l'aménagement de la Théols.

Les objectifs des travaux de curage et de rectification du cours de la Théols étaient, de façon générale, d'assurer un écoulement rapide des débits de crue et de soutenir les débits d'étiage du cours d'eau.

Le Syndicat Intercommunal d'Aménagement de la Vallée de la Théols avait fixé les objectifs quantitatifs suivants en matière de transit des débits de crue:

- en zone rurale : écoulement de 60% de la crue annuelle
- en zone urbaine (Issoudun) : écoulement de 10% de la crue décennale

Dans les conditions météorologiques enregistrées depuis l'achèvement des travaux, ces objectifs ont été atteints. En particulier les cantons d'Issoudun n'ont plus connu les débords constatés au début du 20^{ème} siècle. Cependant, il faut être prudent sur ces conclusions. En effet, le curage de la rivière permet d'effacer les petites crues ou de les faire durer moins longtemps, mais cela ne joue quasiment en rien sur les crues rares ou exceptionnelles (centennales et plus).

7.2 Nature des travaux

Les travaux ont consisté en l'aménagement du lit mineur et la construction d'un nombre très important (25) d'ouvrages de régulation du niveau d'eau de la Théols, depuis sa confluence avec l'Arnon jusqu'à sa source (voir annexe 2).

L'aménagement du lit mineur s'est fait par :

- ✓ le curage du lit sur le territoire des trois communes (Meunet-Planches, Issoudun et Sainte-Lizaigne),
- ✓ la rectification des berges et du tracé du cours d'eau principal avec calibrage dans les cantons d'Issoudun Nord et Sud,
- ✓ comblement des bras du lit majeur dans le canton d'Issoudun Nord,
- ✓ comblement des bras morts et élargissement du lit mineur dans Issoudun,
- ✓ élargissement du lit mineur à 12 mètres sur le territoire de la commune de Sainte-Lizaigne.

Ainsi, la profondeur moyenne a-t-elle été portée à 1 mètre et 1,5 mètres dans la traversée d'Issoudun et la commune de Sainte-Lizaigne. Hors cantons d'Issoudun, les biefs des moulins sont restés en eau.

Parmi les 25 ouvrages de régulation du niveau d'eau de la Théols, on rencontre des barrages automatiques à contrepoids, des barrages automatiques à treuil actionnés par énergie solaire et des barrages à commande manuelle.

D'autres aménagements peuvent avoir une incidence sur le fonctionnement hydraulique de la Théols :

- ✓ 1987 à 1990 : curage du Liennet,
- ✓ 1990 : curage et recalibrage du Cousseron depuis sa source jusqu'à sa confluence avec la Théols,
- ✓ 1998 : curage du ruisseau de la Vignole et de son petit tributaire, la Paluette,
- ✓ 1998 : curage de la Théols forcée, entre le Méz et le moulin du Colombier. La Théols forcée est en fait un canal de dérivation de la Théols, créée au 18^{ème} siècle pour alimenter en eau les moulins qui jalonnaient son cours.
- ✓ On notera également, majoritairement dans Issoudun, des ponts anciens offrant une section d'écoulement réduite (pont de St-Paterne...). Certains ouvrages plus récents semblent également présenter une section réduite (pont de la rue des ponts, constitué de 3 buses ; pont de la rocade sud d'Issoudun).
- ✓ La présence de différentes passerelles, gués, vannages en mauvais état tout au long du linéaire du cours d'eau, et pouvant présenter des risques d'obstructions et d'embâcles lors des crues.
- ✓ Un mauvais entretien assez généralisé des berges (présence d'animaux fouisseurs : ragondins) et de la ripisylve, accroissant la possibilité des désordres hydrauliques
- ✓ Des remblaiements sauvages dans le lit majeur et mineur de certains affluents (Vignole) qui réduisent la section d'écoulement, et augmentent ainsi les hauteurs d'eau théoriques pouvant être atteintes en crue (voir photos 3 et 4)



Photos 3 et 4: Remblaiements sauvages en lit mineur et majeur dans le lit de la Vignole au niveau de la ferme de la petite Rouache, en amont d'Issoudun.

7.3 Conséquences des aménagements hydrauliques de curage et de rectification du cours de la Théols.

Les conséquences les plus sensibles des aménagements hydrauliques, au niveau des crues fréquentes, sont :

- ✓ un écoulement plus rapide des débits de crue, les crues sont écrêtées, mais plus violentes,
- ✓ la limitation de la hauteur de crue dans les zones urbanisées d'Issoudun,
- ✓ la limitation du champ d'inondation en zone rurale,
- ✓ les terrains naturels du lit majeur ne sont plus saturés. Ils jouent maintenant un rôle tampon en constituant un réservoir, absorbant une part de la lame d'eau, ce qui contribue à retarder le début de la montée des eaux.

En période normal et d'étiage, l'amplitude du marnage dans le cours principal et les biefs est réduite à quelques centimètres. En période de crue, l'expansion du débord dans le lit majeur du cours d'eau est quelque peu limité, mais on peut surtout noter une décroissance rapide de la lame d'inondation.

Les travaux de curage et de construction d'ouvrages de régulation du niveau d'eau ont ainsi des conséquences que l'on peut juger positives sur l'hydraulique et l'économie (gain de terres cultivables).

Ils ont, par contre, eu une conséquence négative sur les suivis des mesures. Puisque, plus aucun limnigraphe ne fonctionne actuellement sur la Théols, et que les sites éventuels pour de nouvelles implantations se trouvent en zones influencées.

L'autre aspect franchement préjudiciable du curage est d'ordre environnemental, puisqu' avec le curage et la constructions de très nombreux ouvrages transversaux de retenue d'eau, la connectivité longitudinale du cours d'eau pour les espèces migratrices est quasi nulle, et la qualité et la diversité des habitats s'est grandement détériorée.

IV) Etude hydrologique : Régime hydrologique du cours d'eau, archives et crues anciennes.

Dans le cadre d'une étude comme celle-ci, il est nécessaire de connaître le plus finement possible le fonctionnement du cours d'eau, et notamment sa réaction aux différents événements hydroclimatiques passés. On tentera ainsi ici de faire la synthèse des connaissances sur l'hydrologie de la Théols.

1. Fonctionnement en régime normal.

Une des caractéristiques principale du bassin versant de la Théols, est l'absence totale de station automatique de mesure des niveaux d'eau gérées par les services de l'état (DIREN ou DDE). Quelques échelles subsistent, mais ne sont plus relevées qu'au coup par coup et les données, partielles, sont largement inexploitable. Les seuls limnigraphes ayant fonctionnés, ont été démontés suite au curage et aux travaux hydrauliques effectués sur la Théols. Les données issues de ces enregistrements ne sont par ailleurs pas disponibles sur le site de la Banque-Hydro ou auprès des services de la DIREN.

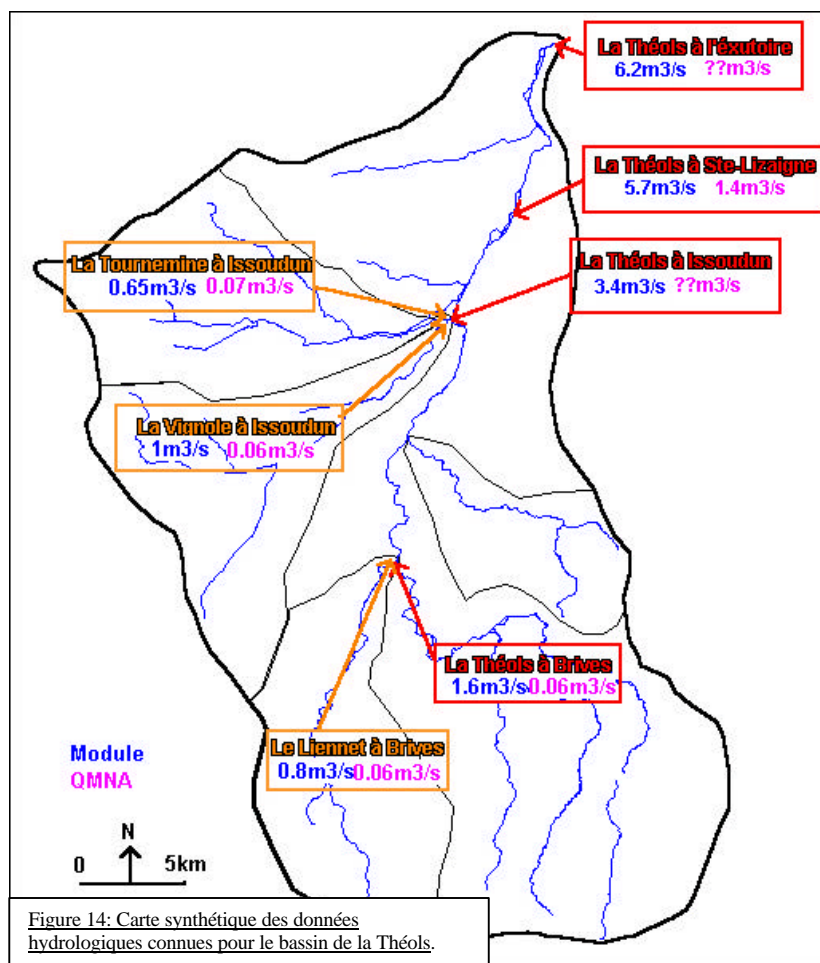
Il est à noter que la DIREN Centre étudie actuellement la possibilité de réimplantation d'un limnigraphe sur le bassin.

Il résulte de cette situation, un manque très important de données fiables concernant le régime hydrologique de la Théols.

L'évolution des hauteurs et des débits au cours de l'année n'est pas connue avec précision. On sait en revanche que la Théols est un cours à régime pluvio-océanique, c'est à dire qui présente un maximum des débits annuel en fin d'automne début d'hiver (hautes eaux annuelles) et un minimum estival (étiage). Le débit d'étiage est presque uniquement assuré par les résurgences karstiques.

Le débit moyen interannuel, ainsi que les débits moyens mensuels sec (QMNA) ont été calculés ou estimés (période d'échantillonnage inconnue) par les services de la DIREN, et ce pour la Théols et certains de ses principaux affluents. (voir figure 14).

On peut ainsi voir que les débits d'étiages sont très faibles. Le module de la Théols est quant à lui estimé aux alentours de 6m³/s à l'exutoire.



2. Fonctionnement en crue et choix de la crue de référence.

Les crues de la Théols, sont des crues dites « lentes » ou, « par extension des aires saturées ». Cela signifie que celles-ci résultent de pluies prolongées qui tombent sur des reliefs peu marqués aux sols assez perméables où le ruissellement est long à se déclencher. Cela se traduit par le débordement d'un cours d'eau ou la remontée de la nappe phréatique. Elles se produisent en plaine, mais aussi dans les régions de plateau, à l'aval de grands bassins versants. Leur propagation dans des vallées larges à faibles pentes, induit un amortissement du débit de pointe par laminage et une vitesse de montée du niveau de l'eau de l'ordre de plusieurs centimètres par heure.

On comprend donc que la majorité des crues recensées soient des crues d'hiver. On note néanmoins un certain nombre de crues d'été ou de printemps importantes. Ces dernières sont dues, comme on l'a évoqué précédemment, à des précipitations orageuses intenses, sur des sols préalablement saturés ou sub-saturés, ainsi qu'à l'activation de réseaux karstiques.

Dans le cadre de la réalisation d'un Atlas des Zones Inondables, il est indispensable de recenser les crues les plus importantes, de tenter de déterminer leur hiérarchie, et si possible, les hauteurs d'eau et débits correspondants. Les crues les plus importantes recensées (archives et enquête de terrain) survenues sur la Théols sont les suivantes (par ordre chronologique, les débits lorsqu'ils sont connus, ou ont été estimés, sont indiqués) :

22 janvier 1910	150m ³ /s à Ste-Lizaigne / Hauteur d'eau inconnue à Issoudun
04 juillet 1977	>60m ³ /s à Meunet-Planches / 1.75m à Issoudun
21 décembre 1979	52m ³ /s à Meunet-Planches / 1.85m à Issoudun
13 mai 1981	???m ³ /s / 1.25m à Issoudun
29 décembre 1999	56m ³ /s / Hauteur d'eau inconnue à Issoudun
Février 2003	???m ³ /s / Hauteur d'eau inconnue à Issoudun

Il est à noter que certaines crues ne sont pas ressenties de manière égale sur tout le bassin versant. Cela est généralement dû à un phénomène de blocage ponctuel des écoulements en un point du bassin, ce qui exhausse le niveau d'eau en amont, ou bien encore aux apports des affluents.

Les trois crues les plus importantes globalement sont donc, par ordre d'intensité :

1. 22 janvier 1910
2. 21 décembre 1979
3. 29 décembre 1999
4. 04 juillet 1977

Les crues de 1979, 1977 et 1999 sont relativement comparables en intensité (environ 60m³/s à Meunet-Planches) et les deux premières se confondent souvent dans la mémoire des personnes interrogées lors des enquêtes de terrain.

La crue de 1910, en revanche, se détache nettement des autres évènements, puisque les niveaux retrouvés (relativement peu nombreux malheureusement, mais répartis sur tout le bassin), attestent de hauteurs d'eau nettement supérieures aux autres, (généralement 0.5 à 1m de plus dans la partie amont) et constitue ainsi la crue des Plus Hautes Eaux Connues (PHEC). De nombreux témoignages attestent également de l'ampleur du phénomène (Extraits du Journal du Département de L'Indre):

- « Les quartiers bas de la ville, plus de cents maisons et deux cent cinquante habitants sont cernés par les eaux »
- « On signale que les quartiers de St-Paterne, des alouettes et de Chinault sont envahis par les eaux, et que dans certaines maisons l'eau atteignait plus de deux mètres de hauteur »
- « Le niveau atteint est à moins de 50cm des arcs en fonte du pont SNCF »

On dispose également d'une photographie issue de l'ouvrage : Mémoire en Images : Issoudun, (cf. Biblio en fin d'étude).

Le lieu de prise de vue de cette photo fut par ailleurs retrouvé et a permis un nivellement du niveau d'eau correspondant au cliché. (voir cahier des laisses de crue, Code laisse de crue n°40)



Photo 5: Carte postale illustrant la crue de 1910 à Issoudun, quartier St-Paterne.

La valeur de débit retenue pour la crue de 1910 est de 150m³/s à l'exutoire. Cette valeur a été obtenue par une extrapolation par la formule de Myer (voir figure 15), en comparaison avec le bassin-versant de l'Arnon, dont la crue de référence est la même (1910) et où le débit est connu (210m³/s, PPRI approuvé). Le calage du modèle dans la partie aval du cours d'eau est satisfaisant avec ce débit.

$Q_{1910Th} = Q_{1910Ar} * \left(\frac{SurfTh^{0.8}}{SurfAr^{0.8}} \right)$ <p>soit :</p> $150 = 210 * \left(\frac{840^{0.8}}{1250^{0.8}} \right)$	<p>Avec :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Q_{1910Th} : Débit de la Théols en 1910 - Q_{1910Ar} : Débit de l'Arnon en 1910 - SurfTh : Surface du bassin de la Théols - SurfAr : Surface du bassin de l'Arnon
--	--

Figure 15 : Calcul du débit de projet à l'exutoire par la formule de Myer.

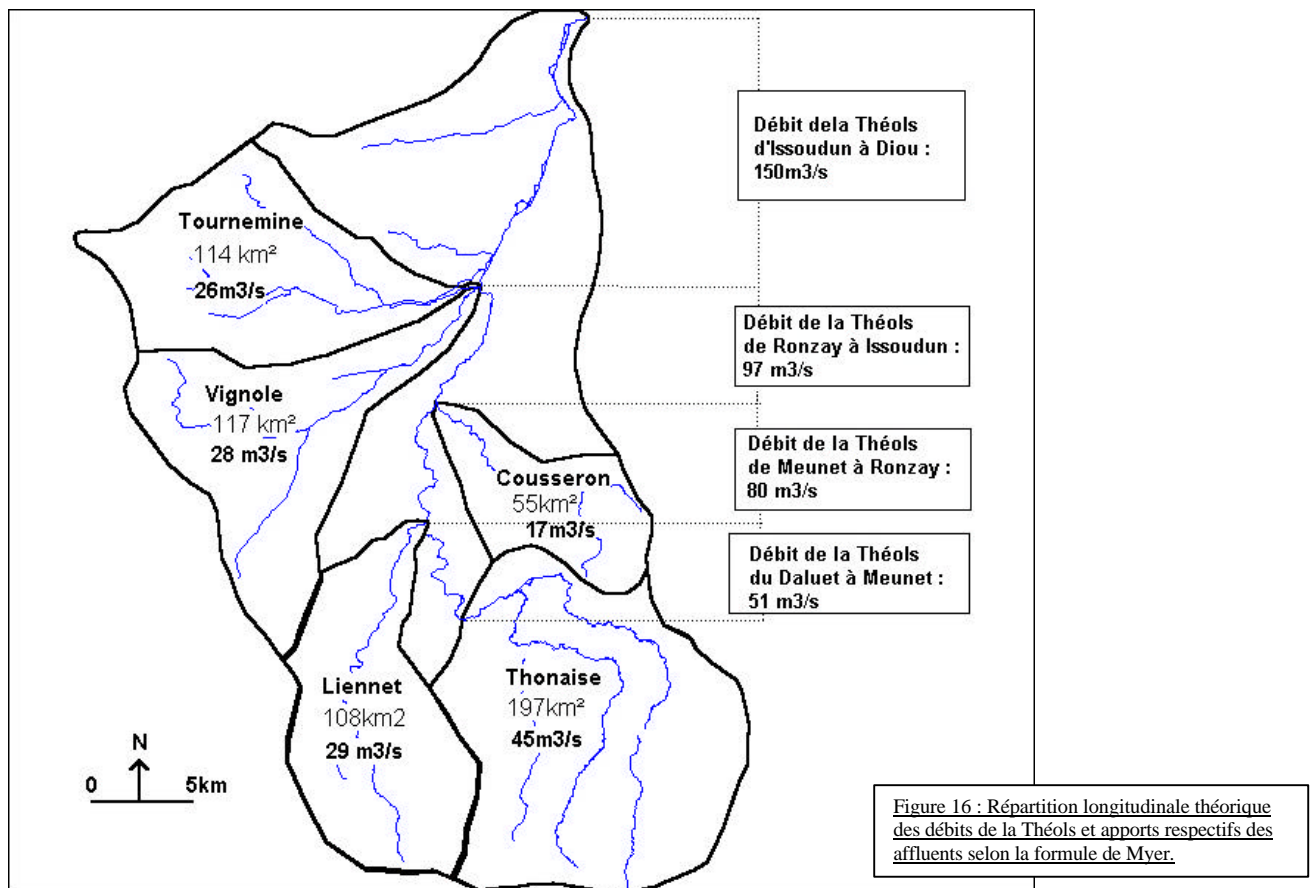
D'autre part, diverses études précédentes (Clement R. 1994 ; COMIREM 2000) ainsi que des mesures de jaugeage ont permis d'avancer comme débit centennal à Issoudun, un chiffre de l'ordre de 70m³/s. Ce chiffre correspond approximativement à des crues du type 1977, 1979 ou 1999

Si l'on rapporte (toujours par la formule de Myer) le débit calculé précédemment pour 1910 à l'exutoire pour le ramener au débit probable en 1910 à Issoudun, on trouve environ 127m³/s.

On peut donc en conclure donc que la crue de 1910 sur la Théols fut bien supérieure à la crue centennale statistiquement calculée. Elle constitue de plus la crue des PHEC.

La crue de **1910** sera donc **la crue de projet**, avec un débit de projet à l'exutoire de **150m³/s**.

Toujours selon la formule de Myer, on peut calculer la contribution de chaque affluent lors de la crue, et ainsi déterminer les variations longitudinales théorique du débit (voir figure 16).



Il est à noter que la formule de Myer prend comme hypothèse que les apports sont proportionnels (via un coefficient) à la surface des bassins, et donc que les sous-bassins réagissent de manière homogène (même relation pluie-débit, même intensité de précipitation). Cette hypothèse est bien évidemment fautive, mais donne en général de bon résultat. Toutefois dans le cas présent, et comme on l'a évoqué précédemment, la nature hydrogéologique des bassins (karsts), la nature des sols, ainsi que l'hétérogénéité des précipitations sur les bassins,

mettent à mal ce modèle. Des modifications concernant la répartition longitudinale des débits furent alors effectuées *a posteriori* (voir partie : Calage du modèle).

Précisons enfin que la crue de référence est antérieure aux nombreux travaux d'aménagement hydraulique dont il est fait état précédemment dans cette étude. Les conditions d'écoulement (pente locale, rugosité, section mouillée...) ont donc été modifiées de façon significative. A cela peut s'ajouter la modification ou l'ajout d'ouvrages de franchissement, ainsi que les modifications d'occupation du sol depuis 1910. Autant de paramètres qui seront à prendre en compte dans la suite cette étude.

V) Etude hydraulique et réalisation du modèle numérique d'écoulement.

1. Méthodologie générale et principes d'élaboration d'un AZI.

La réalisation d'un Atlas des Zones Inondables repose sur dans un premier temps sur l'application de la méthode dite : « Hydrogéomorphologique ». Cette approche globale du bassin-versant, selon une optique essentiellement naturaliste, répond aux prescriptions de l'état en terme de gestion du territoire en matière de risque (PPR et Inondation, Guide méthodologique, La documentation Française, 2000). Cette méthode consiste : « à identifier les conditions naturelles d'écoulement d'un cours d'eau en fonction des ses différents lits et à apprécier les perturbations de ces écoulements consécutives aux activités humaines dans la vallée. » Celle-ci s'appuie donc tout naturellement sur une observation fine du terrain, complétée par l'analyse morphologique détaillée de la plaine d'inondation de la rivière par l'intermédiaire des photos aériennes.

La photo-interprétation (Mission IGN du 19/06/99, FD 36-86/250 ; clichés 768,767,759,760,578,577,576,563,564,565,241,242,224,225,86,85) par stéréoscopie permet de déterminer visuellement les différentes unités morphologiques (voir figure 17) du lit majeur du cours d'eau, et de déterminer ainsi l'extension maximale fonctionnelle lors des crues (voir figure 18).

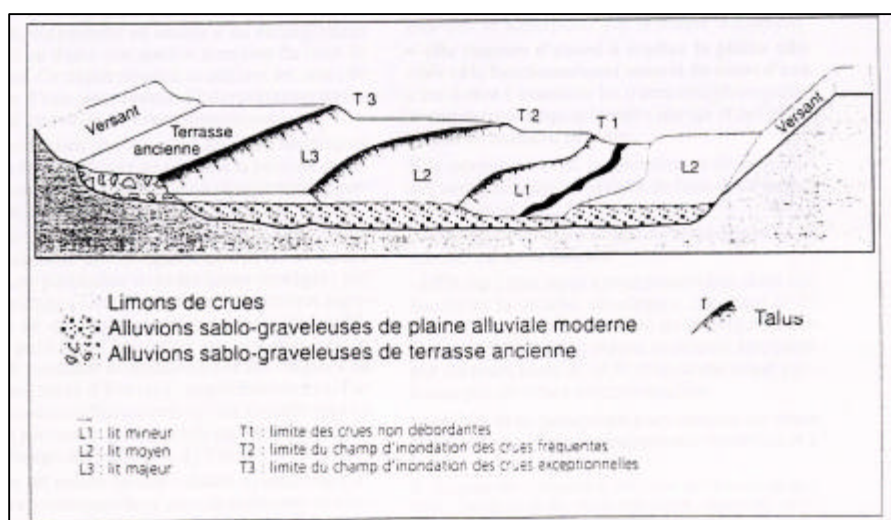


Figure 17: les différentes unités morphologiques du lit majeur et leur signification hydrologique.

Source : PPR : Guide méthodologique. La documentation Française.

Ces différents niveaux topographiques et morphologiques, qui correspondent à la dynamique du cours d'eau, sont également bien souvent soulignés sur le terrain par l'occupation du sol. Ainsi la limite culture/ peupleraie ou culture/prairies ou l'implantation de certaines routes ou bâtiments (fermes, granges...), sont bien souvent implantés en limite de lit majeur.

Néanmoins, si cette approche est pertinente dans les cas où la morphologie est bien marquée, elle possède également certaines limites. Ainsi, cette morphologie rend compte d'une dynamique qui a pu être modifiée par l'Homme (endiguement ou recalibrage, comme ce fut le cas pour la Théols). Elle est également relativement inopérante dans les zones urbanisées ou lorsque la contrainte structurale est trop forte.

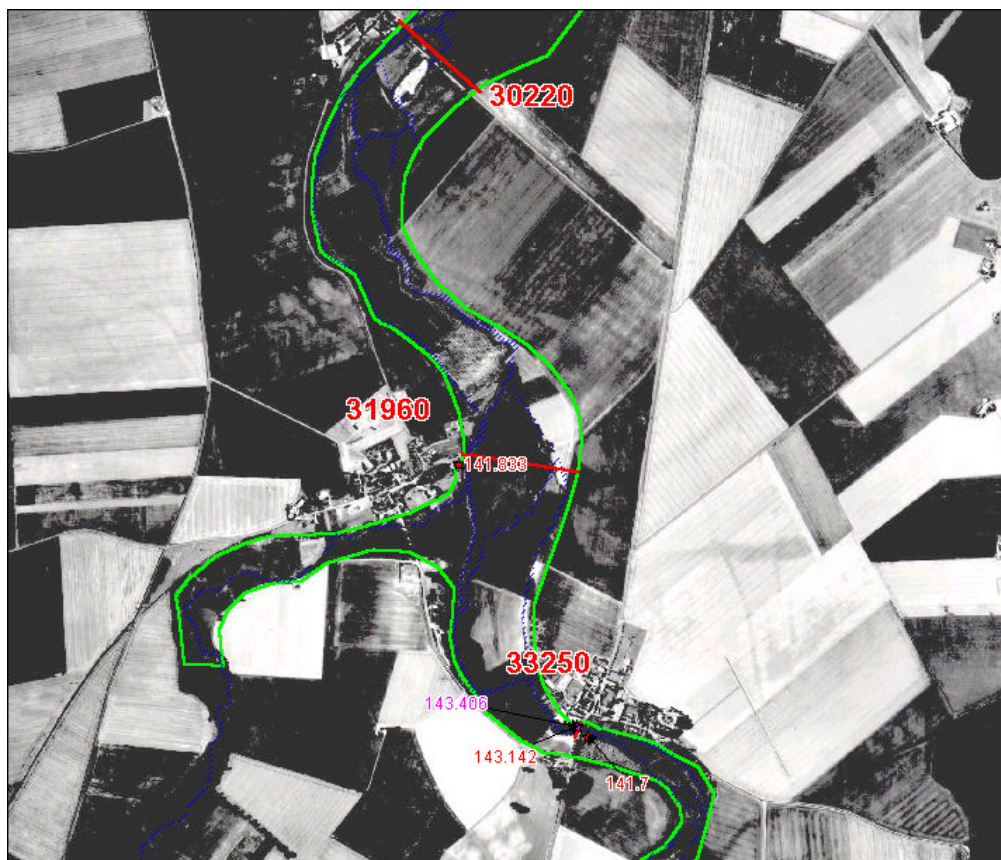


Figure 18: exemple de détermination par photo-interprétation stéréoscopique de l'extension maximale des crues sur la vallée de la Théols (Secteur de Brives).

La ligne verte correspond à l'extension maximale du champs d'inondation, les traits rouges aux profils en travers, les étoiles aux emplacements de laisses de crue, ainsi que leurs côtes.

Lorsque l'approche uniquement hydrogéomorphologique apparaît comme insuffisante, on fait appel à la modélisation hydraulique pour compléter et affiner les données (dans le cas où la réalisation de l'AZI à pour but d'initier un PPRI, comme c'est le cas sur la Théols).

Dans le cas de la Théols, du fait du recalibrage et de la présence de la ville d'Issoudun, la réalisation d'une modélisation fut décidée.

L'ensemble des étapes du processus de la réalisation d'un AZI est ainsi résumé sur la figure ci-contre (figure 19).

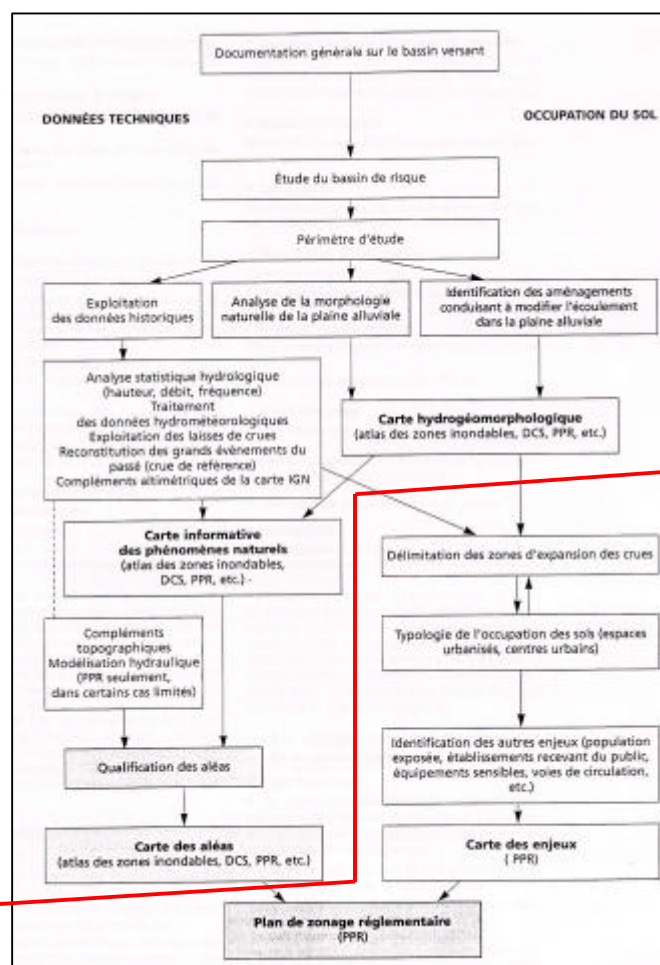


Figure 19: Les principales étapes des études du risque d'inondation

Limite des étapes envisagées dans le cadre de la réalisation d'un AZI.

Lorsqu'une modélisation hydraulique est envisagée, un certain nombre de données complémentaires (en plus des données générales sur le bassin-versant et son hydrologie) doivent alors être collectées.

2. Méthodologie de la collecte des données du modèle.

2.1 Levés topographiques et nivellement : les données de la géométrie.

Pour pouvoir réaliser la modélisation hydraulique des écoulements sur la rivière Théols il est nécessaire d'appréhender la géométrie de la vallée. En effet, pour la réalisation d'un AZI on considère des débits débordants et il est donc important de connaître avec le plus de précision possible la forme de l'enveloppe alluviale (lit mineur et lit majeur). Ne disposant pas d'une couverture planimétrique et altimétrique de précision suffisante sur l'ensemble de la vallée (MNT), il est nécessaire d'effectuer des levés topographiques ponctuelles de la vallée. Celles-ci prennent la forme de profils en travers de la vallée (sections perpendiculaires à l'écoulement) repartis sur l'ensemble du linéaire de la rivière.

Le choix du positionnement de ces profils dans la qualité de la modélisation est primordiale, puisque c'est lui qui définit en grande partie les modalités du calcul hydraulique (section mouillée, périmètre mouillé, pente...). La nature du terrain de la vallée étant par nature hétérogène, la démarche de localisation des profils tend ainsi à borner par un profil des sections de rivière qui seront par la suite considérées comme homogènes. En pratique, toutes les singularités ayant une influence sur la ligne d'eau (confluences, ouvrages hydrauliques, variation de la pente longitudinale, contraction ou expansion de la vallée) doivent être envisagées et, le cas échéant, prisent en compte par la réalisation d'un profil en travers. (voir figure 20).

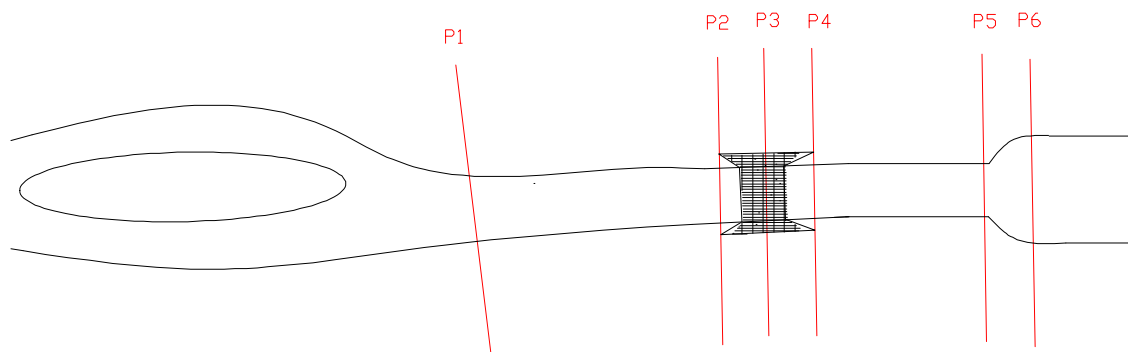


Figure 20 : Principe de localisation des profils en travers en rivière en vue d'une modélisation hydraulique. Source : Léï lani Bonnin

La réalisation pratique de ces profils sur le terrain passe par la réalisation de levés topographiques pour les parties émergées (lit majeur) et bathymétriques pour les parties submergées (lit mineur), les mesures ayant été effectuées à l'étiage. Pour cela, nous disposons d'un appareil de topographie perfectionné (ATS, Station totale robotisée Trimble 600), qui fonctionne comme un théodolite assisté par ordinateur.

Le principe est de mesurer des points topographique selon une ligne orthogonale à l'axe de la rivière. Ces points se doivent d'être pris à chaque rupture de pente du terrain de manière à rendre le plus fidèlement possible la géométrie de la vallée.

Ces profils se doivent également d'être tous rattachés à un même référentiel d'altitude, ce qui permet ainsi de pouvoir les positionner fidèlement sur le profil longitudinal de la rivière (connaissant la distance qui les séparent les uns des autres) et d'ainsi déterminer avec précision la pente longitudinale de la rivière.

Le référentiel utilisé est le réseau de nivellement IGN69 exprimé en mètres. Il se matérialise sur le terrain par des « pastilles » ou « macarons » métalliques fixées sur des parois verticales (voir photo 6) et dont les coordonnées et surtout l'altitude (calculée par rapport au niveau moyen de la mer au marégraphe de Marseille) sont connus avec grande précision.



Photo 6: Exemple de « macaron » de nivellement

Ces points (dont les fiches signalétiques sont disponibles via le site Internet : www.IGN.fr), constituent donc les points de rattachement au réseau d'altitude des profils en travers.

La technique du nivellement est alors relativement simple puisque le théodolite dont nous disposons est équipé d'un distance-mètre automatique, ainsi que d'une visée zénithale et azimutale motorisée qui permet de calculer automatiquement la dénivellée horizontale en fonction de la distance et donc *in-fine* l'altitude du point mesuré, ainsi

que le cas échéant de ramener (projection mathématique orthogonale) les points mesurés sur une droite soutenant le profil. (voir figure 21 et photo 7).

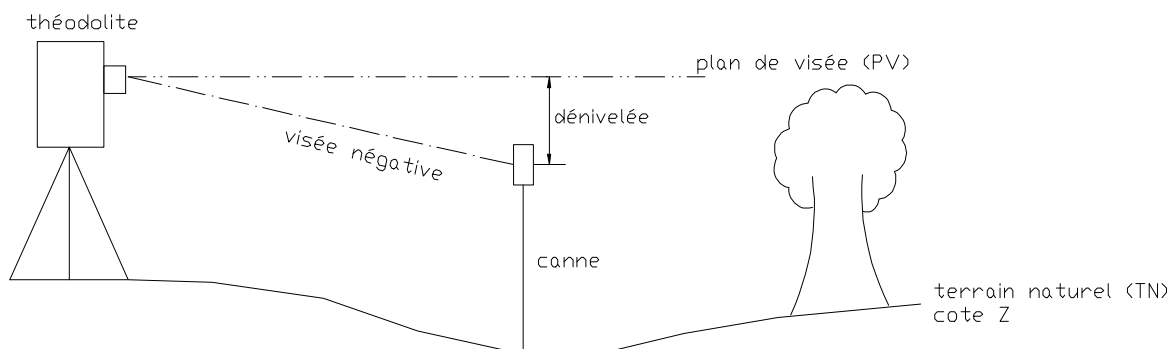


Figure 21: Schéma de principe du nivellement au théodolite ($\text{Altitude (Z)} = \text{PV} - \text{dénivellée} - \text{Hauteur de canne}$). Source : [Leï lani Bonnin](#)



Photo 7 : Exemple d'utilisation du théodolite.

Dans la pratique, ce type de nivellement optique possède des limites inhérentes à la distance de portée de l'appareil, ainsi qu'à la nécessité de pouvoir viser la mire (problème liés à la végétation, aux bâtiments...). Pour contourner ce problème on effectue une série de mise en station ou cheminement (voir figure 22).

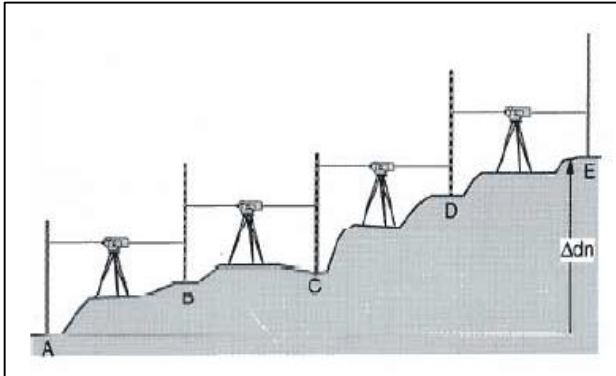


Figure 22: Schéma de principe du cheminement topographique.
Source : www.IGN.fr

Pour ce qui concerne le lit mineur, celui-ci étant toujours en eau, il est parfois nécessaire de réaliser les levées à partir d'un bateau pneumatique, les profondeurs étant toutefois relativement faibles, le procédé est globalement le même que celui décrit précédemment. (voir photo 8)



Photo 8: Exemple de levé topographique (bathymétrie) en rivière.

La finalité de ce travail donne alors un fichier à deux variables (x,y) qui correspondent respectivement à la distance à la rive gauche et à l'altitude des points, donnant une représentation graphique du profil en travers (voir figure 23). C'est ensuite ce fichier de géométrie qui sera implémenté dans le logiciel d'hydraulique.

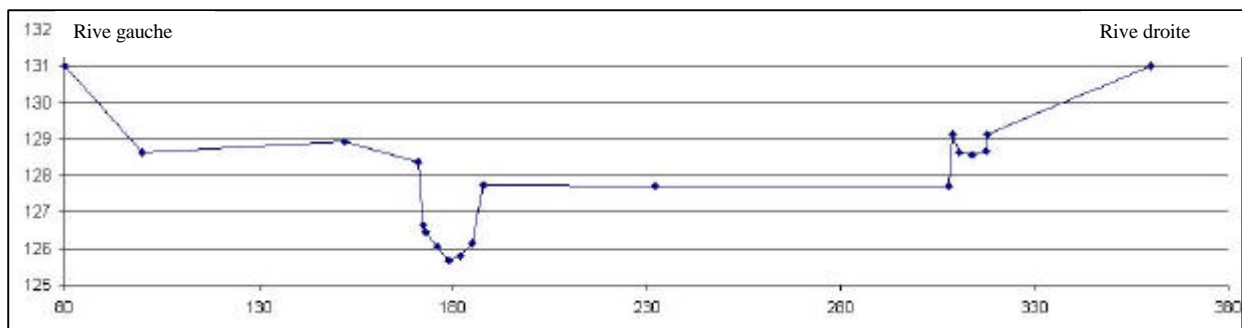


Figure 23 : Exemple de profil en travers sur la Théols : représentation graphique des points topographiques levés sur le terrain.

Dans le cas des levées topographiques d'ouvrages ayant un impact hydraulique (ponts, buses, remblais...) la démarche est globalement la même, puisque l'on effectuera un levé topo d'un profil amont et aval encadrant de manière proche (quelques mètres) un profil réalisé sur l'ouvrage. Celui-ci devra permettre de connaître la côte de surverse de l'ouvrage (extrados), l'ouverture du pont et sa géométrie... Il sera également nécessaire de noter des paramètres important dans les calculs hydrauliques (forme des piles, largeur du pont, diamètre des buses...).

La réalisation du modèle à ainsi nécessité la levée de 107 profils en travers de la rivière. Ceux-ci comprennent également les profils des ouvrages et ceux les encadrant (à raison de 8 ouvrages pour la partie aval réalisée précédemment, et 23 pour la partie traitée dans cette étude) et également 12 profils sur un affluent de la Théols : La Vignole. On attribue à chaque profil une distance en mètres par rapport à la confluence avec l'Arnon, qui nous permet de les identifier. La localisation précise des profils est disponible en annexe 3.

2.2 Utilisation du GPS différentiel (DGPS) :

L'utilisation du DGPS (GPS différentiel) (modèle Trimble 4700 Cinématique RTK), permet (entre autres choses) d'implanter les têtes de profils lorsque les macarons de nivellement IGN sont trop éloignés et qu'un cheminement optique classique est considéré comme trop long et présentant un risque d'erreurs trop important (cumul des erreurs). Cela fut notamment le cas sur la zone amont de la Théols où certains profils en travers étaient parfois éloignés de 5 kilomètres du macaron de nivellement IGN le plus proche. Une série de points (20) utilisés plus tard comme référence à un nivellement optique classique ont ainsi été acquis lors d'une session d'implantation. Cette technique si elle présente une précision planimétrique et altimétrique plus que satisfaisante (centimétrique) dans le cadre d'une étude hydraulique, n'est pour autant pas utilisée majoritairement pour la réalisation complète des levées topographiques. En effet, cette technique présente également certaines limites (inhérentes à son principe de fonctionnement) qui rendent son utilisation en routine pour l'établissement de profils souvent coûteuse en temps et parfois impossible. Pour comprendre cela, il est nécessaire d'effectuer un rapide descriptif de son mode de fonctionnement.

Le DGPS, tout comme le GPS (Global Positionning System) est un système de localisation terrestre qui fonctionne à partir de données envoyées par une flottille de satellites et qui, par un calcul de triangulation complexe, permet de déterminer la position en X,Y,Z de l'opérateur. La précision d'un GPS classique est d'environ 10m en planimétrie et seulement de 30m en altitude. Cette précision est nettement insuffisante pour la réalisation d'études hydrauliques, ou de tout travaux de topographie, et justifie donc le recours au GPS différentiel. Celui-ci, permet d'obtenir une précision centimétrique par l'utilisation d'un plus grand nombre de satellites, la prise en compte d'algorithmes de calcul de positionnement plus perfectionnés, et surtout la prise en compte de données de corrections envoyés par une base dont la position est connue avec précision. Cette base est un repère géodésique IGN (site NTF d'ordre 3) dont la précision se doit d'être au minimum centimétrique, et sur laquelle on implante une première antenne réceptrice GPS. Connaissant *a priori* la position de cette borne, l'appareil de mesure est alors capable de calculer des corrections de positions qui sont alors transmises par radio à l'antenne GPS mobile utilisée sur les lieux de levé par l'opérateur. (voir photos 9, 10, 11 et figure 24)



Photo 9: Antenne GPS fixe en station sur la borne IGN de référence.



Photo 10: Antenne radio de relais des corrections



Photo 11: Partie mobile du DGPS permettant l'acquisition des points.

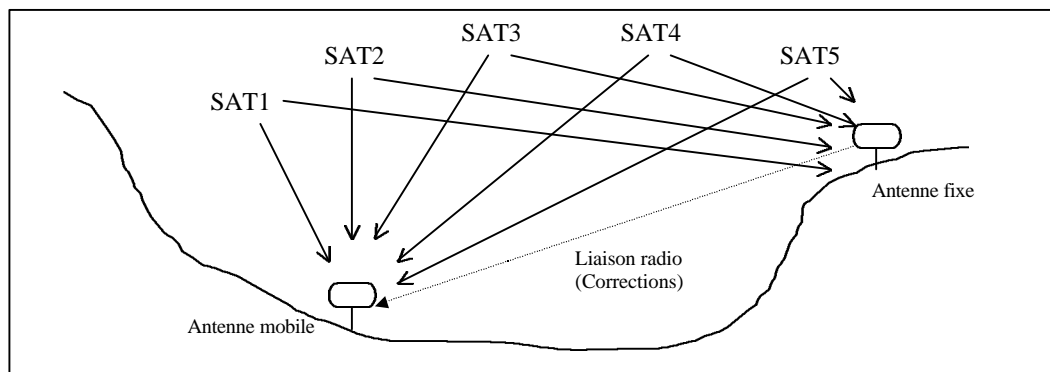


Figure 24 : Schéma de principe du fonctionnement du DGPS.

Les limites de cette technique sont essentiellement liées à la nature et aux propriétés (longueur d'onde, et portée radio) des ondes électromagnétiques utilisées comme vecteurs de l'information. En effet, les signaux GPS sont transmis selon une longueur d'onde courte et sont par conséquent facilement interceptables par la végétation ou victimes de réflexions sur des surfaces verticales (murs, bâtiments...) qui empêchent l'utilisation de ce procédé dans des situations à couvert. De plus la position et le nombre de satellites disponibles au moment de la mesure (disponible grâce à des éphémérides) ont également une influence importante sur la qualité des mesures (GDOP). La portée radio du signal de correction est également un paramètre limitatif, puisque celui-ci ne dépasse généralement pas 10km depuis la borne de référence. (voir figure 25).

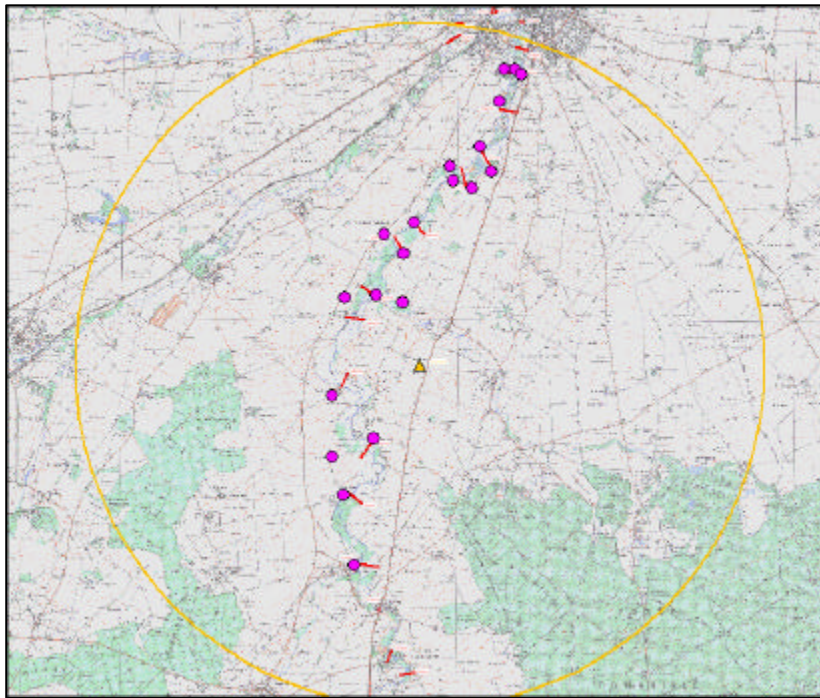


Figure 25: Localisation des points GPS pris sur la Théols. (pastilles violettes : points GPS, triangle jaune : localisation de la borne IGN, cercle jaune: rayon d'action radio (7km), traits rouges : profils en travers réalisés).

Pour plus d'information concernant les méthodes d'acquisition des données de géométrie on pourra se rapporter au document : Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques, édité par le CETMEF.

2.3 Détermination et évaluation des paramètres hydrauliques. (rugosité et zones de stockage) :

En plus des paramètres de géométrie stricte de la vallée, d'autres paramètres ayant une influence sur les écoulements doivent être appréhendés sur le terrain. Ainsi, la rugosité du lit, ainsi que celle de la plaine d'inondation (coefficient de rugosité de Manning-Strickler), est évaluée (densité et organisation spatiale de la végétation, granulométrie du lit...) et déterminée par comparaison avec des abaques de référence (voir annexe 4).

Cette détermination des coefficients fait bien évidemment appel à une interprétation relativement subjective du terrain et constitue souvent un des paramètres de calage *a posteriori* du modèle hydraulique.

Un autre paramètre important à évaluer sur le terrain, mais également à partir de la carte topographique au 25000^{ème} (SCAN25 IGN) ou des photos aériennes si elles sont disponibles, est l'extension des zones de stockage. Ces zones font partie du lit majeur inondé lors des crues, mais du fait de la configuration topographique et/ou de la végétation et de diverses obstructions ne participent pas à l'écoulement. Cela signifie que de l'eau est bien présente dans ces secteurs, mais que les vitesses sont considérées comme nulles, et que par conséquent aucun débit n'y transite. Ces secteurs, dont la détermination fait là encore appel à l'observation et à l'expérience, sont néanmoins importants dans la fiabilité du modèle. Ils sont d'autant plus délicats à déterminer, que comme le coefficient de rugosité dans le lit majeur, on observe une variation des valeurs ou de l'extension spatiale des zones en fonction de paramètres comme les saisons, ou l'usage des sols.

Ils apportent des informations très importantes sur les valeurs de géométrie à prendre effectivement en compte dans la modélisation (surface et périmètre mouillés).

L'extension des zones de stockage sont à l'instar de coefficient de rugosité, bien souvent, des paramètres de calage *a posteriori* du modèle.

2.4 Collecte des informations sur les niveaux d'eau atteints lors des crues : Laisses de crue et enquête auprès des riverains.

Parmi les différentes sources potentielles d'informations permettant de faire l'inventaire des crues anciennes, des niveaux d'eau alors atteints, ainsi que de la nature des événements (intensité des pluies, rapidité du passage de la crue, présence d'embâcles...) le témoignage des riverains est essentiel. Il permet notamment de faire la collecte des laisses de crue nécessaires à l'établissement et au calage du modèle.

On entend par laisse de crue toute marque ou indication sur le niveau d'eau atteint lors d'une crue. La qualité de celle-ci dépend pour beaucoup de sa position par rapport à l'écoulement : Une position dans l'axe de l'écoulement et donc dans l'axe des vecteurs vitesses aura pour conséquence de surévaluer l'altitude de la ligne d'eau, en indiquant plutôt l'altitude de la ligne de charge. Une laisse en position d'abri peut également être biaisée par un blocage des écoulements ou une perturbation locale des écoulements et indiquer un niveau d'eau trop haut ou trop bas.

Les laisses de crues peuvent prendre différentes formes, tel que traits gravés, marques de peinture, plaques... Elles sont malheureusement bien souvent seulement indiquées par des placage de végétaux, de boue ou des traces d'humidité sur les bâtiments, souvent même, seul la mémoire des personnes interrogées permettent d'indiquer un niveau atteint lors des crues.

Après détermination (toujours à considérer avec circonspection, lorsqu'elle n'est pas marquée à proximité) de la date de la crue, on réalise un nivellement de la laisse. On notera sur une fiche standardisée différentes informations importantes, tel que la position précise de la laisse (coordonnées X,Y, carte, photo), l'année de la crue ainsi que l'altitude relevée (IGN NGF69). Ces laisses de crue sont reportées dans un SIG et l'ensemble des fiches de crues sont regroupées dans un cahier des laisses de crue (voir annexe 5).

3. La modélisation hydraulique informatique.

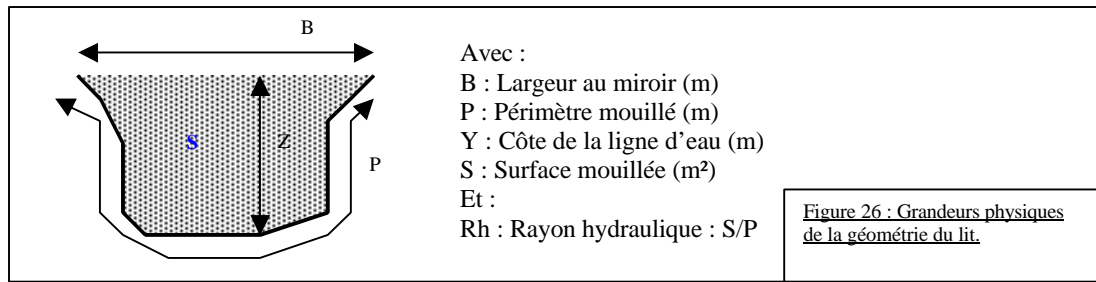
Le principe général consiste en l'établissement d'un modèle mathématique reproduisant, avec le niveau de précision le plus fin possible, la réalité observée sur le terrain. Dans le cas d'un AZI, on demandera au modèle de pouvoir calculer une ligne d'eau théorique qui corresponde aux PHEC.

La modélisation fait appel à différentes hypothèses et principes qu'il convient de rappeler pour bien comprendre son fonctionnement.

3.1 Principes d'hydraulique fluviale.

L'hydraulique fluviale tente de formaliser sous forme d'équations, le comportement des écoulements en rivière. Elle s'appuie ainsi sur différents présupposés, ainsi que sur certaines grandeurs pour les caractériser :

Concernant la géométrie du lit, on définit (voir figure 26).



Il existe également d'autres paramètres importants tel que : la pente du fond entre deux sections en travers, notée : i et exprimée en (m/m). La vitesse moyenne de l'écoulement, notée v et exprimée en (m/s) et qui représente le rapport entre le Débit (Q en m³/s) et la surface mouillée (S en m²).

On comprend bien que dans le cadre de la réalisation d'un AZI, la paramètre *a priori* le plus important soit la hauteur d'eau (Y). Toutefois celle-ci n'est qu'une des composante de la charge hydraulique ou charge de Bernoulli (notée H , exprimée en (m)) (voir figure 27).

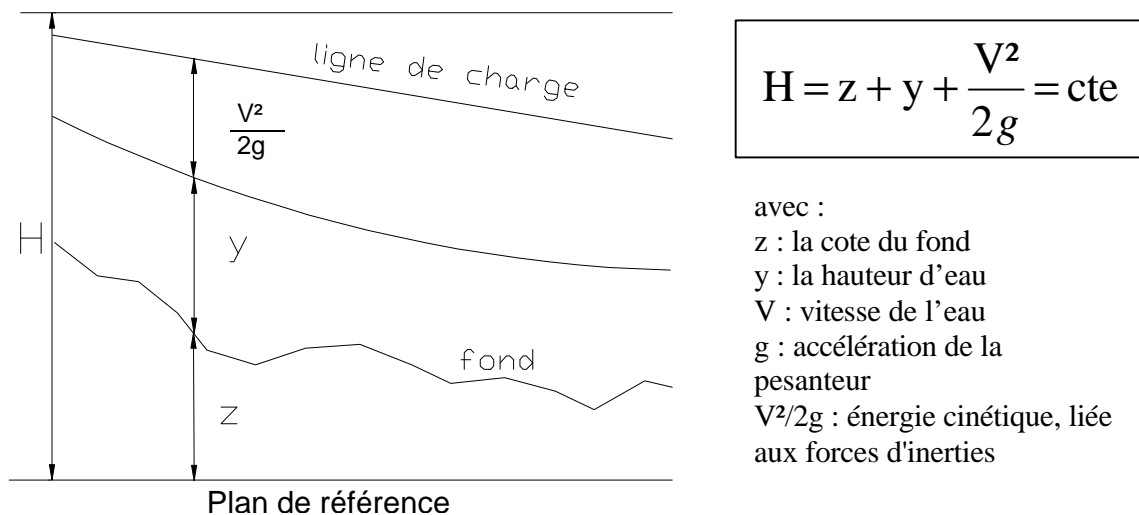


Figure 27 : Schématisation du Théorème de Bernoulli

Certaines hypothèses concernant la nature de l'écoulement sont également posée. Il est nécessaire de comprendre ce qu'elles expriment.

Compte tenu des objectifs de la modélisation, à savoir le calcul d'une ligne d'eau, on considère ainsi pour les écoulements en crue sur la Théols que :

- On peut assimiler les vecteurs vitesses de l'écoulement à un seul vecteur vitesse moyen, qui est caractéristique pour l'ensemble de l'écoulement. Cela sous-entend que l'écoulement suit un axe privilégié, orthogonal aux sections en travers et non influencé par les forces centrifuges. C'est l'hypothèse filaire ou 1D.
- On considérera l'écoulement comme permanent (stationnaire), c'est à dire que ses caractéristiques ne varient pas dans le temps (débit constant).

- Que l'écoulement est graduellement varié, c'est à dire que l'on observe des variations spatiales des conditions d'écoulement, et ce d'une manière globalement progressive. Localement (au passage d'un pont, d'une singularité du fond...) on peut observer un régime brusquement varié.

Nous considérerons ainsi que la perte de charge linéaire se calcule grâce à la formule de Manning-Strickler (pente du fond parallèle à la pente de l'eau) dans le cas où l'écoulement est graduellement varié (voir figure 28)

$$Q = K * S * Rh^{2/3} * i^{1/2}$$

Figure 28: Formule de Manning-Strickler.

Le coefficient K dit de Manning-Strickler représente la rugosité du lit. Celui-ci est généralement différent dans le lit mineur et dans le lit majeur. Les valeurs retenues pour la réalisation du modèle sont présentées dans la partie traitant du calage.

Dans le cas du passage à un régime brusquement varié, différentes équations peuvent s'appliquer en fonction du type de perturbation (Perte de charge liées aux piles, à un seuil...), ou plus généralement lorsque la perturbation provient d'un élément non aisément caractérisable, on utilise un coefficient de perte de charge singulière (nombre de Reynolds) répondant à une typologie (pour plus de précision se reporter, par exemple, à: Hydraulique des cours d'eau, 2002, CETMEF).

On distingue également deux régimes hydrauliques différents, qui conditionnent le raisonnement hydraulique : le régime fluvial et le régime torrentiel. Les deux régime peuvent se rencontrer sur un même cours d'eau. Généralement sur une rivière comme la Théols le régime fluvial s'applique partout. Néanmoins, au passage d'un ouvrage le régime torrentiel peut apparaître.

La différenciation entre les deux régimes s'exprime via le nombre de Froude. Celui-ci compare la vitesse moyenne d'écoulement (V, en (m/s)) à la célérité des ondes infinitésimales (\sqrt{gh}) (ce sont les ondes produites par une perturbation ponctuelle d'un plan d'eau, type « rond dans l'eau »). (voir figure 29).

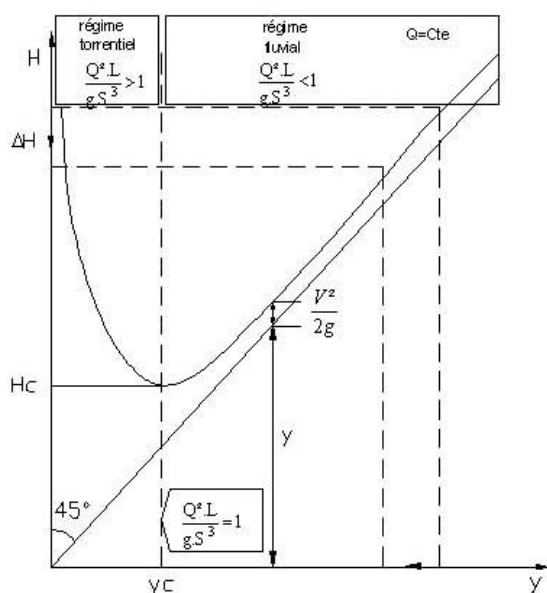


Figure 29 : Relation entre la charge spécifique (H) et la hauteur d'eau (y) pour un débit constant.

Pour une hauteur d'eau dite critique (y_c), la charge spécifique passe par un minimum. Ce point marque la séparation entre régime fluvial et torrentiel.

Lorsque le nombre de Froude est inférieur à 1 ($F < 1$) : le régime est fluvial, la hauteur d'eau importante et la vitesse d'écoulement faible. Le niveau d'eau amont est déterminé par les conditions à l'aval : On parle de contrôle aval.

Lorsque le nombre de Froude est supérieur à 1 ($F > 1$) : le régime est torrentiel, la hauteur d'eau est faible et la vitesse d'écoulement rapide. Le niveau d'eau à l'aval est contrôlé par les conditions à l'amont. On parle de contrôle amont.

3.2 Caractéristiques du modèle hydraulique et fonctionnement du logiciel.

Le modèle a été réalisé grâce au logiciel HEC-RAS (Hydrological Engineering Corps – River Analysis System). Celui-ci, de type Saint-Venant 1D permet de résoudre les équations de Navier-Stokes de conservation du volume, et de la conservation de la quantité de mouvement (pour plus de détails se reporter à : Hydraulique des cours d'eau, 2002, CETMEF et Notice technique du logiciel HEC-RAS.).

Il en propose la résolution aussi bien en régime permanent, qu'en régime transitoire, et permet également de combiner le régime fluvial et torrentiel.

Le calcul de la ligne d'eau dans le cas de la Théols fut intégralement réalisé en régime fluvial permanent. Dans ces conditions le modèle exige pour pouvoir tourner que l'on spécifie une condition à l'aval du modèle (hauteur d'eau connue pour un débit connu, dans le cas qui nous intéresse). Le contrôle aval est opéré par l'Arnon, dont le débit, et le niveau d'eau pour la crue de 1910 sont connus (PPRI approuvé). Cela nous permet donc de bénéficier d'une condition aval fiable (Débit de 210 m³/s, Hauteur d'eau de 112.54m).

Connaissant ce « point de départ » de la simulation, le modèle peut alors par itérations successives d'aval en amont, connaissant les caractéristiques géométriques, les coefficients de perte de charge linéaire et singulière et les variations longitudinales du débit, calculer la hauteur d'eau, ainsi que d'autres paramètres (vitesse de l'écoulement, altitude la ligne d'énergie...) pour chaque profil. Les données pour l'intervalle entre les profils sont extrapolées.

HEC-RAS permet une approche fine de la modélisation des pertes de charges linéaires ou spécifiques. Il offre en effet la possibilité de spécifier un coefficient de rugosité différent en lit mineur et en lit majeur (les valeurs retenues (coefficient de rugosité de Strickler) pour la Théols sont de : 5 en lit en majeur et 25 en lit mineur).

Pour les pertes de charge spécifique, un large choix de formules et de valeurs de coefficients sont disponibles en fonction du type de singularité rencontré (abaques de référence intégrés au logiciel).

Le logiciel permet également de spécifier la répartition du débit entre les différents ouvrages (Multiple Openings) présents sur un même profil en travers en définissant des zones de convergence des flux (ce qui nécessite de définir des zones de convergence des écoulements, appréciation relativement subjective de la répartition des écoulements en crue).

L'ensemble des étapes et données nécessaires à la réalisation du modèle sont synthétisés dans la figure ci-après (voir figure 30) :

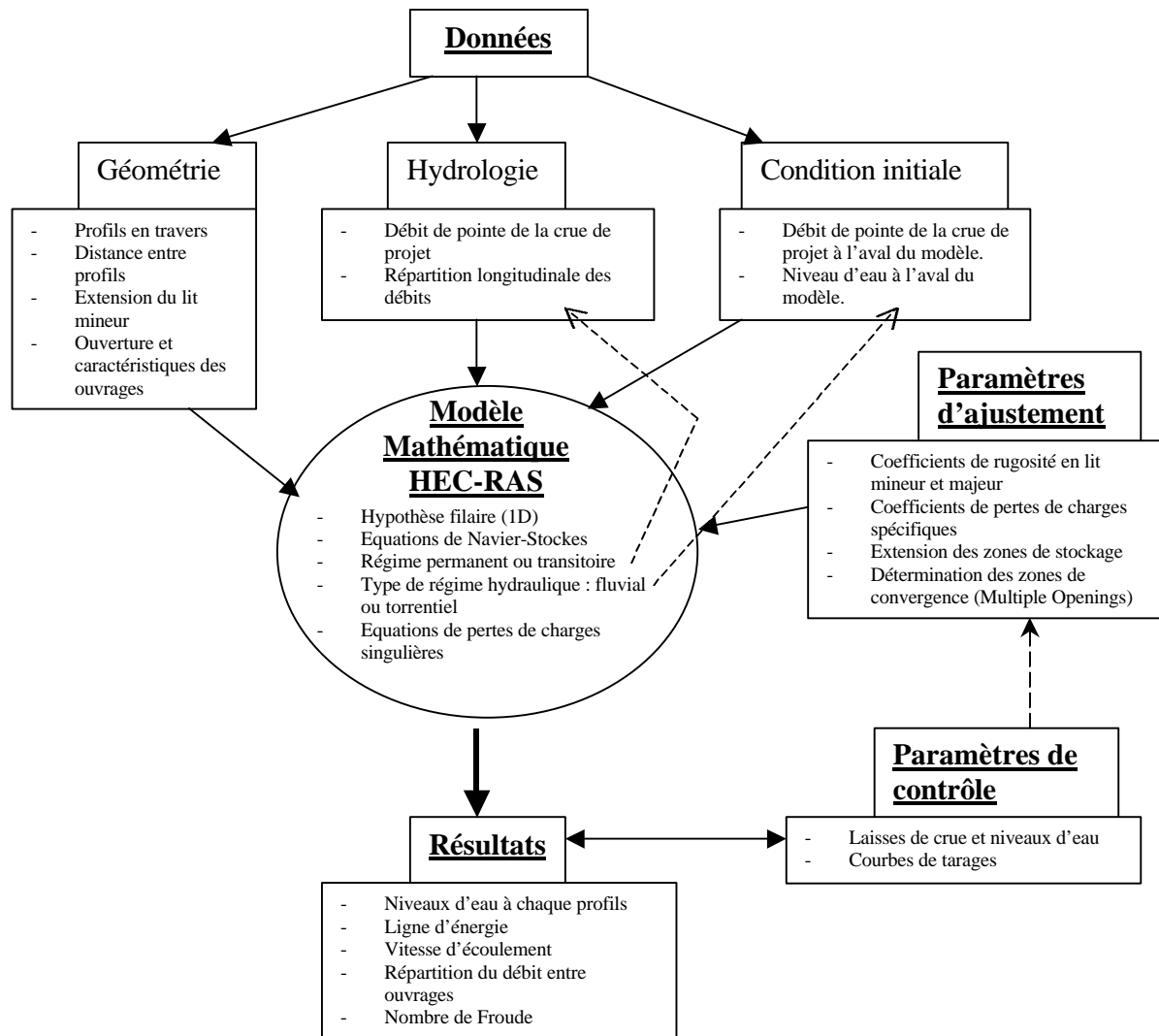


Figure 30 : Schématisation des étapes et données nécessaires à la réalisation d'un modèle mathématique d'écoulements sous HEC-RAS.

Les résultats fournis par HEC-RAS se présentent sous forme graphique (profil en long de la ligne d'eau, de la ligne de charge, niveau d'eau pour chaque section en travers, vue en 3D des ouvrages et du niveau d'eau...) ou sous forme de tableaux (vitesses d'écoulement, nombre de Froude...) (la totalité des résultats bruts sous forme de tableaux est disponible en annexe 6).

3.3 Discussion quant-aux limites de la modélisation.

Avant d'aborder l'exploitation des résultats du modèle hydraulique et son calage, il est nécessaire de faire un point sur les limites d'une telle approche.

En effet, lorsqu'on réalise un modèle numérique d'écoulement, il faut bien garder à l'esprit que celui-ci ne résoudra pas tous les problèmes. Ses résultats ne sont que le reflet des données qui lui ont été fournies et des hypothèses de calculs qui ont été choisies. Ils doivent

donc être pris avec précautions et garder à l'esprit les différentes sources potentielles d'incertitudes inhérentes à une telle démarche.

Ces incertitudes peuvent intervenir dans tous les compartiments de la représentation schématique d'un modèle mathématique d'écoulement présenté ci-dessus (voir figure 30), à savoir : Les données, les paramètres d'ajustement, le modèle lui-même, et enfin les paramètres de contrôle. Dans certains cas nous avons déjà abordé sommairement certains biais éventuels, nous tenterons ici d'en faire un inventaire plus complet, et surtout nous examinerons le cas particulier de la Théols.

➤ Incertitudes liées aux données :

1- Les données géométriques : souvent considérées comme mesurables sans trop de biais, elles peuvent pourtant en comporter d'importants, comme c'est le cas sur la Théols.

- Hypothèses liées à la représentativité de levés topographiques ponctuels pour représenter un espace topographique continu : peut jouer un rôle important dans la réponse du modèle.
- Imprécision dans le levé des profils sélectionnés : normalement peu d'écart (méthodologie éprouvée et matériel performant), et relatif lissage dans le modèle pour de petites imprécisions.
- Problème de la prise en charge des ouvrages mobiles autorégulés ou non : Quelle géométrie prendre ? Dans le cas de la Théols les barrages automatiques sont considérés comme effacés. Les vannages manuels sont généralement considérés comme en position basse (action de l'homme aléatoire par temps de crue).
- Problème de la prise en compte d'éventuelles embâcles : Peut sensiblement jouer sur la ligne d'eau.
- Problème de la prise en compte des biefs de moulins et bras annexes : les biefs ne sont généralement pas représentés (pas de pente, donc pas d'écoulement en crue et zone de stockage faible). Les bras annexes sont levés dans le profil en travers.
- Modification sensible de la géométrie entre la crue de projet et la géométrie lors de levés de terrain : cas sur la Théols, modification sensible de la ligne d'eau.

2- Les données hydrologiques : Généralement on dispose de chroniques plus ou moins complètes des événements, de courbes de tarages... Néanmoins la précision pour les événements extrêmes est toujours à remettre en cause.

- Absence de données fiables sur les débits pour la crue de référence et pour le fonctionnement normal.
- Problème lié à l'ancienneté de la crue de référence.
- Pas d'information fiable concernant la répartition longitudinale des débits. Nécessité de passer par des formules d'approximation (Myer), pas toujours pertinent en fonction de la nature géologique du sous-sol.

3- La Condition initiale du modèle.

- Rejoint la problématique évoquée pour l'hydrologie. Sur la Théols, présence d'une condition aval considérée comme fiable (confluence avec l'Arnon, PPRI approuvé).

➤ Incertitudes liées aux paramètres d'ajustement.

- Problème de la détermination empirique des coefficients de rugosité de Strickler, et correspondance en fonction du développement de la végétation, de l'évolution de l'usage des sols.
- Problème de détermination des coefficients de perte de charge singulière au niveau des ouvrages.
- Difficulté de la définition de l'extension des zones de stockage
- Difficulté de la définition des zones de convergence des écoulements dans le cas d'ouvrages à ouverture multiple.

➤ Incertitudes liées aux modèle mathématique. (Le terme d'incertitude est ici à discuter puisque le calcul est considéré comme juste, les incertitudes venant de la simplification faite par la mise en équation et par le choix de ces dernières.)

- Simplification de l'Hypothèse filaire (1D) : acceptable dans le cas d'un calcul de ligne d'eau sur un secteur d'étude long ou la direction des écoulements est bien définie. Eventuels problèmes dans les zones de stockage ou les lignes de courants peuvent n'être pas parallèles.
- Hypothèse de régime permanent : pas de problème dans le cas du calcul d'une côte d'eau maximale (AZI)
- Perte de charge linéaire par la formule de Strickler : bon ajustement empirique
- Perte de charge spécifique : Bon ajustement dans le cas d'ouvrages bien définis (seuil, piles...), dans le cas d'ouvrages moins définis l'ajustement est plus hasardeux
- Divergence progressive du modèle du fait des itérations aval-amont.

➤ Incertitudes liées aux paramètres de contrôle.

- Problème du manque de données pour les crues anciennes et en zones rurales. Cas sur la Théols pour la crue de projet (1910)
- Problème de confusion entre les années, pour des crues rapprochées dans le temps (confusion probable 1977, 1979 sur la Théols)
- Eventualité du déplacement d'une laisse (travaux sur un bâtiment...)
- Position de la laisse par rapport aux lignes de courant
- Possibilité que la laisse n'indique pas le maximum de crue.
- Problèmes liés à une perturbation ponctuelle des écoulements influant sur la ligne d'eau locale.

Comme on peut le voir, les sources d'incertitudes sont potentiellement nombreuses. Dans la plupart des cas, on peut toutefois considérer certaines variables comme fiables. Ainsi la

géométrie et dans une moindre mesure les paramètres hydrologiques et les niveaux d'eau pour un débit donné peuvent parfois être connus avec une bonne précision. La calibration du modèle se borne alors à la retouche des paramètres d'ajustement. Dans le cas de la Théols, on l'a vu, très peu de choses sont connues avec précision, les incertitudes peuvent donc se cumuler et l'analyse est plus complexe.

De précédentes études, (étude de sensibilité des modélisations 1d : étape 1 recensement et quantification des sources d'incertitude externes, CETMEF, 2001 et Fiabilité des données topographiques et bathymétriques pour les calculs d'hydraulique, 2000, Salomon P.), nous permettent par ailleurs de spécifier des fourchettes d'imprécision généralement observées et acceptables dans le cadre d'une telle étude. (voir annexe 7)

4. Exploitation des résultats du modèle numérique d'écoulement.

4.1 Validation du modèle.

La validation du modèle consiste à comparer les sorties du logiciel d'hydraulique avec la réalité pour un événement connu avec une relative précision et de voir si les écarts observés sont acceptables. On considère par la suite, que si le modèle représente bien la réalité dans certaines conditions (généralement on prend une crue décennale bien connue), celui-ci donnera aussi des résultats fiables pour une crue plus importante.

Sur la Théols, du fait du manque d'information sur l'hydrologie cette phase s'avère, là encore, délicate.

En effet, les débits de crues étant largement inconnus, la démarche a consisté à tenter de faire correspondre les hauteurs d'eau du modèle avec les courbes de tarage établies ponctuellement par la DDE. Nous avons également pu vérifier la validité du modèle par comparaison avec des données d'observations jugées fiables.

La première démarche de validation a donc été d'injecter différents débits (issus de la formule de Myer en première approximation) dans le modèle et d'établir une courbe de tarage propre au modèle. Nous avons ensuite comparé cette courbe de tarage avec celle établie sur le terrain au niveau du pont de Meunet-Planches sur la RD 918. Le modèle donne ainsi les lignes d'eau suivantes (voir figure 31) pour les débits caractéristiques suivants :

- 10m³/s à l'exutoire soit 3.5m³/s à Meunet-Planches (module annuel)
- 20m³/s à l'exutoire soit 7m³/s à Meunet-Planches (crue moyenne annuelle)
- 50m³/s à l'exutoire soit 17m³/s à Meunet-Planches (crue biennale)
- 75m³/s à l'exutoire soit 26m³/s à Meunet-Planches (crue décennale)
- 100m³/s à l'exutoire soit 35m³/s à Meunet-Planches (crue centennale)
- 150m³/s à l'exutoire soit 51m³/s à Meunet-Planches (crue de projet)

On peut alors déterminer les hauteurs d'eau pour chaque débit (fond à 139.96m NGF), et les comparer avec les données issues de la courbe de tarage réalisée (voir figure 32).

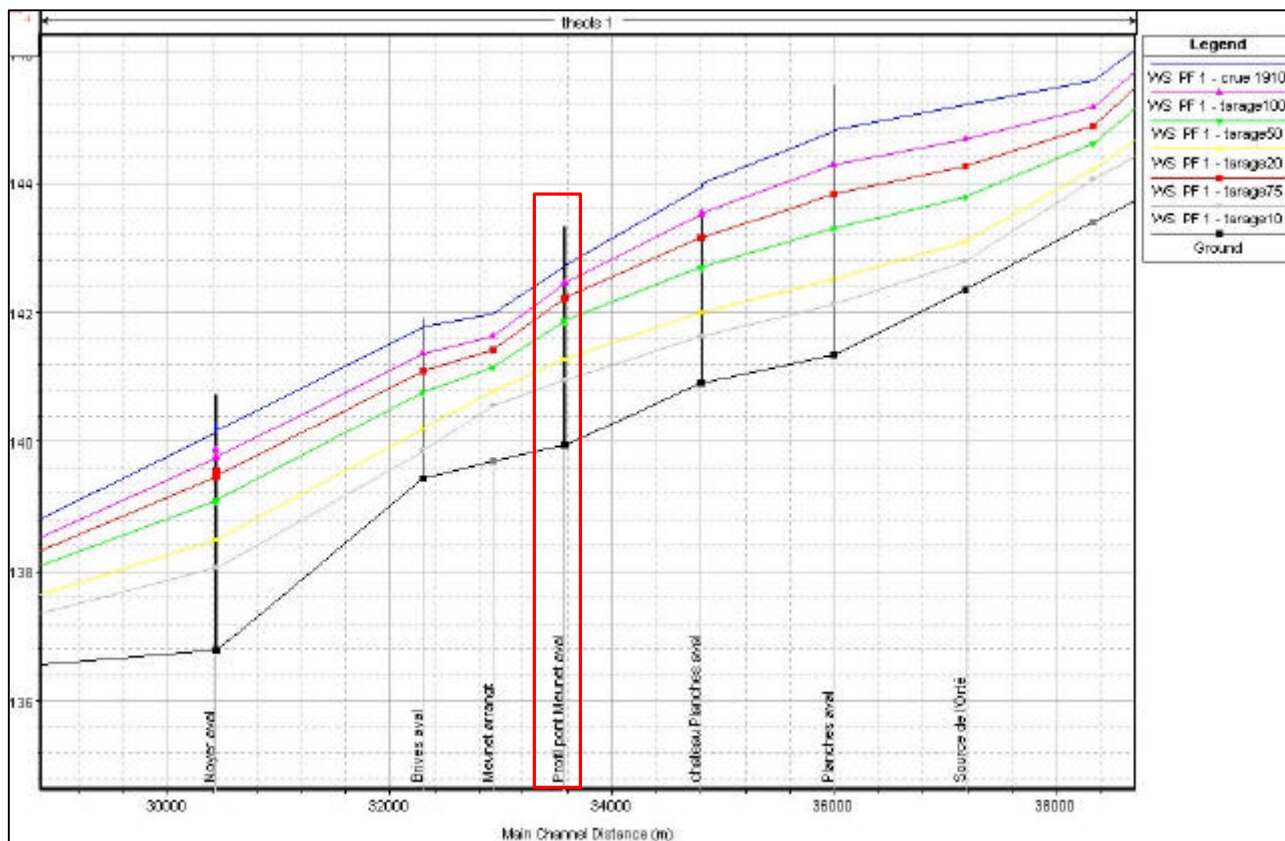


Figure 31: Lignes d'eau issues du modèle pour différents débits caractéristiques : zoom sur la région de Meunet-Planches (rectangle rouge)

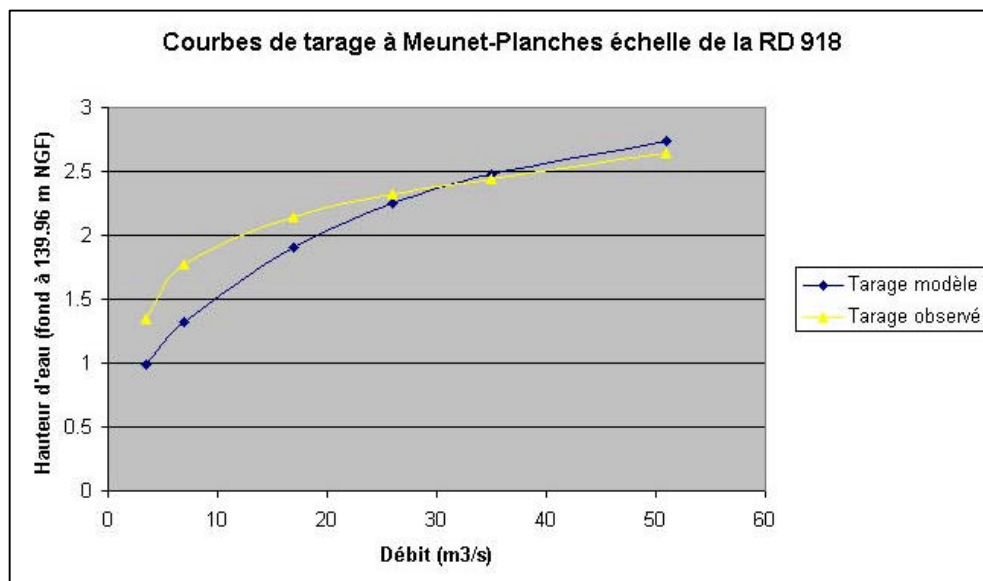


Figure 32 : Courbes de tarage observée et calculée à Meunet-Planches.

On peut donc voir que si un écart (40cm maximum pour un débit de 20m3/s à l'exutoire), est significatif pour les faibles débits, les deux courbes sont ensuite très proches (écarts de 7,4 et 9 cm pour les débits de 75, 100 et 150 m3/s à l'exutoire). Le modèle semblant bien reproduire la réalité observée.

La seconde démarche de validation repose sur le témoignage de Mr Malou (président du syndicat d'aménagement de la rivière Théols et de ses affluents), concernant le fonctionnement hydrologique du cours d'eau en crue : Celui-ci nous a indiqué un point du terrain naturel se trouvant en lit majeur sur ses terres (lieu dit la Gravelle, commune de Brives, à environ 8.5km en amont d'Issoudun (voir carte de situation du point en annexe 8)), en nous indiquant que lorsque l'eau atteignait ce point, cela correspondait à une hauteur d'eau au niveau du pont St-Paterne telle que le pont ne présentait pratiquement plus de tirant d'air.

La démarche a donc été de niveler ce point (135.8m NGF), puis de déterminer par essais successifs (variation du débit dans le modèle), le débit nécessaire pour que la ligne d'eau atteigne ce point, soit 88m³/s à l'exutoire et 47m³/s à la Gravelle. On regarde ensuite la ligne d'eau au niveau du pont de St-Paterne (voir figure 33 et 34).

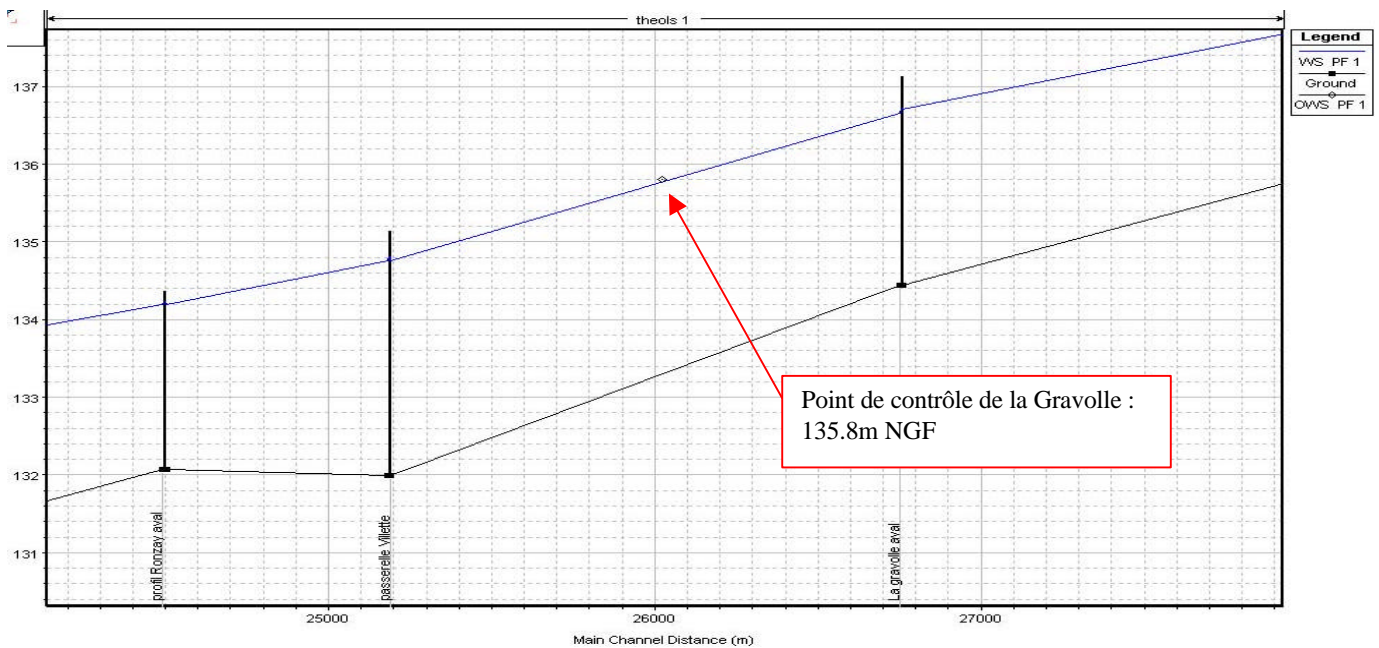


Figure 33 : Calage de la ligne d'eau du modèle pour un débit de 88m³/s à l'exutoire (47m³/s à la Gravelle), avec le point de contrôle.

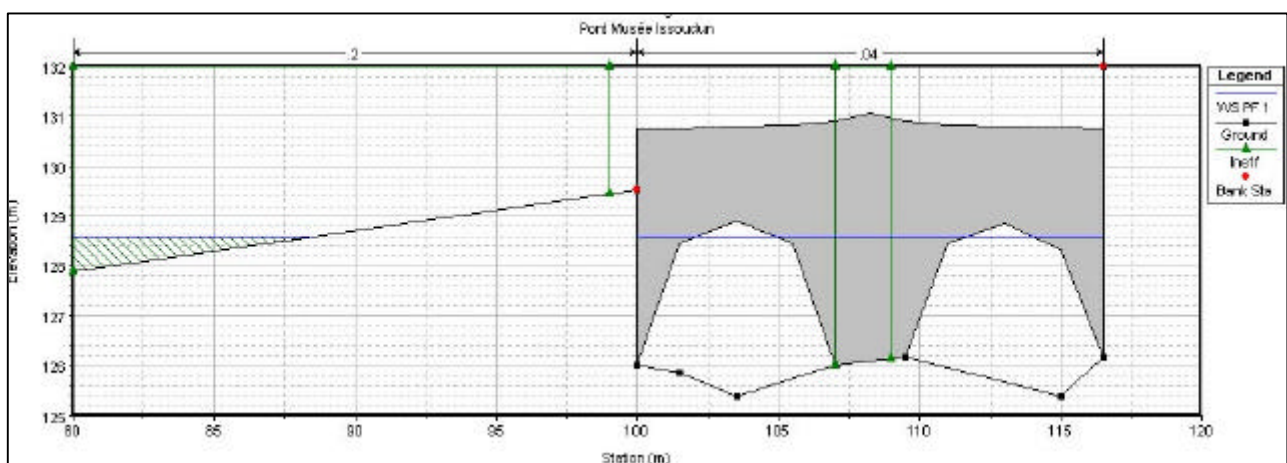


Figure 34 : Niveau d'eau donné par le modèle au pont de St-Paterne pour un débit de 88m³/s à l'exutoire.

Le niveau d'eau donné par le modèle au niveau du pont de St-Paterne est alors de 128.59m NGF, alors que l'intrados du pont (clé de voûte) est coté à 128.90m NGF. Le tirant d'air est donc pratiquement nul. Cela correspond bien aux observations.

On en conclue donc à la validation du modèle. Toutefois, il faut garder à l'esprit que cette validation est effective avec la géométrie actuelle du lit, et pour des données de contrôle postérieures au réaménagement de la Théols.

4.2 Calage avec la crue de projet (1910)

Le calage avec la crue de projet consiste à comparer la ligne d'eau donnée par le modèle pour le débit estimé de la crue de 1910 (150m³/s à l'exutoire), avec les laisses de crue de 1910 retrouvées sur le terrain.

En ce qui concerne la partie traitée dans cette étude (amont de Ste-Lizaigne), elles sont au nombre de 6 seulement (voir figure 35). Elles sont principalement situées dans l'agglomération d'Issoudun : deux comprises entre la rocade sud et l'amont du pont St-Paterne (Amont St Paterne), dont la fiabilité est jugée relativement bonne (concordance entre elles, et marque gravée pour l'une des deux). Une dans la rue du moulin St-Paterne et qui correspond à la photo 5 précédemment citée dans cette étude (3 Maisons) et considérée comme fiable (bien que la photo ne corresponde pas nécessairement au maximum de crue). Une laisse au niveau du pont d'Andraulde (témoignage issu de : Clémont Régis, 1994), dont la fiabilité est inconnue (Andraulde). Une dernière à l'aval de l'agglomération au niveau du pont de St-Denis (St-Denis) et dont la fiabilité est inconnue.

		Laisse de crue 1910				
		Code	cote observée (m) NGF	PM	Type	Qualité
1	Meunet	10	143.406	32250	marque	1
2	Amont St Paterne	20	130.639	17745	marque	2
3	Amont St Paterne	30	130.51	17580	témoignage	2
4	3 Maisons	40	128.955	17430	photo	1
5	Andraulde	50	126.353	16250	témoignage	3
6	St Denis	60	126.245	15340	témoignage	2

Figure 35 : Tableau des laisses de crue de 1910.

Les couleurs jaune et orange correspondent aux différents quartiers d'Issoudun, les bleus aux autres communes
L'alternance gris blanc signale le passage à une laisse de crue différente (géographiquement).
La colonne Code renvoie au cahier des laisses de crue.

Une seule est en dehors de l'agglomération d'Issoudun, et se situe au niveau du pont de Meunet-Planches, considérée comme fiable (marque gravée) (voir annexe 5 pour la carte de localisation des laisses de crue, et leur description). Le niveau d'eau du modèle pour le débit estimé en 1910 nous donne les écarts suivants par rapport aux laisses de crues (voir figures 36, 37 et 38)

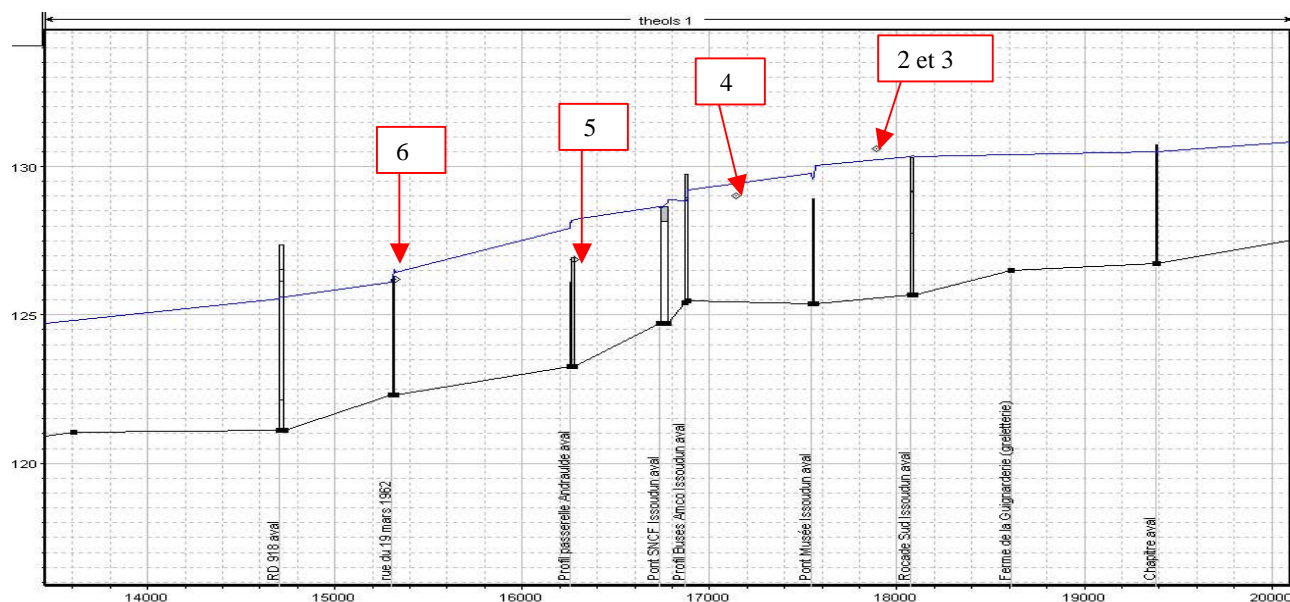


Figure 36 : Comparaison entre ligne d'eau du modèle et laisses de crues, secteur d'Issoudun

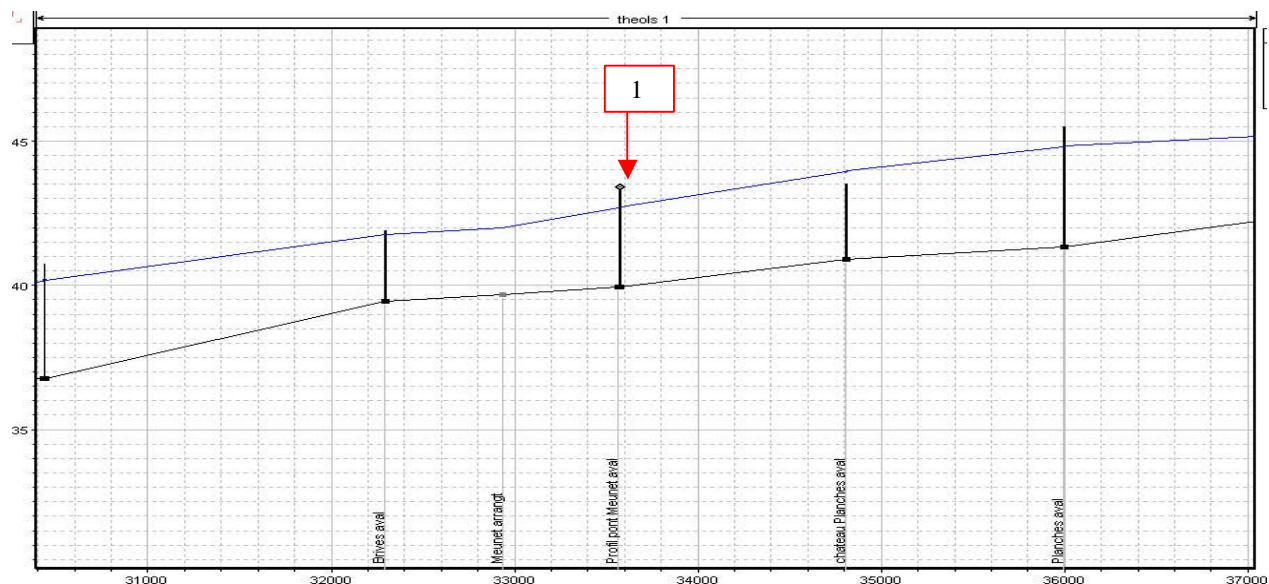


Figure 37 : Comparaison entre ligne d'eau du modèle et laisses de crue, secteur de Meunet-Planches

Laisse de crue 1910					
	Code	PM (m)	cote observée (m) NGF	cote modèle (m) NGF	écarts modèle/observée (m)
1 Meunet	10	32250	143.406	142.356	-0.55
2 Amont St Patern	20	17745	130.639	130.389	-0.25
3 Amont St Patern	30	17580	130.51	130.389	-0.25
4 3 Maisons	40	17430	128.955	129.355	+0.40
5 Andraulde	50	16250	126.353	127.923	+1.07
6 St Denis	60	15340	126.245	126.195	-0.05

Figure 38 : Tableau des écarts entre ligne d'eau calculée et altitudes des laisses de crue.

Les écarts rencontrés sont relativement importants. La laisse de crue numéro 5, est visiblement trop basse, puisqu'elle donne un niveau d'eau qui est même inférieur à des crues de type 1977 ou 1979, dont la récurrence est bien plus élevée que celle de 1910. Elle est ainsi rejetée de l'étude, celle-ci étant de toute évidence aberrante. Dans l'agglomération d'Issoudun, les autres laisses sont soit au dessus, soit au dessous de la ligne d'eau calculée (écart maximal de 40cm au dessus pour la laisse n°4). Cela est très certainement du aux nombreux changements de géométrie du lit dans la traversée d'Issoudun, ainsi que la construction d'ouvrages nouveaux.

La laisse n°4 (qui correspond à la laisse relevée d'après la photo présentée dans la partie hydrologie (voir photo 5)) est ainsi située en amont d'un nouvel ouvrage présentant une section d'écoulement réduite et exhaussant sensiblement la ligne d'eau (+0.25m de remous).

La situation pour la laisse de crue située à Meunet-Planches est plus étonnante, puisque le modèle donne un niveau d'eau plus de 50cm en dessous de la laisse de crue. Cela est certainement du à notre méconnaissance des conditions hydroclimatiques de la crue de 1910, qui nous conduit certainement à sous estimer la part des apports amonts, ainsi qu'au curage du lit au droit du pont (on retrouve dans les archives des données indiquant un abaissement de 80 cm du fond du lit).

On obtient alors un calage satisfaisant (écart inférieur à 10cm) pour cette laisse de crue en modifiant la géométrie initiale (remontée de 80cm du fond) et en optant pour une nouvelle répartition longitudinale des débits (voir figure 39).

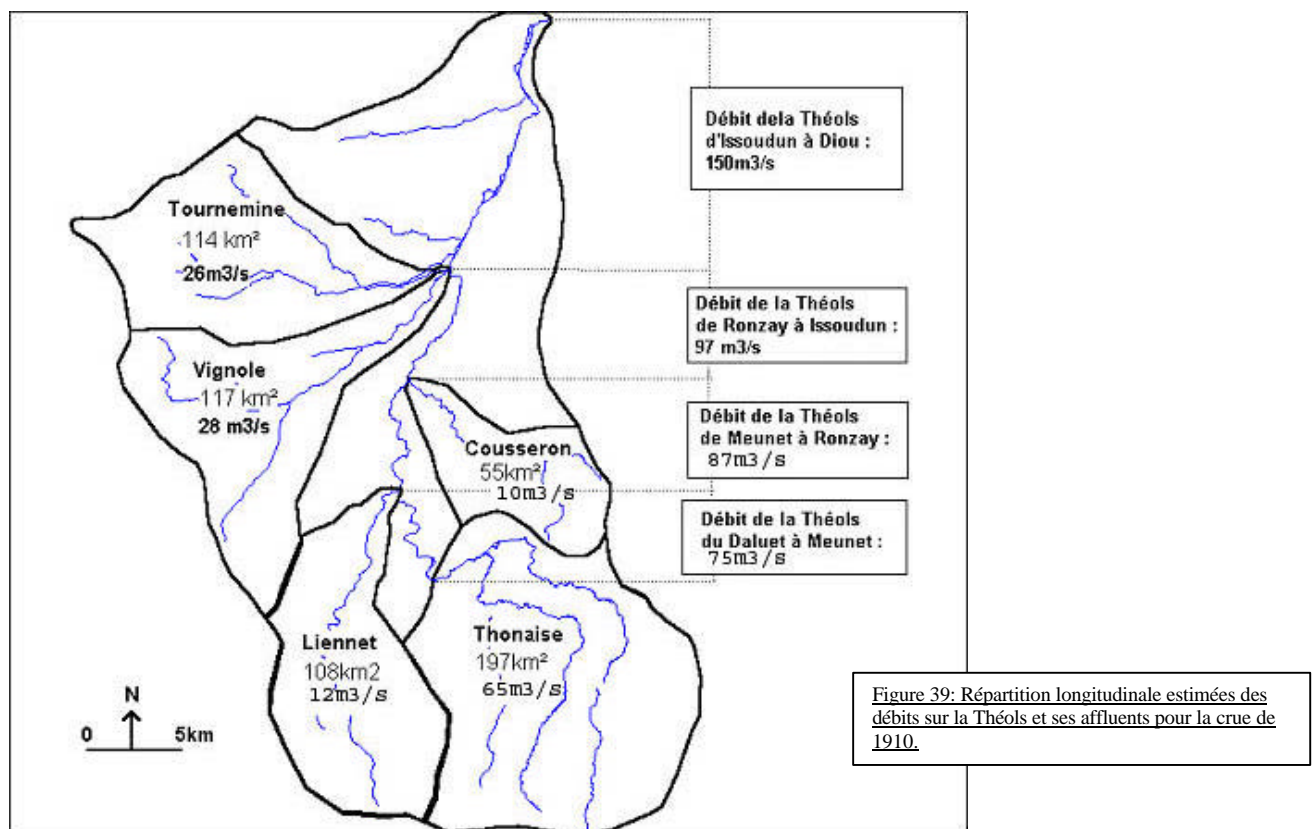


Figure 39: Répartition longitudinale estimées des débits sur la Théols et ses affluents pour la crue de 1910.

On obtient donc *in fine* un calage relativement satisfaisant, compte tenue des nombreuses incertitudes, du modèle avec la crue de 1910 (voir limites de tolérance spécifiées en annexe 7).

Face aux incertitudes, la règle sera de privilégier la sécurité des biens et personnes. Ainsi, dans les cas où le modèle nous indiquera une ligne d'eau supérieure aux laisses de crue (cas dans Issoudun, du fait des nouveaux ouvrages) on prendra en compte cette nouvelle ligne d'eau. A contrario, lorsque les modifications du lit de la rivière ont visiblement permis un abaissement de la ligne d'eau, les repères de crue anciennes seront alors pris en compte pour la réalisation de l'AZI.

4.3 Réalisation de la carte d'aléa : méthodologie.

L'AZI se compose de 10 cartes au format A3, et à l'échelle 1/10000^{ème} (voir Tableau d'assemblage en annexe 9 et cartes d'aléa en annexe 10). Elles sont établies sur fond topographique IGN Scan25 en noir et blanc pour une meilleure lisibilité. Elles comportent un certain nombre d'éléments standards : titre, échelle graphique, légende, date d'établissement et source (pour plus d'informations se reporter à : Représentation cartographique dans le cadre des études hydrauliques, 2004, CETMEF Club Cours d'Eau).

Les informations reportées sur les cartes sont les suivantes :

- Limites communales et nom de la commune
- Limite du champs inondable pour la crue de projet (1910)
- Emplacements des profils en travers et cote atteinte par la crue de référence à leur emplacement
- Zonage des classes d'aléa.

Les niveaux d'aléas sont déterminés en fonction de l'intensité des paramètres physiques de l'inondation de référence. Dans le cas de la Théols, ce sont essentiellement la hauteur d'eau et la vitesse d'écoulement.

Dans tous les cas, on pourra qualifier l'aléa à partir de la hauteur de submersion, en se calant sur une hauteur de un mètre constituant la limite inférieure de l'aléa fort. La valeur de un mètre correspond à plusieurs « seuils » : limite d'intervention des engins terrestres, des véhicules de secours ; mobilité fortement réduite d'un adulte et impossibilité d'un enfant ; soulèvement des véhicules ; limite d'efficacité d'un batardage mis en place par un particulier. Cette hauteur peut être modifiable dans les espaces urbanisés en fonction des vitesses de courant.

La connaissance des vitesses est difficile à apprécier. Si des données quantitatives existent, on considérera que la vitesse est faible en dessous de 0,20m/s, et forte au-delà. Sinon, on évaluera la vitesse de façon qualitative.

Dans notre cas, nous avons considéré une vitesse élevée dans le lit mineur de la rivière, ce qui entraîne une qualification en aléas très forts, et de faibles vitesses dans le reste de la plaine alluviale.

La durée de submersion n'est pas prise en compte.

On distingue ainsi quatre niveaux d'aléas : faible, moyen, fort et très fort, en fonction des vitesses de courant et des hauteurs d'eau (voir figure 40).

Vitesse Hauteur	Faible	Forte
H < 0.5m	faible	moyen
0.5 < H < 1m	moyen	fort
H > 1m	fort	très fort

Figure 40: Qualification des classes d'aléa en fonction de la vitesse du courant et de la hauteur de submersion.
Source : Leï lani Bonnin.

Le tracé sur le fond de carte des zones d'aléa est déterminé par projection dans le plan des hauteurs d'eau calculées par le modèle.

4.4 Commentaire des cartes de l'Atlas des Zones Inondables (AZI).

L'intégralité des cartes d'aléa est disponible en annexe 10. Les 3 premières planches ont été réalisées lors d'une étude précédente (Bonnin Leï lani, 2005), les 7 suivantes sont issues de cette étude.

Il faut noter que ces cartes, si elles sont dans l'ensemble établies, nécessiteront ponctuellement, pour certains secteurs à enjeux (certaines zones d'habitations notamment) des levés topographiques complémentaires. En effet, il faudra parfois vérifier précisément le caractère inondable de certains bâtiments ou déterminer précisément la classe d'aléa qui les concernent. Ces modifications de détail ne modifieront pas la physionomie générale des cartes.

On peut noter lorsqu'on analyse les cartes, la très grande emprise dans la plaine inondable de la classe d'aléa fort. Cela est dû à la topographie très plate du lit majeur, ainsi qu'aux fortes hauteurs d'eau considérées pour la crue de projet.

Dans les secteurs ruraux amont, on note peu d'infrastructures menacées (seules quelques routes légèrement submergées, un certain nombre de moulins, d'habitations ou de granges légèrement inondés), les constructions étant la plupart du temps remarquablement situées par rapport à la limite d'aléa.

A l'approche du secteur urbanisé d'Issoudun, en revanche, de nombreux cas peuvent poser problème lors de la survenue d'une crue de l'ampleur de celle de 1910. En effet, la création de nombreux aménagements nouveaux (ouvrages de franchissement de la rocade au sud, pont immédiatement à l'amont du pont SNCF) génère une hausse de la ligne d'eau importante qui est loin d'être compensée par le travaux de recalibrage. Si l'on ajoute à cela les secteurs historiquement vulnérables, ainsi que les nouvelles implantations dans le lit majeur, la situation pour l'agglomération d'Issoudun est plus problématique.

On peut ainsi isoler les cas suivants :

- A l'amont d'Issoudun, un lotissement récent au niveau du lieu dit « La Greletterie » construit dans les années 80 et situé en secteur inondable (aléa faible à moyen) (celui-ci n'est pas reporté sur les cartes, le fond de plan SCAN 25 étant antérieur à la construction des bâtiments).
- La rocade sud de la déviation d'Issoudun est submersible par plus de 50 cm d'eau (aléa moyen) sur la quasi totalité de son franchissement du lit de la Théols.
- Un nombre important d'habitations du quartier St-Paterne et le pont du même nom classés en aléa moyen (augmentation de l'aléa par rapport à la situation en 1910, du fait du remous généré par le pont de la Rue des Ponts).
- Le pont de la ligne SNCF potentiellement submersible par quelques décimètres d'eau.
- La station d'épuration des eaux en aléa fort (fort risque de pollution organique des eaux)
- Un grand nombre d'habitations, ainsi que la rue de Chinault classés en aléa fort.
- La rue St-Denis ainsi que la rocade nord submersibles localement (aléa moyen ou fort).

Dans la partie aval à l'agglomération d'Issoudun, les communes les plus touchées sont celles de Reuilly (hameau de la Ferté) et Diou. Certaines habitations étant même classées en aléa fort.

Cette liste des enjeux menacés est bien évidemment incomplète et l'analyse des risques s'effectuera ultérieurement lors de l'élaboration du PPRI. On peut néanmoins noter que la situation pour l'agglomération d'Issoudun est relativement préoccupante, avec un grand nombre d'habitations classée en aléa fort ou moyen, et un réseau de communication routier et ferroviaire vulnérable.

CONCLUSION

Cette étude a permis de définir l'extension maximale de la zone inondable dans la vallée de la Théols. Elle a également permis de qualifier et de définir spatialement les différentes classes d'aléa au sein de cette zone inondable.

Pour cela nous avons retenu comme crue de référence, la crue de 1910, celle-ci étant nettement supérieure aux autres crues connues, ainsi que supérieure à la crue centennale. Un débit de $150\text{m}^3/\text{s}$ a été retenu à l'exutoire.

La méthodologie a consisté en une première analyse hydrogéomorphologique, suivie d'une modélisation hydraulique numérique. Après un certain nombre d'ajustements dus aux modifications de la géométrie de la vallée, ainsi qu'à l'absence de données réellement fiables sur l'hydrologie, nous sommes parvenu à un calage du modèle hydraulique dont les écarts observés d'avec la réalité s'expliquent.

Celui-ci nous indique la probabilité de désordres important dans l'agglomération d'Issoudun le jour où une crue de type projet surviendra.

La prise en compte du risque, et son éventuelle réduction par l'application de mesures d'amélioration des écoulements seront à spécifier lors de l'établissement du PPRI.

Un meilleur suivi hydrologique (la pose d'un limnimètre est actuellement à l'étude) serait souhaitable pour disposer de chronique hydrologique fiable. Cela permettrait également d'envisager la mise en place d'un système d'annonce de crues.

BIBLIOGRAPHIE.

- Amoros C et Petts G. (1993)** - Hydrosystèmes fluviaux. *Masson (Paris)*.
- Bonnin L. (2005)** - Atlas des zones inondables de la Théols . *IUT Nancy Brabois pour le LRPC de Blois*.
- Bravard J-P., Petit F. (2000)** – Les cours d’ eau : dynamique du système fluvial. *Ed Armand Colin (Paris)*
- Clemont R. (1994)** - Etude Hydraulique en vue de l’établissement d’une carte d’inondabilité sur la Théols et sur l’Indre dans la région de la Châtre. *IMACOF pour le LRPC de Blois*
- COMIREM (2000)** - Etude générale et cartographie réglementaire d’inondabilité de la vallée de la Théols. Commune d’Issoudun, Meunet-Planches et Ste-Lizaigne.
- Faure J.B. (2004)** – Choix de la modélisation dans le cadre des études hydrauliques. *Cemagref, Club Cours d’Eau*.
- Féréol G. (2005)** - Synthèse bibliographique sur l’hydraulique et l’hydrologie de la Théols. *IMACOF pour le LRPC de Blois*
- Goutx D. (2002)** – Hydraulique des cours d’eau. *CETMEF*
- Institut Géographique National (2004)** – Systèmes géodésiques.
- Jouanneau J.C. (2002)** – Modélisation Hydraulique. *LRPC de Blois*
- Lacroix N. (2004)** – Issoudun. *Collec. Mémoire en Images*
- Ministère de l’équipement (1998)** – PPRI : guide méthodologique. *La documentation française*.
- Salomon P. (2000)** – Fiabilité des données topographiques et bathymétriques pour les calculs d’hydraulique. *LRPC de Blois*
- Tekatlían A. (2001)** -Etude de sensibilité des modélisations 1d : recensement et quantification des sources d'incertitude externes. *CETE ; CETMEF*
- Tekatlían A. (2004)** – Représentation cartographique dans le cadre des études hydrauliques. *CETE méditerranée, Club Cours d’Eau*.
- Tekatlían A.(2001)** – Catalogue de techniques d’acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques. *CETE, CETMEF*
- US Army Corps of Engineering Center. (1998)** - HEC-RAS: Application Guide.
- Vidal JP. (2005)** – Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale ; apport de l’intelligence artificielle. *Rapport de thèse CEMAGREF*

Sites Internet

www.ign.fr
www.rndc.fr
www.environnement.gouv.fr/
www.equipement.gouv.fr
www.centre.ecologie.gouv.fr/

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	
SOMMAIRE	page 1
RESUME FRANÇAIS / ANGLAIS	page 2
PRESENTATION EN ANGLAIS (ENGLISH PRESENTATION)	page 3
INTRODUCTION	page 10
I) PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL	page 11
1. Le CETE Normandie Centre	page 11
1.1 Le site de Rouen	page 11
1.2 Le site de Blois	page 11
2. Le LRPC de Blois	page 12
II) CONTEXTE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE	page 14
1. Contexte de l'étude	page 14
2. Problématique de l'étude	page 14
3. Définition de la notion d'aléa, de vulnérabilité ou d'enjeu, et de risque	page 15
III) PRESENTATION GENERALE	page 17
1. Situation	page 17
2. Description du bassin versant de la Théols et des sous-bassin versants : Approche morphométrique et réseau hydrographique	page 17
3. L'occupation du sol	page 20
4. Contexte climatique : températures, précipitations	page 21
5. Contexte géologique	page 22
6. Eléments d'hydrogéologie	page 23
7. Anthropolisation du bassin, actions et effets de l'homme sur le milieu	page 24
7.1 Objectifs de l'aménagement de la Théols	page 24
7.2 Nature des travaux	page 24
7.3 Conséquences des aménagements hydrauliques de curage et de rectification du cours de la Théols	page 26
IV) ETUDE HYDROLOGIQUE : REGIME HYDROLOGIQUE DU COURS D'EAU, ARCHIVES ET CRUES ANCIENNES	page 27
1. Fonctionnement en régime normal	page 27
2. Fonctionnement en crue et choix de la crue de référence	page 28
V) ETUDE HYDRAULIQUE ET REALISATION DU MODELE NUMERIQUE D'ECOULEMENT	page 32
1. Méthodologie générale et principes d'élaboration d'un AZI	page 32
2. Méthodologie de la collecte des données du modèle	page 34
2.1 Levées topographiques et nivellement : les données de la géométrie	page 34
2.2 Utilisation du GPS différentiel (DGPS)	page 37
2.3 Détermination et évaluation des paramètres hydrauliques (rugosité et zones de stockage)	page 39
2.4 Collecte des informations sur les niveaux d'eau atteints lors des crues : Laisses de crue et enquête auprès des riverains	page 40
3. La modélisation hydraulique informatique	page 40
3.1 Principes d'hydraulique fluviale	page 40
3.2 Caractéristiques du modèle hydraulique et fonctionnement du logiciel	page 43
3.3 Discussion quant-aux limites de la modélisation	page 44
4. Exploitation des résultats du modèle numérique d'écoulement	page 47
4.1 Validation du modèle	page 47
4.2 Calage avec la crue de projet (1910)	page 50
4.3 Réalisation de la carte d'aléa : méthodologie	page 53
4.4 Commentaire des cartes de l'Atlas des Zones Inondables (AZI)	page 54
CONCLUSION	page 56
BIBLIOGRAPHIE	page 57
TABLES DES FIGURES ET PHOTOS	page 59
ANNEXES	page 61

LISTE DES FIGURES

- Figure 1** : Organigramme général
- Figure 2** : Les quatre départements du LRPC de Blois et leurs activités.
- Figure 3** : Principe de caractérisation du risque par combinaison de la notion d'aléa et de vulnérabilité.
- Figure 4** : Localisation du bassin versant de la Théols.
- Figure 5** : Relation entre le coefficient de Gravelius et le débit à l'exutoire (d'après Knapp, 1979)
- Figure 6** : Synthèse des paramètres morphométriques du bassin versant de la Théols.
- Figure 7** : Ordination de Strahler de la Théols et de ses affluents.
- Figure 8** : Superficie des sous bassins-versants de la Théols.
- Figure 9** : Profil en long de la Théols.
- Figure 10** : Carte de l'occupation des sols du bassin de la Théols.
- Figure 11** : Diagramme de la pluviométrie moyenne mensuelle à Chateauroux.
- Figure 12** : Extrait de la carte géologique au 50000^{ème}, Issoudun. Partie sud du bassin de la Théols.
- Figure 13** : Exemple de sondage réalisés sur la Théols par le laboratoire Sogéo (1974) en vue de l'aménagement de la Théols.
- Figure 14** : Carte synthétique des données hydrologiques connues pour le bassin de la Théols.
- Figure 15** : Calcul du débit de projet à l'exutoire par la formule de Myer.
- Figure 16** : Répartition longitudinale théorique des débits de la Théols et apports respectifs des affluents selon la formule de Myer.
- Figure 17** : les différentes unités morphologiques du lit majeur et leur signification hydrologique.
- Figure 18** : exemple de détermination par photo-interprétation stéréoscopique de l'extension maximale des crues sur la vallée de la Théols (Secteur de Brives).
- Figure 19** : Les principales étapes des études du risque d'inondation
- Figure 20** : Principe de localisation des profils en travers en rivière en vue d'un modélisation hydraulique
- Figure 21** : Schéma de principe du nivellement au théodolite ($\text{Altitude (Z)} = \text{PV-dénivelée-Hauteur de canne}$)
- Figure 22** : Schéma de principe du cheminement topographique.
- Figure 23** : Exemple de profil en travers sur la Théols : représentation graphique des points topographiques levés sur le terrain.
- Figure 24** : Schéma de principe du fonctionnement du DGPS.
- Figure 25** : Localisation des points GPS pris sur la Théols
- Figure 26** : Grandeurs physiques de la géométrie du lit.
- Figure 27** : Schématisation du Théorème de Bernoulli
- Figure 28** : Formule de Manning-Strickler
- Figure 29** : Relation entre la charge spécifique (H) et la hauteur d'eau (y) pour un débit constant.
- Figure 30** : Schématisation des étapes et données nécessaires à la réalisation d'un modèle mathématique d'écoulements sous HEC-RAS.
- Figure 31** : Lignes d'eau issues du modèle pour différents débits caractéristiques : zoom sur la région de Meunet-Planches
- Figure 32** : Courbes de tarage observée et calculée à Meunet-Planches.
- Figure 33** : Calage de la ligne d'eau du modèle pour un débit de 88m³/s à l'exutoire (47m³/s à la Gravelle), avec le point de contrôle.
- Figure 34** : Niveau d'eau donné par le modèle au pont de St-Paterne pour un débit de 88m³/s à l'exutoire.
- Figure 35** : Tableau des laisses de crue de 1910.
- Figure 36** : Comparaison entre ligne d'eau du modèle et laisses de crues, secteur d'Issoudun
- Figure 37** : Comparaison entre ligne d'eau du modèle et laisses de crue, secteur de Meunet-Planches
- Figure 38** : Tableau des écarts entre ligne d'eau calculée et altitudes des laisses de crue.
- Figure 39** : Répartition longitudinale estimées des débits sur la Théols et ses affluents pour la crue de 1910.
- Figure 40** : Qualification des classes d'aléa en fonction de la vitesse du courant et de la hauteur de submersion.

LISTE DES PHOTOS

Photo 1 : Type d'exurgences karstiques rencontrées sur le bassin de la Théols : source de l'Orté

Photo 2 : Type d'exurgences karstiques rencontrées sur le bassin de la Théols : source de la Théols.

Photo 3 : Remblaiements sauvages en lit mineur et majeur dans le lit de la Vignole au niveau de la ferme de la petite Rouache, en amont d'Issoudun.

Photo 4 : Remblaiements sauvages en lit mineur et majeur dans le lit de la Vignole au niveau de la ferme de la petite Rouache, en amont d'Issoudun.

Photo 5 : Carte postale illustrant la crue de 1910 à Issoudun, quartier St-Paterne.

Photo 6 : Exemple de « macaron » de nivellement

Photo 7 : Exemple d'utilisation du théodolite.

Photo 8 : Exemple de levé topographique (bathymétrie) en rivière

Photo 9 : Antenne GPS fixe en station sur la borne IGN de référence.

Photo 10 : Antenne radio de relais des corrections

Photo 11 : Partie mobile du DGPS permettant l'acquisition des points.

ANNEXES