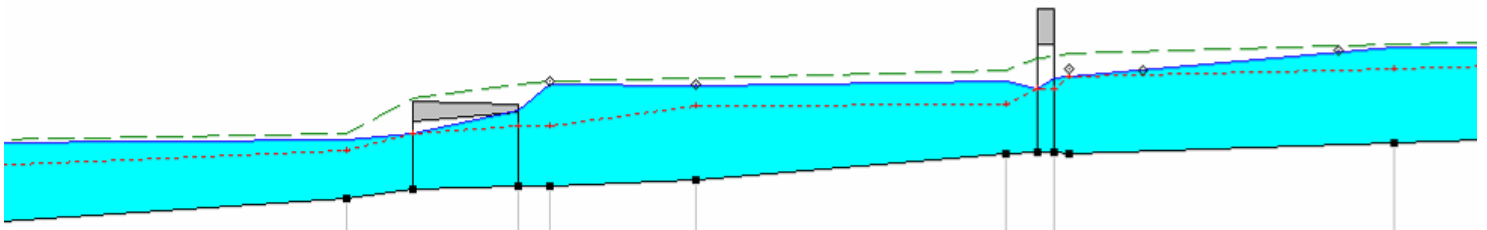
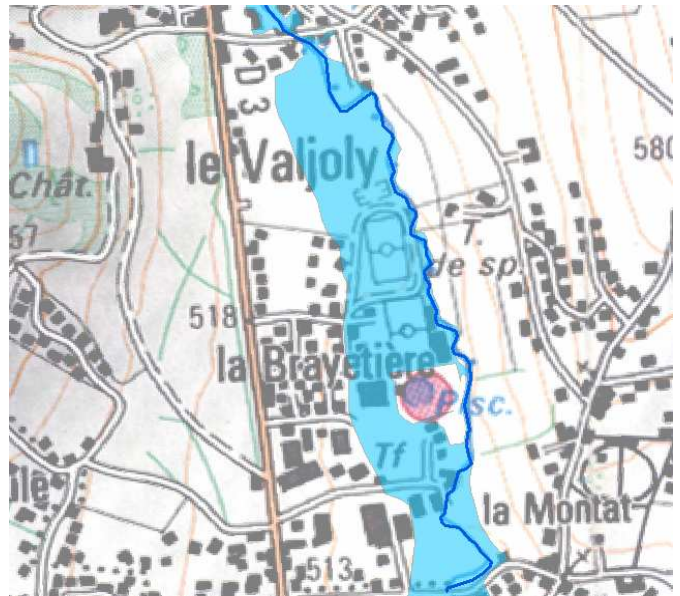


Rapport de stage pour l'obtention de la 2^{ème} année de Master

Modélisation hydraulique de l'Onzon



Eric DRUTEL

Août 2009

Maître de stage : Jérôme Boutigny
Communauté d'agglomération Saint-Etienne Métropole

REMERCIEMENTS

Je tiens d'abord à remercier tout particulièrement mon maître de stage Jérôme BOUTIGNY, technicien hydraulique, pour m'avoir proposé ce stage ainsi que Sylvain BEAUCHET, technicien de rivière, pour tout le temps qu'ils m'ont accordé sur le terrain et au bureau.

Je tiens aussi à remercier François DELORME, responsable de la cellule rivière, pour m'avoir accueilli dans son service et son bureau et m'avoir permis de suivre une formation supplémentaire sur HEC Ras.

Je remercie l'ensemble de la cellule rivière pour m'avoir également fait participer à la sélection du futur système d'alerte aux crues de la collectivité et aux travaux de découverte du Furet et d'aménagement des berges de l'Onzon.

Je remercie Pierre GRANDIDIER, du bureau d'études HTV, pour l'aide apportée dans la structuration de mon étude et ses connaissances en modélisation hydraulique.

Je remercie également l'ensemble des personnes du service environnement de Saint Etienne Métropole pour leur accueil cordial.

PREAMBULE

Le présent rapport concerne la modélisation hydraulique de la rivière l'Onzon dans sa traversée de la zone urbaine de la commune de Sorbiers (42).

Cette rivière est située dans le bassin versant du Furan et fait l'objet d'un contrat de rivières depuis 2005. Lors de l'élaboration de ce contrat de rivières, en 2001, une étude hydraulique a mis en évidence la nécessité de créer un barrage écrêteur de crues sur l'Onzon en amont de la zone urbaine de Sorbiers et La Talaudière.

L'objectif de cette modélisation hydraulique est d'étudier les débordements résiduels en aval de ce barrage et de prévoir les travaux nécessaires pour limiter les débordements, voire les supprimer totalement.

La zone d'étude se situe depuis l'aval du projet de barrage jusqu'à la rue du Puits Pointu dans la zone urbaine.

La particularité de cette étude porte sur le fait qu'elle survient à la suite d'un épisode pluvieux majeur récent, survenu le 2 novembre 2008, où le comportement des écoulements en crue a pu être apprécié sur le terrain (laisses de crue, biefs). Cette crue est la plus importante observée sur l'Onzon et a servi de référence pour l'étude du comportement hydraulique de l'Onzon.

Au lendemain de cet événement, de nombreuses laisses de crues ont été observées, photographiées et marquées sur le terrain.

Une enquête terrain réalisée au début du stage a permis de dresser un inventaire de laisses de crue et tracer le contour de la zone inondable de la crue de novembre 2008.

Elle a révélé de nombreux débordements et en particulier la présence de plusieurs écoulements en lit majeur (biefs), déconnectés de l'écoulement principal situé en lit mineur.

Ces biefs se sont créés à partir de ponts qui n'ont pas la capacité hydraulique de faire transiter la totalité du débit de la crue et sont déconnectés du lit mineur en aval. Ceci s'explique par le fait que le lit mineur n'est pas situé dans le fond de vallée et/ou protégé par une digue (lit de la rivière déplacé dans le passé, pour l'alimentation d'un moulin par exemple). L'écoulement débordant ne rejoint le lit mineur que très loin en aval, créant ainsi des biefs dont le niveau d'eau est dissocié de celui en lit mineur (800 m dans le cas du bief Valjoly).

Deux biefs sont observés au sein de la zone d'étude aux lieux-dits *le Grand Quartier* et *Valjoly* :

- Le bief du Grand Quartier ne crée aucun dommage (écoulement dans un pré puis seulement sur des parties basses de terrain lotis).
- Le bief du Valjoly engendre des dégâts sur un linéaire de 800 m en zone urbanisée (Le complexe sportif et des habitations sont inondés).

Un troisième bief a été observé à l'aval de la zone étudiée, à partir de la rue du Puits Pointu.

Une base de données SIG (Système d'Information Géographique) a ensuite été créée. Elle a permis de positionner différents éléments sur le fond de plan cadastral et de leur attribuer différentes propriétés et liens.

La modélisation hydraulique a été faite sous le logiciel HEC-RAS. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center du U.S Army Corps of Engineers et est ici utilisé en régime permanent (débit constant). Il s'agit d'un modèle unidimensionnel (axe d'écoulement unique et sens d'écoulement imposé) pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre.

Cette modélisation hydraulique a été contrôlée par un bureau d'études indépendant, HTV, qui a apporté ses conseils en matière d'hydraulique fluviale et de modélisation sous HEC Ras. Ce contrôle a été nécessaire afin de valider les futurs aménagements proposés sur l'Onzon.

Le modèle est représenté par une succession de profils en travers dans lesquels le débit de la rivière est injecté. Les profils en travers sont placés perpendiculairement à l'écoulement à chaque changement de section afin de représenter le plus fidèlement possible la topographie du fond de vallée dans lequel s'écoule la crue.

L'étude hydrologique faite par SAFEGE en 2006 a permis de déterminer les débits naturels (Q) de pointe de crue de l'Onzon au droit du futur barrage et donne les débits suivants (voir tableau A ci-dessous) :

	Débits actuels (m ³ /s)			
	Q10	Q30	Q50	Q100
Q amont (sortie barrage)	7.5	16.5	20.6	26.4
Q aval (rue du Puits Pointu)	9.9	21.2	26.5	33.0

Tableau A : débits actuels avant création du barrage

Les apports hydrologiques intermédiaires, provenant des versants du site d'étude, varient de 2.4 m³/s en Q₁₀ (crue décennale) à 6.6 m³/s en Q₁₀₀ (crue centennale). La répartition de ces apports a été faite en premier lieu à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT), qui a permis de définir des sous bassins versants au sein de la zone d'étude, et du plan du réseau d'assainissement pour situer les points d'injections de ces apports.

Le modèle a été calé grâce aux observations des laisses de crues donnant de précieuses indications sur les hauteurs d'eau maximales atteintes et sur les directions d'écoulements. Il a aussi permis d'estimer la répartition des débits au sein des différents biefs.

Le débit de la crue de novembre 2008 a été estimé à environ 25 m³/s au droit du pont de la rue de l'Entente sous lequel la totalité du débit de la crue a transité. Ce débit correspond à une crue de fréquence cinquantennale. La vérification de la cohérence de la ligne d'eau (profil en long) dans le lit mineur avec les laisses de crues a confirmé cette valeur de débit.

Le barrage écrêteur de crues a été dimensionné pour un débit de fuite maximum de 10.5 m³/s (Q₁₀₀ future). Le débit correspondant à l'aval de la zone d'étude est de 17.1 m³/s indiquant que cette crue centennale future est inférieure à la crue de novembre 2008 (26.5 m³/s à l'aval de la zone d'étude).

Les résultats obtenus par la modélisation de la crue centennale future indiquent la présence de plusieurs points de débordements résiduels :

- La section d'écoulement insuffisante du lit mineur et du pont au niveau de la rue du Puits Pointu crée un débordement qui active un bief inondant deux lotissements en aval.
- Le bief Valjoly est actif. Malgré un débit faible (600 l/s), ce bief risque d'engendrer de nouveau des dégâts sur 800 m en zone urbanisée. Deux autres débordements résiduels en aval risquent de rejoindre le bief Valjoly.
- A l'amont, les seuls problèmes rencontrés sont des débordements ponctuels aux profils 31.2 (entreprise Sogran Lotrans) et 33.7 (une habitation touchée).

Les débordements sont effectifs pour un débit en deçà de la crue centennale future. Le débit maximum pouvant transiter dans le lit mineur avant débordement a donc été calculé.

Une carte des risques a été produite : le risque associé a été apprécié en fonction du type d'enjeu, du temps de retour de la crue associée et de la hauteur d'eau (aléa). Deux zones à risque ont été ciblées au niveau du bief Valjoly et en amont de la rue du Puits Pointu où des débordements apparaissent pour un débit inférieur à la crue trentennale future.

Afin de supprimer ces débordements, il est nécessaire de réaliser les travaux suivants :

- Bief rue du Puits Pointu : élargissement de 90 ml (mètre linéaire) de section d'écoulement et recalibrage du pont.
- Bief Valjoly : destruction du pont (désaffecté), élargissement de 185 ml de section d'écoulement et optimisation d'un champ d'expansion de crue.

A l'amont de la rue de l'Entente, des débordements ponctuels subsistent (deux habitations et un tènement industriel touchés). Ces débordements ne peuvent tous être supprimés malgré des travaux coûteux. En effet, l'urbanisation très dense au bord de l'Onzon par endroit ne permet pas de faire transiter le débit centennal futur sans déborder sur des terrains lotis. Seules des protections individuelles ou un déplacement des enjeux hors zone inondables peuvent être envisagés pour ces cas isolés.

SOMMAIRE

1.	Introduction	3
2.	Présentation	3
3.	Matériels et méthodes	8
4.	Résultats	28
5.	Discussion	42
6.	Conclusion	50

RESUME

La communauté d'agglomération St-Etienne Métropole est la structure porteuse du Contrat de rivière Furan et ses affluents. Lors de l'élaboration de ce contrat de rivière, une étude hydraulique a mis en avant un risque important d'inondations en zone urbaine. Ce constat a conduit la collectivité à prévoir la construction de barrages écrêteurs de crues et le réaménagement des berges des cours d'eau afin d'optimiser la section d'écoulement.

Sur l'Onzon, les débordements résiduels qui résulteront du laminage d'une crue centennale ont été étudiés au moyen d'un modèle hydraulique créé avec le logiciel HEC-RAS.

Ce modèle a pu être calé finement grâce à l'étude du comportement des écoulements de la crue de novembre 2008 dont l'intensité est la plus forte répertoriée sur l'Onzon depuis que son lit majeur s'est fortement urbanisé.

Les débordements résiduels impactant des enjeux ont été ciblés. Des travaux de d'élargissement de la section d'écoulement et de modification d'ouvrages ont été proposés afin de d'éliminer ces débordements.

Mots clés : inondation, modèle hydraulique, HEC RAS, crue

Dans le rapport, les mots suivis de * sont définis dans le lexique à la page 51.

ABSTRACT

Saint Etienne Metropole urban community is the structure that is in charge of the River Contract Furan and its tributaries. At the time of the development of this river contract, a hydraulic study highlighted the important risk of flood in the urban area. This report led the community to plan the construction of flood control dams and new arrangements of waterways banks in order to improve the flow section, especially on Onzon, a tributary of Furan River.

On the river Onzon, residual overflows that will result from the lamination of a hundred years return time flood have been evaluated with a hydraulic model created with HEC-RAS software.

It has been possible to adjust finely this model thanks to the study of November 2008 flood flows behaviour, which intensity is the highest recorded on Onzon, since the intense urbanization of its floodplain.

Residual overflows impacting stakes have been targeted. Widening works of flow section and modification of bridges have been suggested in order to get rid of these overflows.

Keywords : flood, hydraulic model, HEC-RAS

1. Introduction

Le Furan et ses affluents ont depuis longtemps été fortement impactés par la présence de l'exploitation minière sur le bassin houiller stéphanois, et plus récemment par la pression de l'urbanisme. L'étude hydraulique réalisée préalablement au contrat de rivières en 2001, par le bureau d'études SOGREAH, a mis en évidence la nécessité de créer un barrage écrêteur de crues sur l'Onzon en amont la zone urbaine de Sorbiers et la Talaudière.

Les études ultérieures, menées par le bureau d'étude SAFEGE, pour dimensionner puis construire ce barrage, ont modifié sensiblement les débits de fuite du barrage à la hausse, induisant ainsi des risques de débordements accrus sur les zones urbaines. Ce constat a conduit la collectivité à étudier précisément ces débordements de manière à les limiter par des aménagements de berge.

Le présent rapport concerne la modélisation hydraulique de la rivière l'Onzon en aval du futur barrage. L'objectif de cette modélisation est de visualiser les débordements résiduels après construction de l'ouvrage puis de prévoir les travaux nécessaires pour limiter les débordements voir les supprimer totalement.

La particularité de cette étude porte sur le fait qu'elle survient à la suite d'un épisode pluvieux majeur récent, où le comportement des écoulements en crue a pu être apprécié sur le terrain (laisses de crue, biefs). La crue de novembre 2008 a servi de référence pour l'étude du comportement hydraulique de l'Onzon.

2. Présentation

2.1. La structure d'accueil

La Communauté d'Agglomération de Saint-Etienne Métropole est un Etablissement Public de Coopération Intercommunale (EPCI) situé au sud du département de la Loire en région Rhône Alpes. Elle regroupe 43 communes soit environ 386 000 personnes et son budget global pour l'année 2009 est de 319 millions d'euros (229 M€ en fonctionnement et 90 M€ en investissements). Elle est divisée en 6 directions :

- Direction générale
- Direction des synthèses financières et des services fonctionnels
- Direction de l'Aménagement du Territoire et des Déplacements
- Direction du Développement Economique
- Environnement - Cadre de Vie
- Grands Equipements d'intérêt communautaire

La direction Environnement - Cadre de Vie est la structure d'accueil de mon stage, elle assure les missions suivantes :

- Collecte, valorisation et élimination des déchets,
- Cadre de vie et développement durable,
- Contrats de rivière.

La cellule rivière est la structure porteuse des 3 contrats de rivières, situés dans le périmètre de la Communauté d'Agglomération : le Furan, l'Ondaine et le Gier.

2.2. Outils contractuels

L'étude se situe sur le bassin versant du Furan d'une superficie de 178 km².

Lors de l'élaboration du projet de contrat de rivières, une étude hydraulique a été menée par le bureau d'études SOGREAH en 2001, avec pour objectif de déterminer les zones inondables. Cette étude a ciblé les points noirs hydrauliques majeurs et a mis en évidence le risque important d'inondations des zones urbaines.

A partir de ce constat, plusieurs démarches ont été lancées :

- Un Programme d'Action pour la Prévention des Inondations (PAPI) a alors été engagé sur le bassin versant en 2005. Le montant global du programme est estimé à environ 10 millions d'euros, dont près de 4,5 millions apportés par l'Etat. Il comporte plusieurs actions :
 - la prévention réglementaire, avec la mise en place d'un Plan de Prévention des Risques d'inondation,
 - l'information et la sensibilisation du public,
 - la gestion de crise, avec l'étude de la mise en place d'un système d'alerte aux crues,
 - la remise en état de la fonction d'écrêtement des crues du complexe hydraulique du Gouffre d'Enfer (barrage écrêteur de crues sur le Furan) et son transfert de propriété à Saint-Etienne Métropole,
 - la construction de barrages écrêteurs de crues sur 2 affluents du Furan (Le Furet en amont de St-Etienne et l'Onzon en amont de Sorbiers),
 - la suppression de points noirs hydrauliques et la restauration des cours d'eau,
 - diverses actions de réduction de la vulnérabilité (acquisition de biens particulièrement exposés aux inondations, mise en place de plans de gestion de crise dans les services publics ...).

- Un Contrat Restauration Entretien, signé avec l'agence de l'eau Loire Bretagne, portant sur la gestion des boisements rivulaires pour une durée de 5 ans (restauration et entretien de la ripisylve).
- Un Contrat de rivières, signé en 2005, dont les deux principaux enjeux sont la reconquête de la qualité des cours d'eau et la gestion du risque inondation (durée : 5 ans).

2.3. Le site d'étude

2.3.1. Situation

L'Onzon est situé au Nord-Est du bassin versant du Furan, affluent rive droite de la Loire (cf. plan de situation à l'annexe I).

L'Onzon prend sa source dans l'extrémité sud des coteaux Ouest des Monts du Lyonnais sur la commune de Saint-Christo-en-Jarez, à 788 mètres d'altitude. Il suit une direction Sud-est lors de sa traversée de la ville de Sorbiers puis bifurque plein Ouest à la Talaudière. Son exutoire est le Furan 5 km en aval, sur la commune de la Tour-en-Jarez (à 451 m d'altitude).

La pente moyenne du cours d'eau est de 3 % en amont de Sorbiers et s'atténue lors de la traversée de la ville : 1.5 %.

L'étude porte sur le bassin versant de l'Onzon depuis l'aval du projet de barrage jusqu'à la rue du Puits Pointu dans la zone urbaine (cf. Figure 1) soit une surface de 6.5 km².

2.3.2. Topographie

La topographie du bassin versant est très marquée : les altitudes varient de 505 m (lit de l'Onzon à la rue du Puits Pointu), à 822 m sur le coteau Ouest.

La pente moyenne des versants est égale à 20.5 %, valeur indiquant des ruissellements rapides avec un risque important d'érosion des versants.

Les cartes des altitudes et des pentes sont disponibles en annexes II et III.

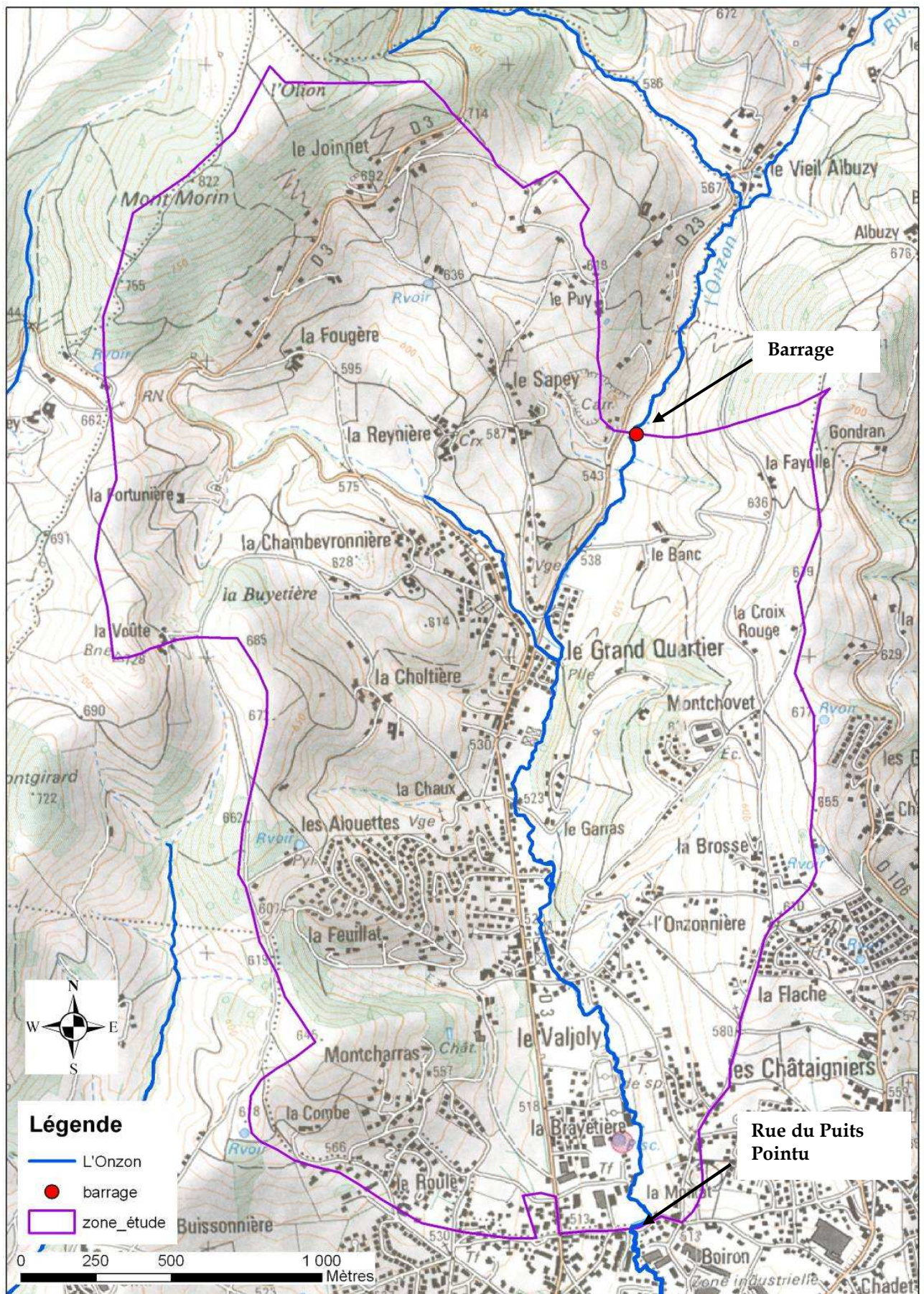


Figure 1 : Plan de situation (fond de carte Scan 25 issu de l' IGN)

2.3.3. Géologie

La carte géologique (B.R.G.M.) indique que l'amont du site d'étude est composé de roches métamorphiques (gneiss) qui affleurent dans le lit du cours d'eau (cf. annexe IV).

Au lieu dit le Grand Quartier, l'Onzon rencontre une formation de grès houiller et ce jusqu'à sa confluence. Ces formations sont constituées d'assises schisto-gréseuse, conglomérats et poudingues alternés de nombreuses veines de houille, longtemps exploitées dans le bassin stéphanois. Elles correspondent d'ailleurs à une époque géologique appelée Stéphanien, d'âge carbonifère supérieur (-300 à -295 millions d'années).

L'apparition d'un sillon alluvial marque la cassure entre la forme en V de la vallée en amont du barrage et la forme en U sur le site d'étude, synonyme de lit majeur plus large et d'une rupture de pente du profil longitudinal de l'Onzon. Cette rupture est visible entre les deux formations géologiques.

2.3.4. Occupation des sols

Sur le site d'étude, la répartition de l'occupation du sol est la suivante :

- prairies/cultures : 65 %
- zones bâties : 22%
- zones boisées : 13 %.

Les prairies et cultures dominent sur l'amont du site d'étude tandis qu'en aval, la surface bâtie devient prédominante (cf. Figure 2).

Sur le site d'étude, la forte urbanisation sur des reliefs très marqués, induit un risque important de ruissellement urbain pouvant accentuer les pics de crue.

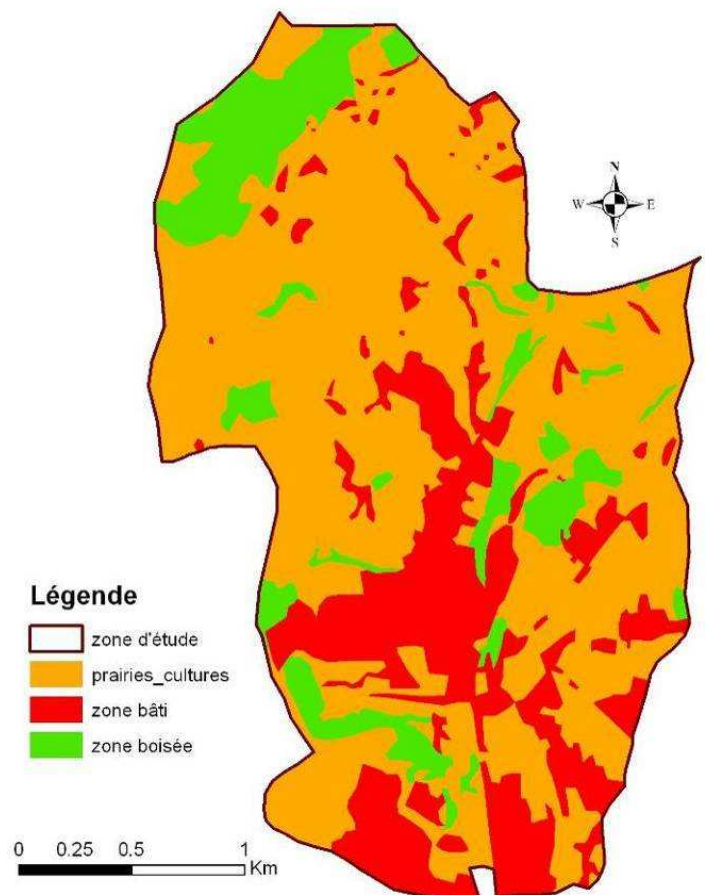


Figure 2 : Carte de l'occupation du sol du site d'étude (source : orthophoto de l'agglomération stéphanoise)

2.3.5. Climatologie

La région stéphanoise est située à l'extrême nord des régions touchées par les pluies cévenoles*. Ce phénomène provoque dans la région stéphanoise des pluies importantes (170 mm en 48 h en décembre 2003). Ces pluies sont responsables des plus fortes crues recensées sur l'Onzon.

L'influence océanique peut également avoir un impact important sur le régime des crues comme cela est survenu début novembre 2008. En effet, suite à plusieurs épisodes pluvieux d'origine océanique, les sols se sont retrouvés saturés et un volume de pluie cévenole plus faible qu'en 2003 (seulement 80 mm en 12 h) avec une intensité maximale équivalente a provoqué une crue plus importante.

La faible superficie de son bassin versant rend l'Onzon sensible aux orages estivaux. En effet la région stéphanoise subit des orages estivaux violents comme celui observé au mois de juillet 2009 sur le centre ville de St Etienne avec 60 mm de pluie en 45 minutes (dont un pic d'intensité relevé de 150 mm/h durant 15 min).

3. Matériels et méthodes

Ce chapitre présente le cheminement méthodologique mis en place pour la modélisation hydraulique.

Une enquête terrain a été nécessaire pour dresser un inventaire de laisses de crue et tracer le contour de la zone inondable suite à l'événement majeur survenu en novembre 2008. Un travail itératif entre le terrain et le modèle a permis de parfaire le calage du modèle.

Les écoulements entre les profils 13 (barrage) et 16.1 (pont du Banc) n'ont pas été étudiés car seulement situés en prairies.

Une modélisation a ensuite été faite sous le logiciel HEC-RAS. Il s'agit d'un modèle unidimensionnel (axe d'écoulement unique et sens d'écoulement imposé) pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center du U.S Army Corps of Engineers et ici utilisé en régime permanent. Les données d'entrée du modèle sont les suivantes :

- Géométrie : profils en travers placés perpendiculairement à l'écoulement au droit de chaque changement de section avec intégration des ouvrages hydrauliques ;
- Données hydrauliques : débit du cours d'eau au droit de chaque profil.

La crue de novembre 2008 est la crue la plus importante observée sur l'Onzon où de nombreuses laisses de crues ont été étudiées (cf. §3.1). Cette crue a servi de référence pour le calage du modèle hydraulique (cf. § 3.8).

3.1. Inventaire des laisses de crues

La crue de novembre 2008 a laissé de nombreuses traces indiquant les niveaux maxima qui ont été atteints localement (laisses de crues constituées de débris flottants : branches, feuilles, ...). Le pic de crue étant survenu dans la nuit du 2 au 3 novembre 2008, les agents du service rivière de Saint-Etienne Métropole sont allés sur le terrain le lendemain pour marquer et prendre en photos les laisses de crues (cf. Figure 3).



*Figure 3 : Photographie des marquages de laisses au lendemain de la crue de novembre 2008
(Source : St Etienne Métropole)*

Des relevés de terrain complémentaires ont permis de cartographier ces laisses de crues et d'analyser la pertinence de chacune.

L'analyse de la pertinence a porté sur plusieurs paramètres :

- La localisation de la laisse de crue : la pente du terrain crée des lignes d'eau en cascade et l'éloignement de la laisse par rapport aux axes principaux d'écoulement génère une perte d'information.
- L'origine de la laisse : certaines laisses visualisées en berge ne sont pas issues de débordements du lit mineur mais par des retours d'écoulements du lit majeur vers le lit mineur. Le sens d'accumulation des débris permet de connaître le sens de l'écoulement.

Remarque : La phase de décrue génère des laisses de crues qui peuvent fausser l'analyse de terrain et donner des hauteurs d'eau ou des sens d'écoulements erronés, non représentatif du débit de pic de crue.

Lors de l'enquête terrain, chaque laisse intéressante a été prise en photo, relevée en altimétrie et en planimétrie. Le positionnement précis de la laisse par rapport à l'axe d'écoulement a également été noté. Ces laisses ont été intégrées à la base de données SIG (cf. §3.3).

Lorsque la laisse se situe sur un obstacle face à l'axe d'écoulement, alors la hauteur d'eau visualisée correspond à la ligne d'énergie plus haute que le niveau d'eau réel. La surélévation est égale à $V^2/2g$ (cf. Figure 4).

- V : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)
- g : accélération de la pesanteur égale (constante égale à 9.81)

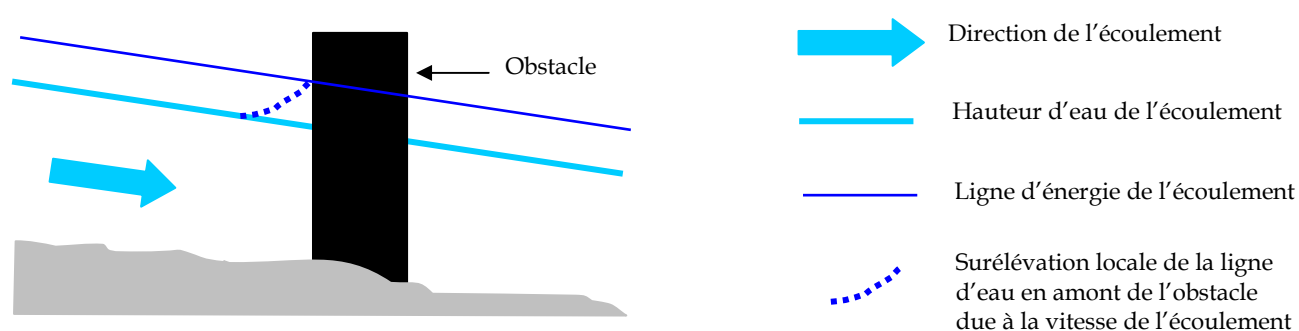


Figure 4 : profil en long schématisant la surélévation de la ligne d'eau due à un obstacle

Lorsque la laisse est située dans l'extrados d'un méandre, la surélévation du niveau d'eau créée par la force centrifuge est égale à $(V^2 B) / (2 g r)$. Cette surélévation est schématisée à la Figure 5.

- V : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s)
- B : largeur au miroir (m)
- g : accélération de la pesanteur égale (constante égale à 9.81)
- r : rayon moyen du virage (m)

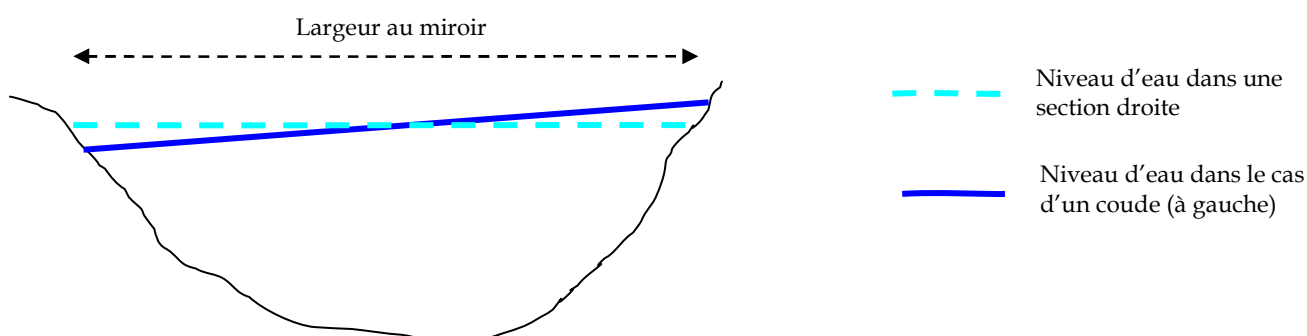


Figure 5 : profil en travers schématisant la surélévation de la ligne d'eau due à un coude (CETMEF, 2002)

3.2. Cartographie de la zone inondée en novembre 2008

L'enquête de terrain a aussi permis de déterminer l'enveloppe de la zone inondée par la crue de novembre. Cette cartographie a été possible par l'observation des laisses de crue et des témoignages de riverains. La construction d'une telle carte est nécessaire pour comprendre les mouvements d'eau lors de la crue, visualiser les obstacles (murs, grillages, ...) et ainsi mieux appréhender la modélisation hydraulique.

D'amont en aval, le travail de terrain a permis de mettre en évidence les observations décrites dans les chapitres suivants. Pour une meilleure compréhension, il faut se référer à la carte de la zone inondable de la crue de novembre 2008 située à l'annexe V.

3.2.1. Profils 16.1 à 24.7 : Bief du Grand Quartier

En amont du site d'étude, au lieu dit *le Banc*, le pont (profil 16.2) se met en charge et un écoulement emprunte le lit majeur gauche (cf. Figure 7). Ce lit majeur est situé plus bas que le cours d'eau, créant un chenal d'écoulement dissocié du lit mineur, ou bief (cf. Figure 6). Ce bief est alimenté par un 2^{ème} débordement situé entre les profils 17.5 et 17.6.

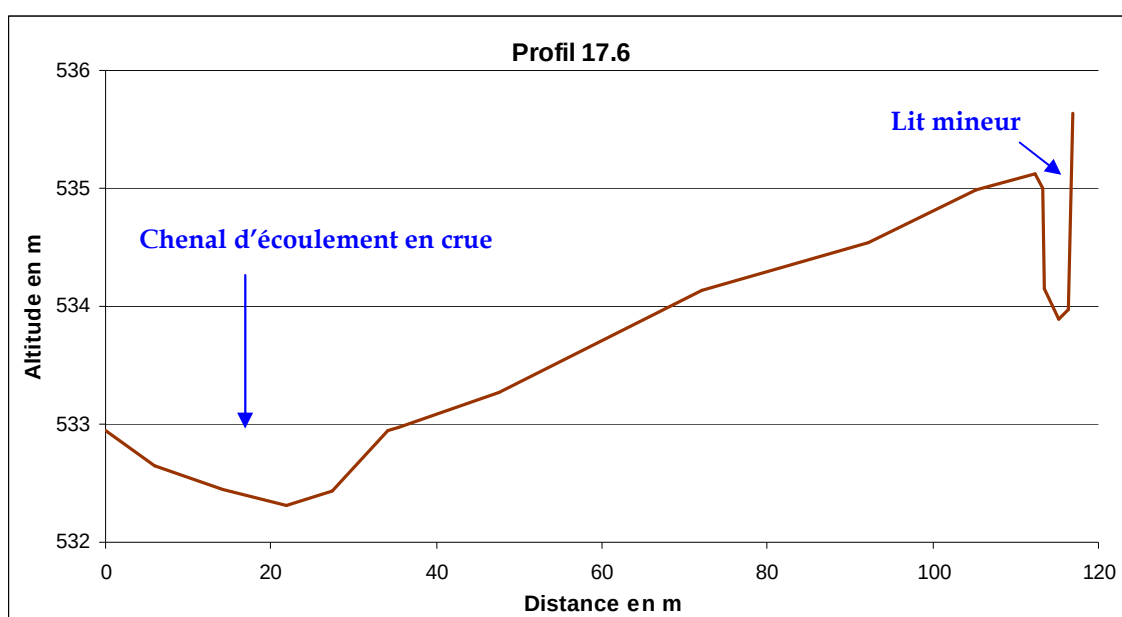


Figure 6 : Lit perché de l'Onzon au profil 17.6

Au lieu dit le Grand Quartier, le lit mineur du cours d'eau a été autrefois déplacé pour servir à l'alimentation du moulin « *Chambeyron* ». Ce bras d'alimentation est resté depuis le lit mineur de la rivière, son ancien lit ayant été remblayé, drainé et cultivé. Lors des crues, les débordements retrouvent l'ancien lit de la rivière, aujourd'hui situé plus bas que le lit mineur.

Cet écoulement débordant longe le lotissement « *le Grand Quartier* » puis retrouve le lit mineur au profil 23.5.

En aval du profil 23.5, l'écoulement est contraint par la présence du lotissement « *Les Coquelicots* » en rive droite et d'un talus rocheux en rive gauche. Les habitations situées en bordure du cours d'eau sont inondées.

Sur ce secteur, Le lit mineur de l'Onzon est perché par rapport au lit majeur sur 350 m entre le pont 16.2 et le profil 23.5 provoquant des écoulements déconnectés en crue.

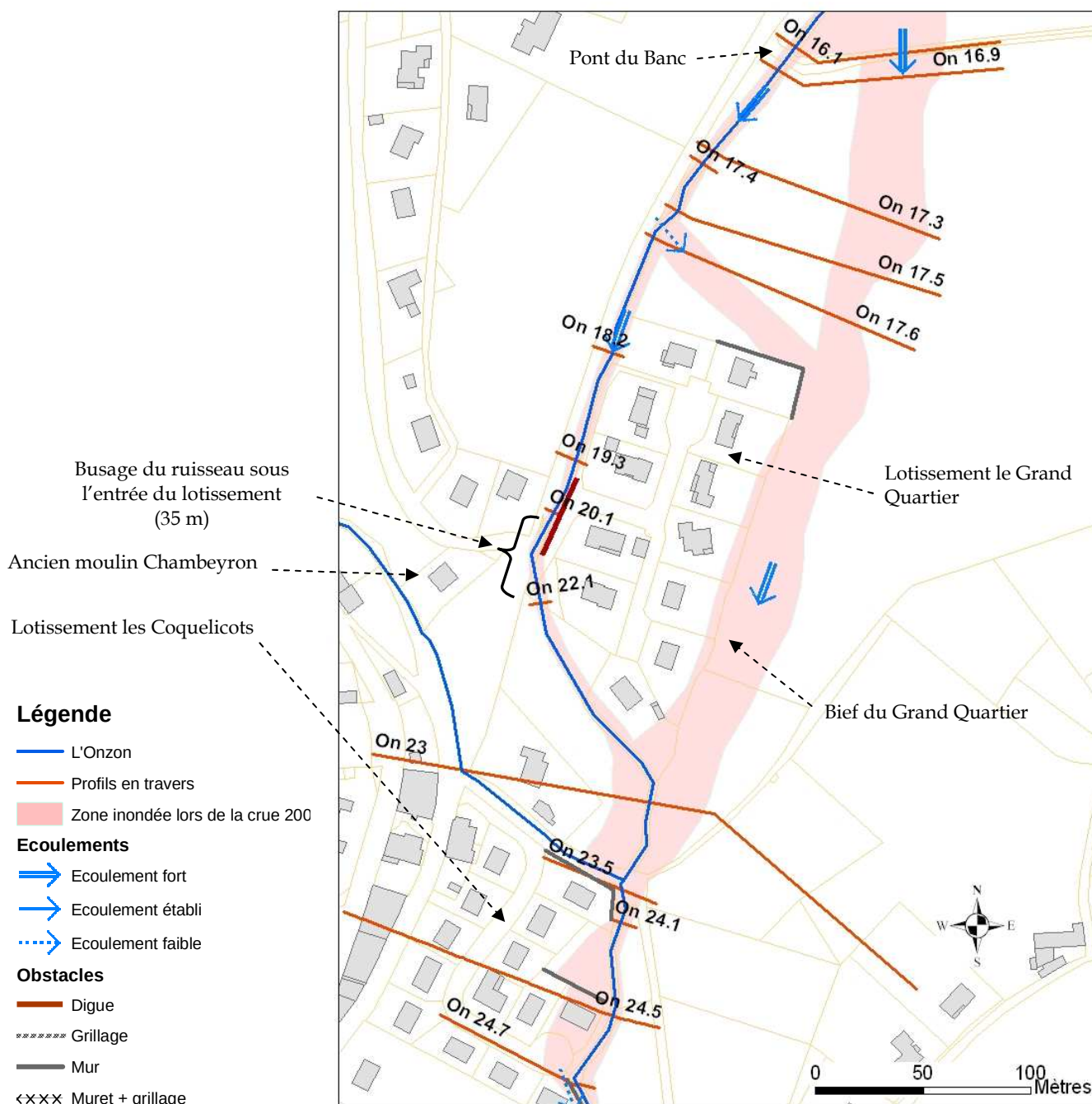


Figure 7 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 16.1 et 24.7

3.2.2. Profils 24.9 à 28.5

Dans le lotissement « les Coquelicots », au profil 24.9, la section d'écoulement est très restreinte. En aval, l'écoulement trouve un champ d'expansion dans son lit majeur droit (prairie).

L'écoulement est à nouveau contraint par la présence d'un remblai en rive droite aux profils 25.3 et 25.4. Deux habitations ont été inondées à l'amont de cet étranglement de l'écoulement. Celui-ci s'étend à nouveau dans son lit majeur droit en aval de ce remblai.

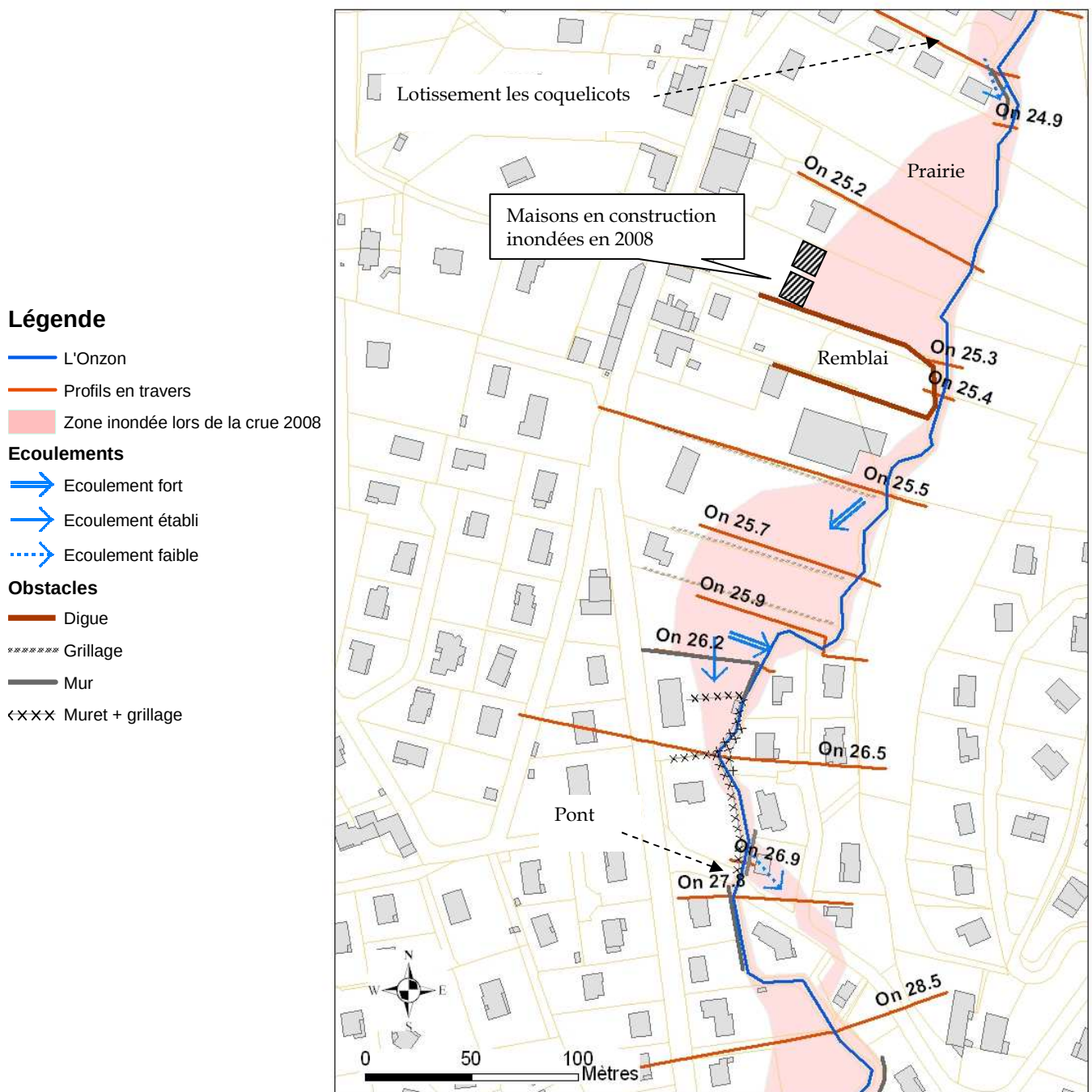


Figure 8 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 24.9 et 28.5

La présence de grillages et de murs (profil 24.9), transversaux aux écoulements, génère des lignes d'eau en escalier : les lignes d'eau des lits mineur et majeur sont déconnectées. Au profil 25.9, la rivière bute contre un enrochement qui protège des habitations en rive gauche : seuls de faibles écoulements ont traversé les parcelles. Le lit majeur droit est segmenté par de nombreux murets qui ont été submergés par endroits (cf. Figure 8).

En amont du pont, un bief se crée dans la rue en rive gauche. Celui-ci rejoint la rivière après la 1^{ère} habitation située en aval du pont.

3.2.3. Profils 29.5 à 34.8

Au profil 29.5, la rivière inonde des habitations en rive gauche (lotissement « *Belle source* ») et des terrains en rive droite.

En aval, au droit du lotissement « *le Rivage* », la rivière est maintenue dans son lit mineur mais des infiltrations et du ruissellement urbain inonde l'amont du lotissement situé en rive droite. En aval, la digue protégeant le pré (profil 30.8) a cédé ennoyant ainsi le lit majeur droit : l'écoulement inonde en aval la totalité d'une parcelle habitée (cf. Figure 9).



Figure 9 : Photo de la rupture de digue qui s'est produite en rive droite au profil 30.8

A partir du profil 30.9 un bief se crée en rive gauche sur le tènement de l'entreprise Sogranlotrans (cf. Figure 10). Ce bief traverse la totalité du tènement et rejoint la rivière en aval du profil 33.1. En rive droite seuls des terrains sont inondés.

Au droit du profil 33.7, les deux rives débordent mais seule l'habitation en rive gauche est inondée. En aval, le flux s'entonne sous le pont de l'Entente sans le mettre en charge.

La crue a totalement transité sous ce pont où de nombreuses laisses de crues ont été repérées. Les conditions d'écoulement sous le pont permettent l'estimation du débit de la crue de novembre 2008.

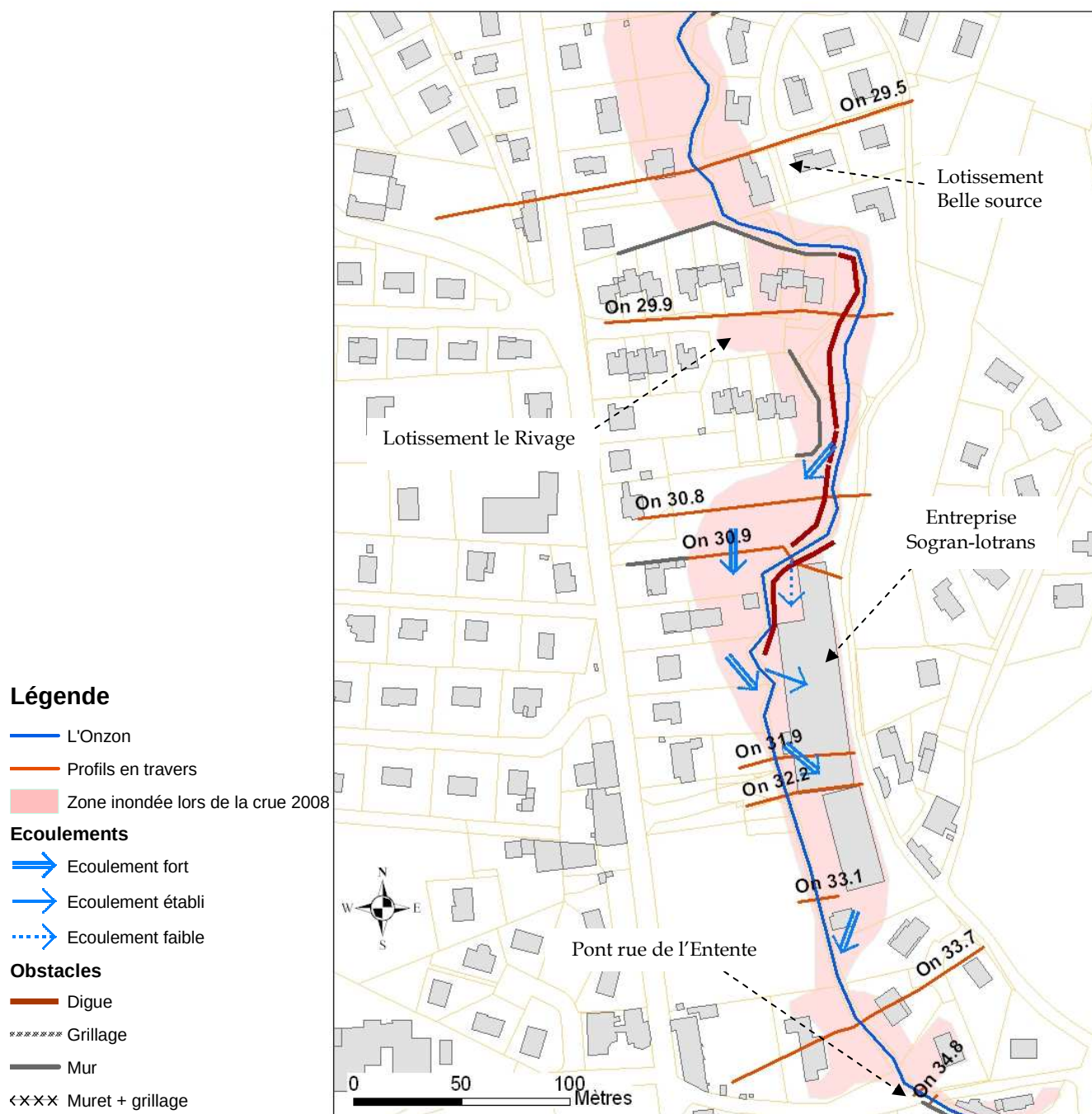


Figure 10 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 29.5 et 34.8

3.2.4. Profils 34.8 à 39.9 : Bief Valjoly

Le pont désaffecté, au profil 36.5, ne permet pas le transit de l'ensemble du débit et deux biefs se sont formés en rive gauche et en rive droite. L'écoulement en rive gauche rejoint la rivière au profil 37.3 tandis que le bief en lit majeur droit se dissocie du lit mineur sur un linéaire important (cf. Figure 11).

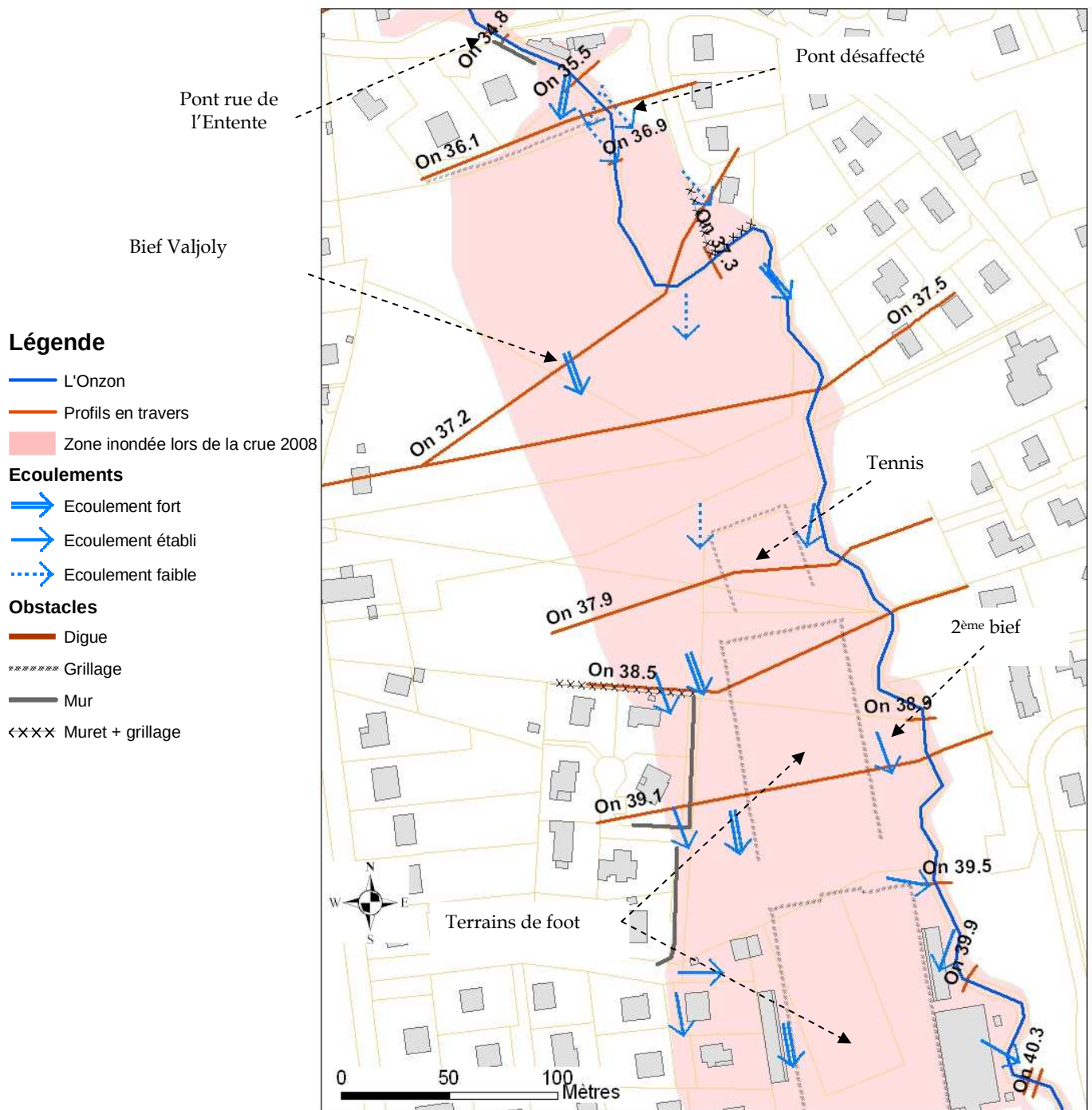


Figure 11 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 34.8 et 40.3

La topographie du site empêche le retour du bief Valjoly dans le lit mineur (cf. Figure 12). Ce bief traverse un pré jusqu'au profil 37.9 puis inonde des habitations et des terrains de sports. Au droit des terrains de foot, un 2^{ème} bief se crée mais son écoulement reste dissocié du bief Valjoly et réintègre le lit mineur avant le profil 40.3.

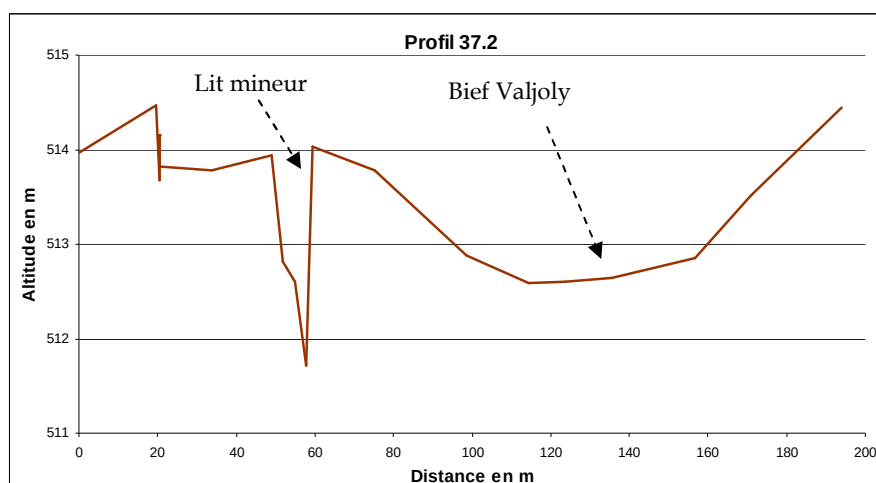


Figure 12 : Chenal d'écoulement en crue dissocié du lit mineur au profil 37.2

Dans le lit mineur, des laisses de crues indiquent des départs et des retours d'eau entre le lit mineur et le lit majeur (profils 37.5 à 39.9).

3.2.5. Profils 39.9 à 43

L'écoulement en lit majeur droit (bief Valjoly) est toujours dissocié du lit mineur et ce jusqu'au profil 41.8. Ce bief inonde les bâtiments sportifs puis des habitations entre les profils 40.5 et 41.4 (cf. Figure 14).

Le lit mineur déborde vers son lit majeur droit entre les profils 40.9 (seuil) et 41.2. En aval, un pré en rive gauche est également inondé.

Une forte quantité de sédiments a été déposée dans ce champ au droit du profil 41.8 où le bief Valjoly conflue avec le lit mineur après avoir divagué sur 800 m dans les zones urbanisées.

Au profil 41.8, une partie de l'écoulement passe au dessus du muret situé à l'amont de l'entreprise De Freitas.

En aval du profil 42.1, la parcelle de l'entreprise De Freitas en rive droite, et l'habitation en rive gauche, ont été fortement inondées. L'eau est passée par dessus le pont de la rue du Puits Pointu tant en rive droite qu'en rive gauche (cf. photo Figure 13).



Figure 13 : Photographie du pont de la rue du Puits Pointu

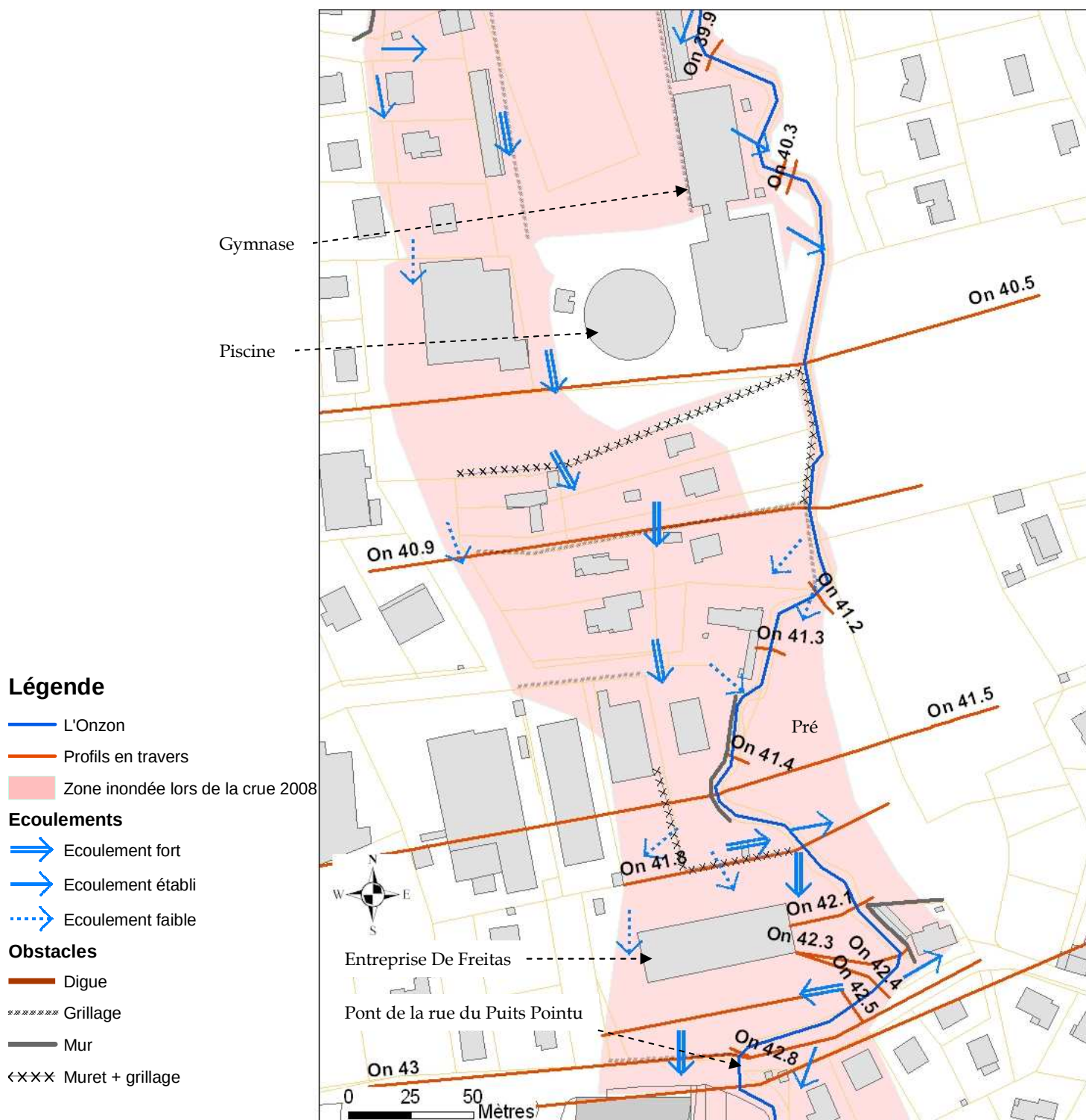


Figure 14 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 39.9 et 43

3.2.6. Aval du site d'étude

En sus des écoulements dans le lit de l'Onzon, deux biefs se sont formés à partir de la rue du Puits Pointu : un bief en rive gauche inonde trois habitations et trois industries, et un bief en rive droite inonde deux lotissements.

A partir de la rue du Puits Pointu, des travaux d'élargissement de la section d'écoulement ont été réalisés. Ils permettent de faire transiter la crue centennale future (après construction du barrage).

3.2.7. Conclusion

Le travail effectué sur la cartographie de la zone inondée a permis de comprendre le comportement hydraulique de l'Onzon en crue et par conséquent de mieux appréhender le schéma topologique de la modélisation.

L'urbanisation du site d'étude fait que le lit mineur de l'Onzon n'est pas toujours situé en fond de thalweg. Par endroits le lit mineur est situé plus haut que son lit majeur, impliquant la création de bief et d'écoulement découplés. Les hauteurs d'eau entre le lit mineur et le lit majeur sont variables (cf. § 3.2.1 et 3.2.4).

La compréhension du fonctionnement en crue a permis :

- **De positionner au plus juste les profils en travers à relever ;**
- **De concevoir un modèle multi-bief pour représenter des écoulements dissociés du lit mineur.**

3.3. Base de données SIG

Pour les besoins de cette étude, une base de données SIG (Système d'information Géographique) a été créée. Elle a permis de positionner différents éléments sur le fond de plan cadastral et de leur attribuer différentes propriétés et liens.

Cette base de données intègre les éléments suivants :

- Les laisses de crue
 - o Informations (attributs) sur l'altitude, le type de laisse et sa position par rapport à l'écoulement.
 - o lien photo
- les profils en travers
 - o Informations sur l'origine du profil (créateur, date de création).
 - o lien photo
- des photographies de la zone inondée (orientation de la prise de vue et lien photo).

3.4. Géométrie du modèle

Les profils en travers sont l'ossature de la géométrie du modèle hydraulique. Ils représentent la réalité topographique de la zone inondable. Afin de caractériser précisément la topographie des 3 km de cours d'eau situés entre le futur barrage et la rue du Puits Pointu, Un cabinet de géomètre a relevé 27 profils en travers et positionné des repères géodésiques. Ces repères répartis sur l'ensemble de la zone d'étude m'ont permis de relever, avec l'aide des techniciens de St Etienne Métropole, 37 autres profils en travers et 8 ouvrages ainsi que les laisses de crues.

La cartographie fine de la crue de novembre 2008, prenant en compte un événement passé et intégrant les obstacles, ne peut être directement mis en correspondance de celle établie par SOGREAH en 2001, cartographie réglementaire du Plan de prévention du Risque inondation. En effet cette dernière a été élaborée à l'échelle du bassin versant du Furan et n'intègre volontairement pas les murs, grillages, habitations, ...

Suite aux observations des différents écoulements lors de la crue 2008, confirmé par l'analyse des profils en travers, il est apparu pertinent de construire des biefs latéraux pour traduire au mieux les débordements vers le lit majeur, découplés du lit mineur (Cf. Figure 15).

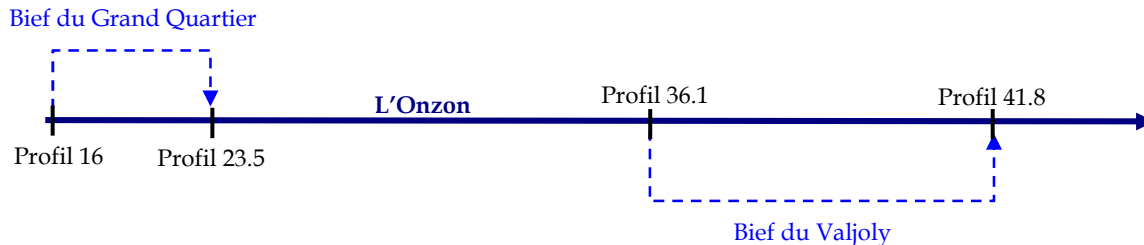


Figure 15 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 16.1 et 23.5

Remarque : Sous HEC Ras, la construction du modèle a été géoréférencée, en utilisant comme fond de carte la photogrammétrie (couche SIG .shp). Ceci a permis une meilleure lecture graphique et par conséquent une meilleure analyse.

3.5. Données hydrauliques

Le modèle hydraulique a d'abord été testé en régime fluvial*, correspondant aux conditions d'écoulement de l'Onzon en crue. Si cela s'était avéré nécessaire, le modèle aurait ensuite été testé en régime mixte ou torrentiel*.

Pour ce type d'écoulement, le modèle fonctionne avec les équations de Barré de Saint-Venant utilisant pour ce type d'écoulement des conditions aux limites à chaque entrée (amont) et sortie du modèle (aval).

Ses conditions sont un débit à l'amont (cf. §3.5.1, 3.5.2 et 3.5.3) et une hauteur d'eau à l'aval (cf. §3.6).

3.5.1. Hydrologie

Le cours d'eau l'Onzon a déjà fait l'objet de plusieurs études :

- Etude hydraulique du Furan et de ses affluents – SOGREAH, 2001
- Etude hydrologique de l'Onzon – SAFEGE, 2006
- Etude hydraulique « Aménagement des berges, élargissement des ponts » – GEOPLUS, 2007
- Etude hydraulique « Aménagement des berges du secteur du Puits Pointu à la RD1498 » – HTV, 2008.

Quatre débits de temps de retour différents ont été définis lors de ces études :

- Q_{10} : débit de crue décennale (temps de retour 10 ans)
- Q_{30} : débit de crue trentennale (temps de retour 30 ans)
- Q_{50} : débit de crue cinquantennale (temps de retour 50 ans)
- Q_{100} : débit de crue centennale (temps de retour 100 ans)

Les débits naturels de pointe de crue utilisés sont issus de l'étude hydrologique de l'Onzon faite par SAFEGE en 2006 (cf. Tableau 1) :

	Débits actuels (m ³ /s)			
	Q10	Q30	Q50	Q100
Q amont (sortie barrage)	7.5	16.5	20.6	26.4
Q aval (rue du Puits Pointu)	9.9	21.2	26.5	33.0

Tableau 1 : débits actuels avant création du barrage

Les futurs débits intègrent le laminage du barrage. Ils sont issus du dossier préliminaire de construction du barrage (SAFEGE 2008). Celui-ci a été dimensionné pour un débit de fuite maximum de 10.5 m³/s évacué en crue centennale. Les valeurs sont les suivantes (cf. Tableau 2) :

	Débits futurs (m ³ /s)			
	Q10F	Q30F	Q50F	Q100F
Q amont (sortie barrage)	6.1	8.9	9.7	10.5
Q aval (rue du Puits Pointu)	8.5	13.6	15.6	17.1

Tableau 2 : débits futurs après création du barrage

Les débits actuels serviront pour estimer le temps de retour de la crue de 2008.

Les débits futurs seront quant à eux utiles pour simuler les crues futures, après mise en place du barrage. Ce sont ces simulations qui permettront de prévoir les travaux nécessaires à la conservation des écoulements dans le lit mineur et limiter ainsi les débordements du cours d'eau.

3.5.2. Apport hydrologiques intermédiaires

Les apports hydrologiques intermédiaires, provenant des versants du site d'étude, varient de $2.4 \text{ m}^3/\text{s}$ en Q_{10} à $6.6 \text{ m}^3/\text{s}$ en Q_{100} (différence de débit entre l'aval du barrage et la rue du Puits Pointu). L'analyse hydrologique de ces apports est détaillée dans le paragraphe suivant.

3.5.2.1. Points d'injection

Afin de répartir ces apports hydrologiques intermédiaires dans la modélisation, il est nécessaire de connaître les points d'injection de ceux-ci. Pour ce faire, un travail préalable a été réalisé sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de maille 10 m à l'aide de l'outil hydrology du logiciel Arcmap.

Le MNT a d'abord été utilisé pour obtenir la direction des flux hydriques sur chaque maille. Pour chaque maille, le logiciel calcule le nombre de mailles traversées par l'écoulement en amont selon la direction des flux déterminée précédemment (cf. Figure 16).

Ceci permet la création d'une carte d'accumulation des flux hydriques.

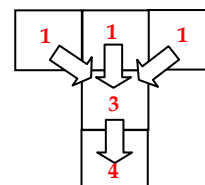


Figure 16 : Schéma de principe de l'accumulation des flux

En considérant qu'un réseau hydrographique se crée à partir d'une surface d'accumulation de 150 mailles soit 1.5 ha, une carte du réseau hydrographique suivant la pente naturelle donnée par le MNT a été déterminée. Cette valeur arbitraire a permis d'apprécier au mieux l'importance et la localisation des flux arrivant dans l'Onzon.

Remarque : Lors de l'élaboration de cette carte sont apparues des zones où l'écoulement théorique créé par le MNT se sépare sur de longs linéaires du lit majeur de l'Onzon. Ces zones correspondent aux endroits où des biefs se sont activés lors des crues de l'Onzon. L'écoulement théorique suit le trajet des biefs tandis que la trajectoire du lit mineur de l'Onzon semble rectiligne et située sur un bord de la vallée (voir carte IGN **Figure 1** et carte des écoulements théoriques faite par le MNT à l'annexe VI). Ces observations appuient l'idée que la rivière a été déplacée dans le passé sur certains tronçons pour différents usages.

Ensuite, la zone d'étude a été divisée en sous-bassins versant associés aux principaux apports.

Les limites de ces sous-bassins ont été corrélées aux réseaux d'assainissement, permettant ainsi une localisation plus précise des points d'injections des principaux flux apportés à l'Onzon (voir carte de la zone inondée lors de la crue 2008 située à l'annexe V).

Au total, huit sous-bassins ont été déterminés et leurs points d'injection ont été placés au droit des profils en travers adjacents.

3.5.2.2. Débits

Concernant la répartition des débits, il a été pris deux hypothèses :

- Le volume ruisselé est fonction de la surface du sous-bassin pondérée par le coefficient de ruissellement moyen du sous-bassin jusqu'à une pluie décennale.
- Pour une pluie de plus forte intensité (de temps de retour 30, 50 et 100 ans), on admet une nette atténuation des effets des différentes capacités d'infiltration, compte tenu de la saturation progressive des sols perméables. On admet ainsi un ruissellement total (le volume est seulement fonction de la surface du sous-bassin).

Le coefficient de ruissellement est fonction de l'occupation du sol, ici divisée en trois grands ensembles (valeurs tirées des normes suisses SNV 640 351). Les valeurs proposées sont en accord avec les valeurs habituellement employées en France (Plantier, 2003) :

- Zone boisée = 0.1
- Prairies, cultures = 0.2
- Zones urbanisées = 0.9

La surface « géographique » des sous-bassins a été réajustée par le ratio des surfaces selon les typologies d'occupation des sols sur la surface totale. Les valeurs obtenues sont elles-mêmes pondérées par les coefficients de ruissellements. Ces nouvelles surfaces de sous-bassins versant ont alors servi de base au calcul des débits intermédiaires, entrant dans le modèle hydraulique (cf. Tableau 3 et Tableau 4).

Ce calcul présente l'avantage de mieux transcrire l'impact des ruissellements en milieu urbain.

	Q actuels (m³/s)			
	Q10	Q30	Q50	Q100
Q amont (profil 13)	7.5	16.5	20.6	26.4
BV_profil_14	7.7	17.1	21.4	27.2
BV_profil_23	8.4	18.7	23.4	29.5
BV_profil_27.8	8.7	19.3	24.2	30.4
BV_profil_30.1	9.0	19.8	24.7	31.0
BV_profil_375	9.4	20.5	25.6	32.0
BV_profil_403	9.6	20.7	25.8	32.3
BV_profil_42.1	9.8	21.1	26.3	32.8
Q aval (profil 43)	9.9	21.2	26.5	33.0

Tableau 3 : Répartition des débits actuels en crue à l'intérieur du site d'étude

	Q futurs (m³/s)			
	Q10F	Q30F	Q50F	Q100F
Q amont (profil 13)	6.1	8.9	9.7	10.5
BV_profil_14	6.3	9.5	10.5	11.3
BV_profil_23	7.0	11.1	12.5	13.6
BV_profil_27.8	7.3	11.7	13.3	14.5
BV_profil_30.1	7.6	12.2	13.8	15.1
BV_profil_375	8.0	12.9	14.7	16.1
BV_profil_403	8.2	13.1	14.9	16.4
BV_profil_42.1	8.4	13.5	15.4	16.9
Q aval (profil 43)	8.5	13.6	15.6	17.1

Tableau 4 : Répartition des débits futurs en crue à l'intérieur du site d'étude

3.5.3. Calcul du débit transitant dans chaque bief

La répartition des débits au sein de chaque bief n'a pas été faite par HEC Ras, la complexité de la répartition des flux au départ de chaque bief ne pouvant pas être calculé par un logiciel 1D. Cette estimation a été calculée manuellement de la manière suivante :

- Les biefs sont issus de débordements générés par des ponts sous lesquels le débit total de la crue n'a pu transiter. Au droit de ces ponts, des laisses de crues indiquent la ligne de charge de l'écoulement en crue ;
- Le débit que le pont est capable de faire transiter sous cette hauteur de charge est celui restant dans le lit mineur en aval ;
- Afin de trouver le débit débordant, le calage a été fait en répartissant la totalité du débit dans le lit mineur et le lit majeur ;
- L'équilibre des lignes d'eau entre ces deux biefs permet d'obtenir la répartition des débits.

3.6. Conditions limites

Concernant le lit mineur, les conditions limites de l'étude HTV (située en aval du site d'étude) ont été conservées : il s'agit des hauteurs connues issues de l'étude Sogreah de 2001.

Les conditions limites des biefs créés lors de la modélisation sont des hauteurs d'eau normales avec une pente fixée.

Afin de savoir si le lit mineur de l'Onzon dans la zone d'étude est hors influence des conditions aval, une simulation avec des conditions hautes (niveau d'eau important à la confluence avec le Furan) et basses (faible hauteur d'eau à la confluence avec le Furan) a été faite. La zone d'influence se situe loin en aval : la zone d'étude est hors d'influence des conditions aval retenues.

3.7. Coefficient de rugosité

Les coefficients de rugosité appliqués au cours d'eau représentent la perte de charge de l'écoulement par frottements, ils sont exprimés par le coefficient de Manning, noté n . Ce coefficient est l'inverse du coefficient de Strikler K et augmente avec la rugosité.

Le logiciel HEC RAS demande au minimum 3 coefficients de rugosité par profil (lit mineur, lit majeur gauche et lit majeur droit).

En lit mineur, n est fonction de l'encombrement du lit et des berges. Ici la plage de valeur varie de 0.035 à 0.05.

En lit majeur, n est fonction de l'occupation du sol. Les coefficients retenus sont :

- Prairie : $n = 0.05$
- Zone boisée : $n = 0.1$
- Zone urbanisé : $n = 0.1$
- Voirie : $n = 0.016$

Sur certains profils où l'occupation du sol est très changeante, le lit majeur a été sectionné en plusieurs tronçons, sur lesquels ont été appliqués différents coefficients de rugosité.

Dans les zones urbaines, afin de simuler au mieux la présence de haies perpendiculaires à l'écoulement, le coefficient de rugosité a été augmenté.

Lorsque les parcelles sont entourées de murs et de haies très épaisses entraînant des vitesses d'eau très faibles, l'écoulement a été considéré comme nul. Sous le logiciel HEC RAS, ces zones sont exprimées en « ineffective flow area » (ne participant pas à l'écoulement).

3.8. Modèle hydraulique

L'étude HTV 2008 est une modélisation de l'Onzon ayant pour objectif de déterminer les travaux d'élargissement du lit mineur nécessaires pour faire transiter la crue centennale future. Cette modélisation débute au niveau de la rue du Puits Pointu correspondant à l'aval du site d'étude et a servi de base pour la conception du présent modèle hydraulique. Le calage des paramètres de cette modélisation avait été fait sur la base des hauteurs d'eau données par le modèle hydraulique de SOGREAH (étude hydraulique de 2001).

Dans le cadre de la présente étude, le modèle hydraulique a été calé sur la base des observations de la crue de novembre 2008. La méthodologie a été la suivante :

Tout d'abord le débit de pointe de la crue de novembre 2008 a été estimé. Ensuite, le comportement hydraulique des ouvrages a été reconstitué ainsi que la répartition des débits transitant dans le lit mineur et les deux biefs. Ensuite le modèle hydraulique a été calé définitivement.

Remarque : Cette modélisation hydraulique a été contrôlée par un bureau d'études indépendant, HTV, qui a apporté ses conseils en matière d'hydraulique fluviale et de modélisation sous HEC Ras.

3.8.1. Calcul du débit de pointe de la crue 2008

L'estimation d'un débit fiable ne peut se faire qu'au droit d'une section de contrôle* de forme simple à l'intérieur de laquelle tout le débit transite.

Cette situation se rencontre au niveau du pont rue de l'Entente (profil n°34.8) où la topographie du site crée un étranglement de la zone d'expansion et concentre la totalité du débit sous ce pont. Sous l'ouvrage la section d'écoulement est relativement calibrée avec des murs en rive gauche et en rive droite (cf. Figure 17).

Le débit arrive ensuite dans un second pont (profil 36.5) où des débordements se produisent dans le lit majeur. Plusieurs laisses de crues ont été relevées dans cette zone.

Cette section a été utilisée pour calculer le débit de la crue de 2008.



Figure 17 : Vue amont du pont rue de l'Entente

3.8.2. Calage de la ligne d'eau

Le débit de crue étant estimé, le calage de la ligne d'eau théorique a été affiné en faisant varier les coefficients de rugosité.

Certaines laisses de crue indiquant des hauteurs d'eau très pertinentes, une phase terrain supplémentaire a été menée afin de relever des profils en travers aux droits des sections de contrôles ayant générées ces laisses. Le profil en long de la ligne d'eau modélisée de la crue 2008 est situé à l'annexe VII.

3.9. Débordements résiduels pour la crue centennale future

L'enquête terrain et le modèle hydraulique ont mis en évidence les points de débordements. Au droit de ces points, le débit de début de débordement a été quantifié et indiqué sur une cartographie particulière (cf. annexe VIII).

Cette cartographie a servi à visualiser les points de débordements qui seront activés en deçà du débit de la crue centennale future. Ces points feront l'objet de travaux pour limiter les inondations dans les zones urbaines.

La direction des écoulements débordants a également été notée sur cette cartographie.

3.10. Carte des risques

Une analyse faite conjointement avec les techniciens de St-Etienne Métropole a permis l'élaboration d'une carte des risques créée par les débordements.

Lorsqu'un débordement ne touche aucun enjeu majeur (habitation, industrie, voirie à forte circulation), le risque a été considéré comme nul.

Lorsqu'un enjeu est touché par un débordement, le risque associé a été apprécié en fonction du type d'enjeu, du temps de retour de la crue associée et de la hauteur d'eau (aléa).

Le faible nombre de débordements a conduit à étudier au cas par cas le risque associé à chacun.

4. Résultats

Ce chapitre présente les résultats obtenus sous HEC Ras.

Le premier paragraphe détaille les résultats du calage de la crue de 2008. Cette simulation servira de référence pour les autres débits de crue.

La simulation de la crue centennale future (après barrage) avec la configuration topographique actuelle permet de cibler les zones où des débordements résiduels subsistent.

Le chapitre « Modélisation des seuils de débordements » présente ces débits maxima transitant dans le lit mineur de l'Onzon avant débordement. Les débits simulés sont Q_{10F} , Q_{30F} , Q_{50F} et Q_{100F} .

Enfin, le dernier chapitre présente une cartographie des risques liés aux débordements.

4.1. Modélisation hydraulique de la crue 2008

Les points particuliers de la modélisation détaillés dans le chapitre 3.8 sont détaillés ci après.

4.1.1. Estimation du débit de pointe

Sur la section de calage choisie, l'étude des laisses de crue a été faite de l'aval vers l'amont (cf. Figure 19).

En aval du pont 36.5, désaffecté (cf. photo Figure 18), l'écoulement passe en écoulement critique* : il n'y a pas d'influence de la ligne d'eau aval. En amont du pont 36.5, la laisse de crue indique la ligne de charge de l'écoulement au niveau du débordement.

La laisse au profil 35.5 indique la hauteur d'eau (située dans une zone d'eau calme protégée par la vitesse de l'écoulement).



Figure 18 : Photographie du pont profil 36.5

Sous le pont de la rue de l'Entente (au profil 34.6, cf. Figure 17), l'écoulement passe en écoulement critique : juste en amont de ce pont la laisse est située dans la zone d'étranglement de la ligne d'eau et a pu être influencée par la vitesse de l'eau. Cette laisse se situe entre la ligne d'eau et la ligne de charge.

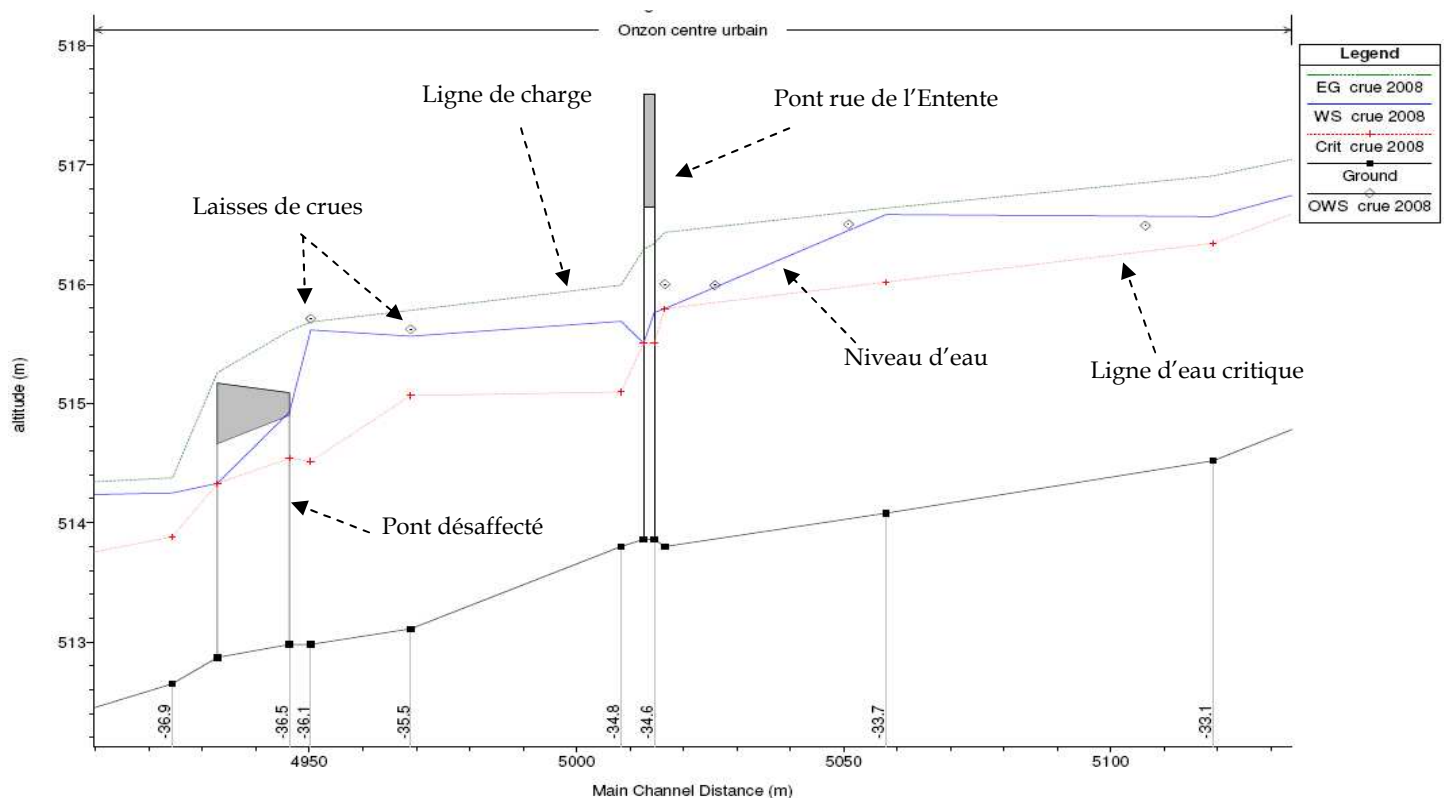


Figure 19 : Profil en long de la ligne d'eau (débit cinquantennal) au droit du pont de l'Entente

Les 3 laisses situées en amont du pont de l'Entente sont représentatives du niveau d'eau.

Au droit de ce profil, le débit a été estimé à environ $25 \text{ m}^3/\text{s}$: Cette valeur correspond au débit de pointe de fréquence cinquantennale ($Q_{50} = 24.7 \text{ m}^3/\text{s}$).

La crue de novembre 2008 est estimée à un débit de fréquence de retour 50 ans. Ce débit a été utilisé pour le calage du modèle hydraulique.

4.1.2. Comportement hydraulique des ouvrages

L'étude du profil en long de la ligne d'eau a permis de visualiser l'impact des ponts sur les débordements. L'analyse des capacités hydrauliques des différents ouvrages en fonction des débits futurs a donné les résultats suivants (cf. Tableau 5) :

n°profil	Type d'ouvrage	Nature de la section	Q max avant mise en charge	Temps de retour correspondant	Q max avant débordement amont	Temps de retour correspondant
16.2	Pont	tôle ondulée	8.5	<Q30F	6.5	<Q30F
17.35	Pont	Pierres maçonnées	14	>Q100F	12.5	>Q100F
21	Busage	tôle ondulée	10.5	>Q100F	10	>Q100F
27.3	Pont	Béton	18	>Q100F	15	<Q100F
32	Pont	tôle ondulée	19.5	>Q100F	9	<Q30F
34.6	Pont	Béton	26	>Q100F	15	<Q100F
36.5	Pont	tôle ondulée	11	<Q30F	12	<Q30F
43.5	Pont	Béton	12	<Q30F	8	<Q10F

Tableau 5 : Débits maxima en amont des ponts avant mise en charge et débordements

Les 3 ponts qui sont à l'origine des biefs (16.2 : Grand Quartier, 36.5 : Valjoly et 43.5 : Puits Pointu) se mettent en charge et créent un débordement pour un débit inférieur à la crue trentennale, sauf le pont au profil 43.5 qui crée un débordement pour un temps de retour inférieur à Q_{10F} (bief activé qu'à partir de Q_{30F}).

Les autres ponts ne se mettent pas en charge pour un débit inférieur à la crue centennale future mais des dysfonctionnements sont observés :

- Le pont 32 crée un débordement à partir de 9 m³/s (valeur de débit inférieur à Q_{30F})
- Les ponts 27.3 et 36.5 créent des débordements à partir de 15 m³/s (valeur de débit inférieure à Q_{100F})

Remarque : le busage situé au profil 21 ne génère pas de débordements grâce à la présence d'une digue en rive gauche qui protège le lotissement. Cette digue a pleinement joué son rôle lors de la crue 2008. Seulement, si un encombre venait obstruer ce pont, la digue, en terre, pourrait être submergée et s'effacer, générant un risque important d'inondation au droit de ce lotissement.

4.1.3. Calcul du débit transitant dans chaque bief

4.1.3.1. Bief du Grand Quartier

En amont du pont du Banc (profil 16.2), le débit est de 21.4 m³/s (Q_{50}).

Le pont situé au profil 16.2 se met en charge. Il calibre le débit restant dans le lit mineur en aval (lit perché) et le débit débordant vers le lit majeur gauche.

Avec la hauteur de charge indiquée par la laisse de crue (cf. Figure 20), le débit transitant sous le pont est de $10.3 \text{ m}^3/\text{s}$ créant ainsi un débordement de $11.1 \text{ m}^3/\text{s}$ en lit majeur.

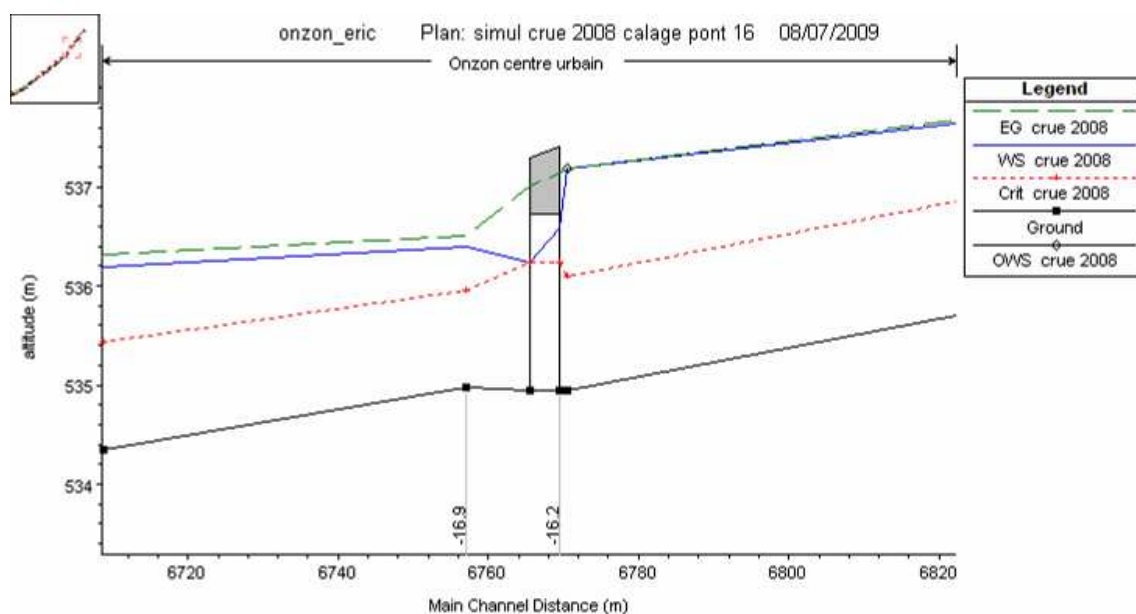


Figure 20 : Profil de la ligne d'eau lors du calage du pont du Banc

En aval, un 2^{ème} débordement se crée en lit majeur gauche entre les profils 17.5 et 17.6. Le débit en aval de ce débordement a pu être calibré par la présence d'un ovoïde de 35 m (busage sous l'entrée du lotissement du « Grand Quartier »). La laisse de crue en amont de cet ouvrage indique que la ligne d'eau a également été rehaussée mais sans provoquer de débordements au droit de l'ovoïde (cf. Figure 21) qui a débité $9 \text{ m}^3/\text{s}$ avec la charge observée.

Le 2^{ème} débordement a injecté un débit supplémentaire de $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ dans le bief en lit majeur gauche.

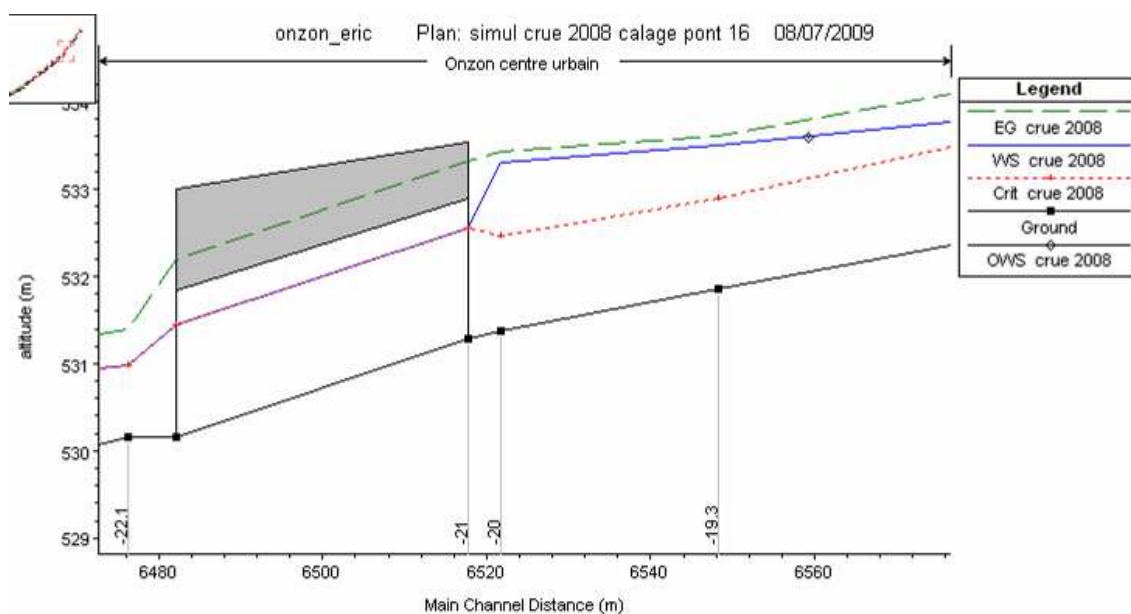


Figure 21 : Profil de la ligne d'eau en amont de l'ovoïde du lotissement du Grand Quartier

Au droit du lotissement du Grand Quartier, la répartition des débits est la suivante :

- Q lit mineur : 9 m³/s
- Q bief lit majeur : 12.4 m³/s

4.1.3.2. Bief Valjoly

En amont du pont désaffecté, le débit de la crue est de 24.7 m³/s. La même procédure que précédemment a été utilisée pour calibrer le débit passé sous l'ouvrage avec la charge observée : celui-ci a été estimé à 16.3 m³/s. Le profil en long de la ligne d'eau est visible sur la Figure 19.

Les débordements en amont de l'ouvrage, importants à cet endroit, ont créés trois biefs :

- Celui en rive gauche rejoint la rivière 90 m en aval (profil 37.3).
- Celui en rive droite se dissocie en deux écoulements : le premier, très limité, a rejoint la rivière en aval du pont et le second, plus important, a généré le bief du Valjoly.

Un profil spécifique visualisant les trois débordements a été créé pour le calcul du débit surversant (cf. Figure 22).

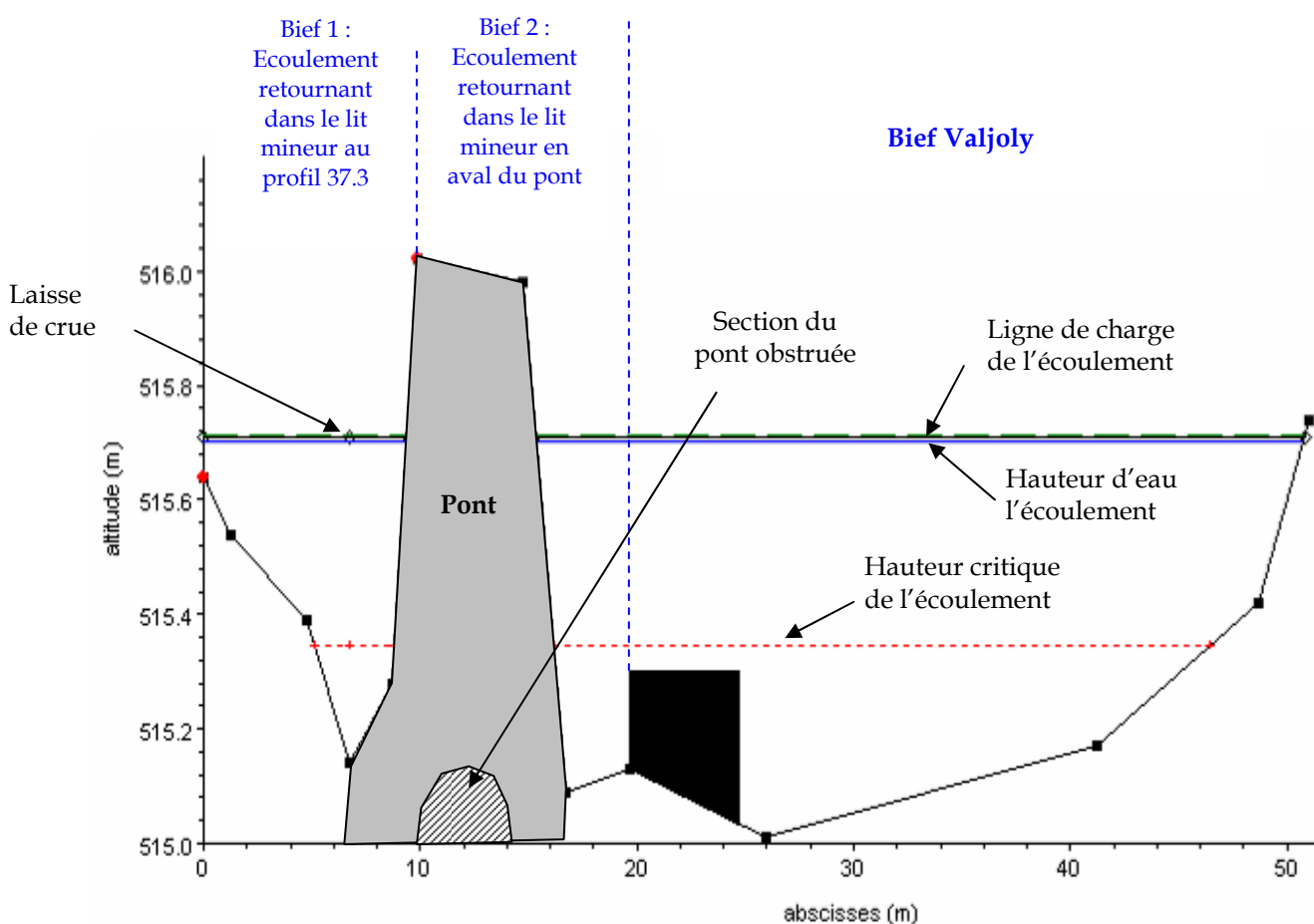


Figure 22 : Profil spécifique créé pour le calcul du débit surversant au droit du pont désaffecté

Sur ce profil, la section du pont a été obstruée afin de pouvoir calculer seulement le débit surversé. La ligne d'eau obtenue est très proche de la laisse de crue pour un débit surversé de $8.4 \text{ m}^3/\text{s}$: ce débit injecté est donc cohérent.

On obtient bien $Q_{\text{total}} (24.7) = Q_{\text{pont}} (16.3) + Q_{\text{surversé dans les 3 biefs}} (8.4)$.

Les débits spécifiques de ces trois biefs ont ensuite été calculés à partir des vitesses indiquées par HEC Ras, multiplié par la section mouillée.

La répartition des débits est la suivante :

- Ecoulement rive gauche rejoignant le lit mineur au profil 37.2 = $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- Ecoulement rive droite rejoignant le lit mineur en aval du pont = $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$
- **Ecoulement rive droite créant le bief Valjoly en aval du pont = $5.4 \text{ m}^3/\text{s}$**

A noter la présence de débordement faibles au droit du premier méandre en aval du pont, qui rejoignent le bief du Valjoly : ce débit n'a pas été quantifié.

L'étude du comportement de ces écoulements débordants indiquent la création d'un 2^{ème} bief (cf. § 3.2.4) qui ne s'est pas ou peu mélangé avec le bief Valjoly. Ce 2^{ème} bief a rejoint le lit mineur en amont du profil 40.3.

En aval des gymnases, il n'y a pas eu de débordements du lit mineur et les laisses de crues indiquent un débit sensiblement identique à celui observé au droit du profil 37.3.

Il a été considéré qu'il n'y a pas eu de raccords entre le lit mineur et le bief Valjoly avant leur confluence au profil 41.8.

4.1.3.3. Synthèse des débits transitant dans chaque bief

La répartition des débits est représentée sur la Figure 23 ci-dessous.

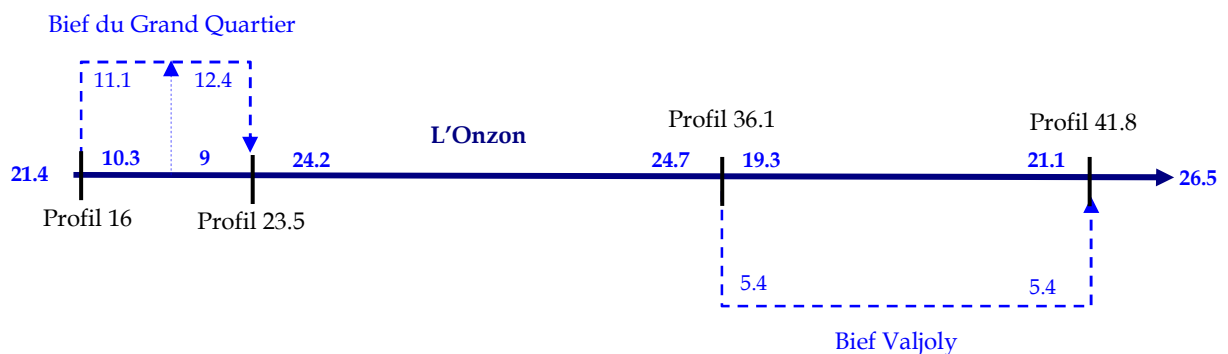


Figure 23 : Schéma de répartition des débits

4.1.4. Calage du modèle

Lorsque le débit Q_{50} a été injecté dans le modèle, l'alignement de la ligne d'eau avec les laisses de crues observées sur le terrain était cohérent sur la majeure partie du profil en long (cf. profil de la ligne d'eau à l'annexe VII).

Des ajustements mineurs ont été réalisés en faisant varier les coefficients de rugosité.

Aux endroits où des discordances ont été relevées, une phase terrain supplémentaire a été menée afin de vérifier les valeurs des coefficients de rugosité et/ou d'ajouter des profils en travers manquants.

4.1.5. Synthèse

Au droit du profil 36.5, l'événement de novembre 2008 a été estimé à une crue cinquantennale actuelle, supérieure à la crue centennale future.

Le calage hydraulique des ouvrages a permis d'estimer la répartition des débits au sein des différents biefs. La vérification de la cohérence de la ligne d'eau (profil en long) dans le lit mineur avec les laisses de crues a confirmé ce débit de fréquence cinquantennal.

4.2. Modélisation de la crue centennale future

L'objectif de la modélisation de la crue centennale future en l'état actuel (topographie actuelle) est d'étudier les points de débordements résiduels après construction du barrage. La cartographie de ces points de débordements est située à l'annexe VIII.

D'amont à l'aval, les comportements hydrauliques déduits par les résultats de la simulation sont décrits dans les paragraphes suivants.

4.2.1. Profils 16.1 à 24.7 : Bief du Grand Quartier

Au lieu dit « le Banc », le débit en amont du pont est de $11.3 \text{ m}^3/\text{s}$: La capacité du pont ne permettant pas de faire transiter ce débit (cf. § 4.1.2), le bief du Grand Quartier se crée.

La répartition des débits est la suivante :

- $Q_{\text{lit mineur}} = 8 \text{ m}^3/\text{s}$
- $Q_{\text{bief Grand Quartier}} = 3.3 \text{ m}^3/\text{s}$

L'ovoïde (profil 21) se met en charge mais la ligne d'eau n'est pas suffisamment surélevée pour activer le 2^{ème} débordement au droit du profil 17.5.

4.2.2. Profils 24.9 à 28.5

Le lotissement « Les Coquelicots » n'est pas inondé. Le remblai en rive droite (profil 25.4) surélève la ligne d'eau et inonde le pré en amont sans toutefois inonder des habitations.

Un 2^{ème} débordement de quelques centimètres d'eau survient au droit du profil 25.9 inondant seulement des jardins.

Le pont au profil 26.9 fait transiter l'ensemble du débit sans provoquer de débordements.

4.2.3. Profils 29.5 à 34.8

Un débordement est visible en rive gauche au droit du profil 29.5, inondant une faible frange de terrain du lotissement « Belle source ».

La digue située en rive droite en aval du lotissement « le Rivage » n'est pas submergée (revanche de 30 cm). Etant donné la hauteur d'eau observée, la digue joue son rôle de protection des terrains en retrait. Sa rupture provoquerait des inondations.

Le pont profil 32.1 surélève la ligne d'eau, provoquant une inondation forte du tènement industriel de Sogran Lotrans. L'écoulement rejoint le lit mineur en aval du profil 33.1 avant de déborder à nouveau en rive gauche au profil 33.7 et d'inonder une habitation en rive gauche.

Un débordement se fait au profil 30.9 en rive droite touchant un terrain loti.

4.2.4. Profils 34.8 à 39.9 : Bief du Valjoly

Le pont désaffecté n'ayant pas la capacité de faire transiter 15.1 m³/s sans créer de débordements en amont, le bief du Valjoly est activé. La répartition des débits est la suivante :

- Q lit mineur = 14.5 m³/s
- Q bief Valjoly = 0.6 m³/s

Malgré le faible débit transitant dans ce bief, la topographie du site empêche celui-ci de rejoindre le lit mineur. Ce bief est susceptible d'inonder le complexe sportif et plusieurs habitations.

En aval, en rive gauche, un débordement subsiste au profil 37.3, inondant un terrain loti. En rive droite, des débordements peuvent subsister car l'écoulement est limite débordant. L'absence de revanche ne peut permettre de conclure à l'absence de débordement au droit de ses sections.

Au profil 38.5, l'écoulement déborde sur les 2 rives.

4.2.5. Profils 39.9 à 43

Dans le lit mineur, des débordements subsistent en rive droite entre les profils 40.9 et 41.2. En aval, un écoulement est actif en lit majeur gauche (pré).

Au profil 41.8, tout le bief Valjoly rejoint le lit mineur et ne déverse pas par le muret en rive droite.

Au profil 42.3, le lit mineur inonde le tènement de l'usine De Freitas mais l'habitation en rive gauche est protégée par son mur.

Le débordement rive gauche entre les profils 42.4 et 43, sur la rue du Puits Pointu, ne s'active plus.

4.2.6. Aval du site d'étude

L'inondation du tènement industriel est susceptible de recréer un bief en rive droite à partir de la rue du Puits Pointu et d'inonder des lotissements en aval.

4.2.7. Synthèse

Les résultats obtenus pour la modélisation de la crue centennale future indiquent la présence de plusieurs débordements résiduels.

- La section d'écoulement insuffisante du lit mineur et du pont au niveau de la rue du Puits Pointu crée un débordement sur le tènement de l'entreprise De Freitas. Ce débordement active un bief à l'aval de la rue du Puits Pointu qui inonde deux lotissements en aval.
- Le bief Valjoly est actif. Malgré un débit faible (600 l/s), ce bief ne peut rejoindre la rivière et suivra la même trajectoire qu'en 2008, risquant d'engendrer des dégâts sur 800 m en zone urbanisée. Deux autres débordements résiduels en aval risquent de rejoindre le bief Valjoly.
- A l'amont, les seuls problèmes rencontrés sont des débordements ponctuels aux profils 31.2 (entreprise Sogran Lotrans et une habitation) et 33.7 (une habitation).

Le bief du Grand Quartier ne provoque aucun désordre sur la zone urbaine : ces points de débordements ne feront pas l'objet de travaux.

4.3. Modélisation des seuils de débordements

Une gamme de débits étalée entre Q_{10} et Q_{100} futurs a été injectée dans la géométrie actuelle permettant de faire apparaître des seuils de débordements.

Les débits maxima pouvant transiter dans le lit mineur avant débordement sont indiqués sur les cartes situées à l'annexe VIII. Les temps de retour correspondants à ces débits maxima ont été signalés. Les débordements qui s'activent en premier sont ceux dont le temps de retour est le plus faible.

Remarque : En aval du pont désaffecté (profil 36.1), le laminage faible (600 l/s en Q_{100F}) généré par la création du bief Valjoly n'a pas été pris en compte. Ce choix a été motivé par le fait d'étudier les débordements susceptibles de se créer avec tout le débit de crue passant dans le lit mineur.

La description des débordements a été classée selon leur fréquence d'apparition.

4.3.1. Débordements apparaissant pour un débit inférieur à Q_{10} futur

D'amont à l'aval, les débordements qui s'activent avant la crue décennale sont les suivants :

- Profil 25.3 : inondation d'une prairie (rive droite) : ce débordement ne touche aucun enjeu.
- Profil 42.1 : Inondation d'une prairie (rive gauche) : ce débordement ne touche aucun enjeu, l'habitation située en aval est protégée par son mur.
- Profil 42.3 : Inondation du tènement industriel de l'entreprise De Freitas.

4.3.2. Débordements supplémentaires apparaissant pour un débit inférieur à Q_{30} futur

D'amont à l'aval, les débordements qui s'activent avant la crue trentennale sont les suivants :

- Profil 16.1 : Création du bief du Grand Quartier : aucun dommage n'est observé sur les habitations.
- Profil 25.7 à 26.2 : inondation de jardins en rive droite. Un mur permet à l'écoulement de retourner dans le lit mineur au profil 26.2 : aucun enjeu touché.
- Profil 31.9 : Inondation en rive gauche de la totalité du tènement industriel Sogran Lotrans généré par la capacité insuffisante du pont (profil 32.1).

- Profil 33.7 : Débordement sur les deux rives. Seul le débordement rive gauche est susceptible d'inonder une habitation.
- Profil 36.1 : Création du bief Valjoly susceptible de causer des inondations sur des habitations sur 800 m de linéaire en zone urbaine.
- Profil 37.3 : Inondation rive gauche d'une habitation.
- Profil 41.2 : Inondation rive droite de plusieurs habitations.
- Profil 41.3 et 41.8 : Inondation rive gauche d'une prairie.

4.3.3. Débordements supplémentaires apparaissant pour un débit inférieur à $Q_{50\text{futur}}$

D'amont à l'aval, les débordements qui s'activent avant la crue cinquantennale sont les suivants :

- Profil 29.5 : Inondation rive gauche de deux terrains : la faible hauteur d'eau déversée ne touche pas les habitations.
- Profil 30.8 : inondation rive droite d'une prairie par la surverse d'une digue.

4.3.4. Débordements supplémentaires apparaissant pour un débit inférieur à $Q_{100\text{futur}}$

D'amont à l'aval, les débordements qui s'activent avant la crue centennale sont les suivants :

- Profil 30.9 : Inondation rive droite de terrains : la faible hauteur d'eau déversée ne touche pas les habitations.
- Profil 37.2 : Inondation sur les deux rives : une prairie est inondée en rive gauche mais ce débordement suralimente l'inondation du profil 37.3 qui s'active avant Q_{10F} . Le déversement en rive droite inonde une prairie puis alimente le bief Valjoly.
- Profil 37.3 : Déversement en rive droite dans une prairie qui alimente le bief Valjoly.
- Profil 38.5 : Très faibles déversements sur les deux rives générés par un resserrement ponctuel du lit mineur. Une prairie est inondée en rive gauche tandis qu'en rive droite, il y a un risque d'inondation du complexe sportif.
- Profil 40.9 : Faible déversement sur la rive droite avec un risque d'inondation d'habitations. Ce déversement rejoint celui du profil 41.2 généré avant Q_{30F} .

4.4. Synthèse : création d'une carte de risques

La carte de risques de débordements ci après (cf. Figure 24 et Figure 25 pages suivantes) permet de visualiser 4 grandes zones à risques, toutes situées sur la partie aval de la zone d'étude.

La zone à risque située la plus en aval concerne les inondations en amont de la rue du Puits pointu et la création d'un bief à l'aval de l'ouvrage. Cette zone concerne des risques forts puisque les 1^{ers} débordements apparaissent pour une crue inférieure à Q_{10F} . Le pont de la rue du Puits Pointu se met en charge pour un débit inférieur à Q_{30F} , surélève la ligne d'eau et active le bief qui passe sur la rue. Ce débordement est généré la mise en charge du pont qui est traversé par plusieurs conduites (cf. photo Figure 13). En cas d'obstruction par des encombres, le débordement pourrait activer le bief pour un temps de retour plus faible.

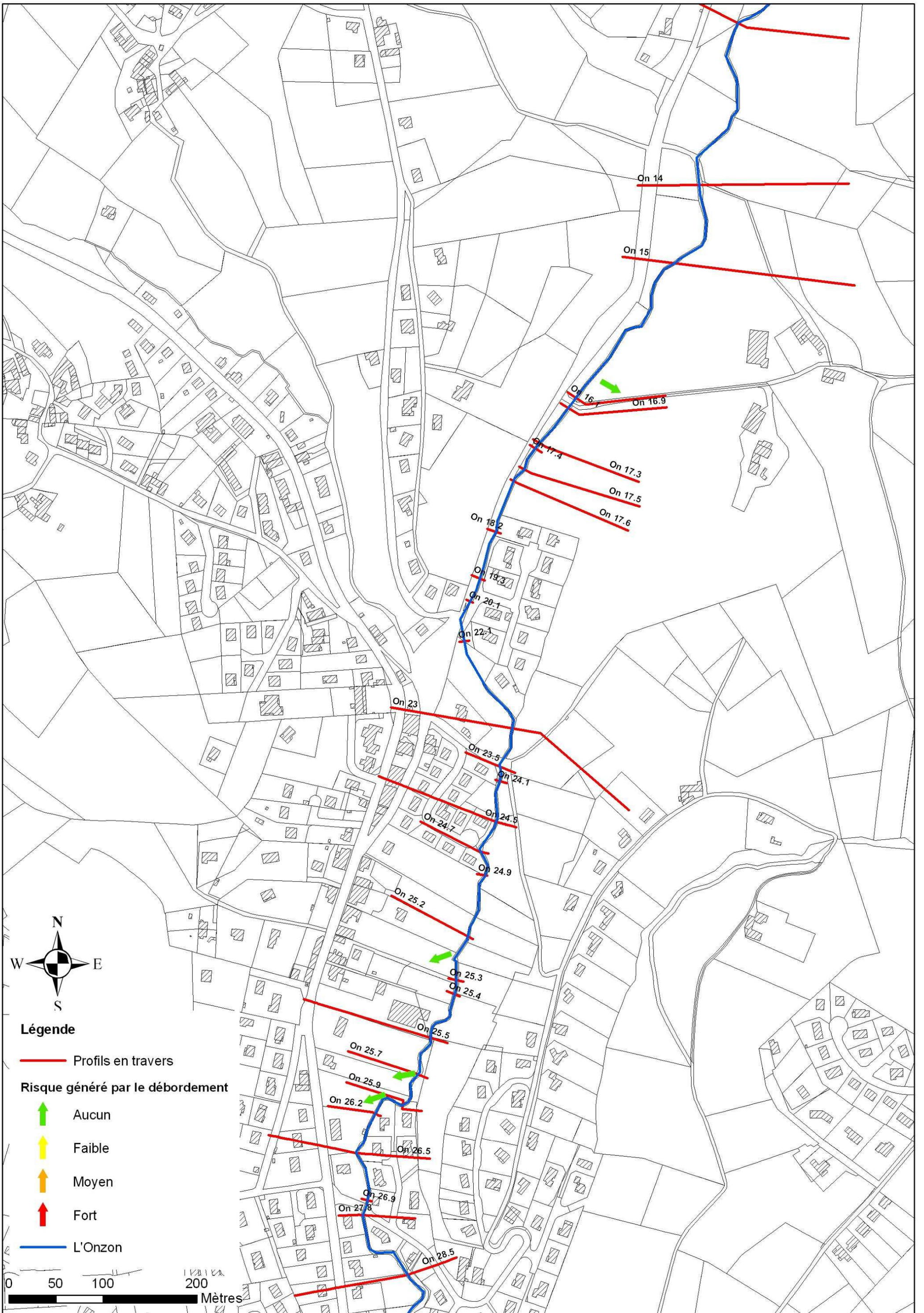
La 2^{ème} zone à risque concerne l'ensemble des débordements situés entre le profil 36.1 et le profil 41.8, susceptibles de réactiver le bief Valjoly. Cette zone est considérée avec des risques forts puisque le 1^{er} débordement risquant de réactiver le bief Valjoly apparaît pour un débit inférieur à Q_{30F} . Ce bief est également généré par la mise en charge d'un pont dont la faible section d'écoulement est susceptible de s'obstruer par des encombres, avec les mêmes risques décrits pour le pont de la rue du Puits Pointu.

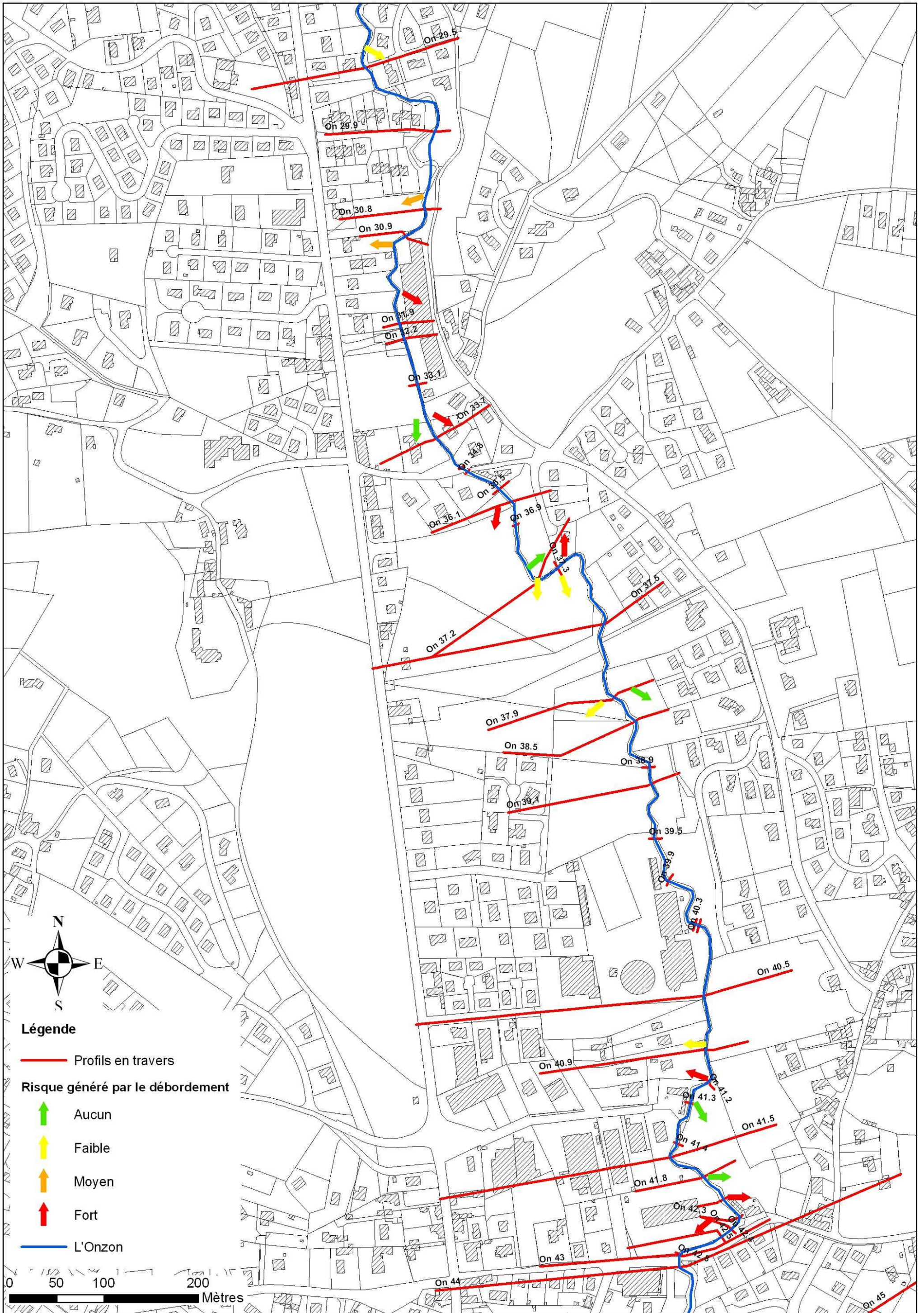
En amont, un débordement ponctuel crée un risque pour une seule habitation (profil 33.7). Le risque est considéré comme fort puisque le débordement se crée pour un temps de retour faible (inférieur à Q_{30F}) et générant 30 cm d'eau en Q_{100F} au droit de l'habitation.

La dernière zone à risque concerne l'inondation des deux rives entre les profils 30.9 et 33. Le risque est considéré comme moyen pour l'habitation noyée en rive droite pour un débit proche de Q_{100F} et important pour le tènement industriel, inondé à pour un débit inférieur à Q_{30F} et recouvert de 60 cm d'eau en Q_{100F} .

Sur la partie amont de la zone d'étude, les débordements résiduels n'impactent aucun enjeu : les risques associés sont considérés comme nuls.

Ci-après : Cartes de risques de débordement (Figures 24 et 25)





5. Discussion

Ce chapitre concerne l'analyse de la suppression des débordements résiduels pour Q_{100F} présentant un risque. Afin de savoir si ces aménagements peuvent être entrepris avant la construction du barrage, l'étude des comportements des écoulements a été modélisée avec le débit de la crue 2008.

En effet, le calage précis du modèle sur ce débit de crue (Q_{50} actuel) permet de connaître précisément l'incidence d'une telle crue sur les aménagements projetés (la simulation de la crue centennale actuelle n'a pas été testée car le rôle des nombreux obstacles présents peut varier).

Les travaux ont été dimensionnés pour que la ligne d'énergie soit inférieure au haut de berge. L'étude de la suppression des débordements s'est faite de l'aval vers l'amont. La description et le chiffrage des travaux sont détaillés à un niveau d'Avant Projet Sommaire. Les prix indiqués sont issus de travaux similaires faits par St-Etienne Métropole. Un plan de situation des travaux est situé à l'annexe IX.

Les aménagements de berges sont fait en génie végétal, ils sont composés généralement de fascines en pied de berge et d'un géotextile (géonatte de coco) protégeant les banquettes et les berges. Un ensemencement est prévu sous la géonatte. La pente des berges aménagées est de 3/1 (3 m horizontalement pour 1 m verticalement) au maximum. Des plantations d'arbustes indigènes (ripisylve) complète les aménagements.

La Figure 26 ci-dessous présente une coupe type d'aménagement de berge.

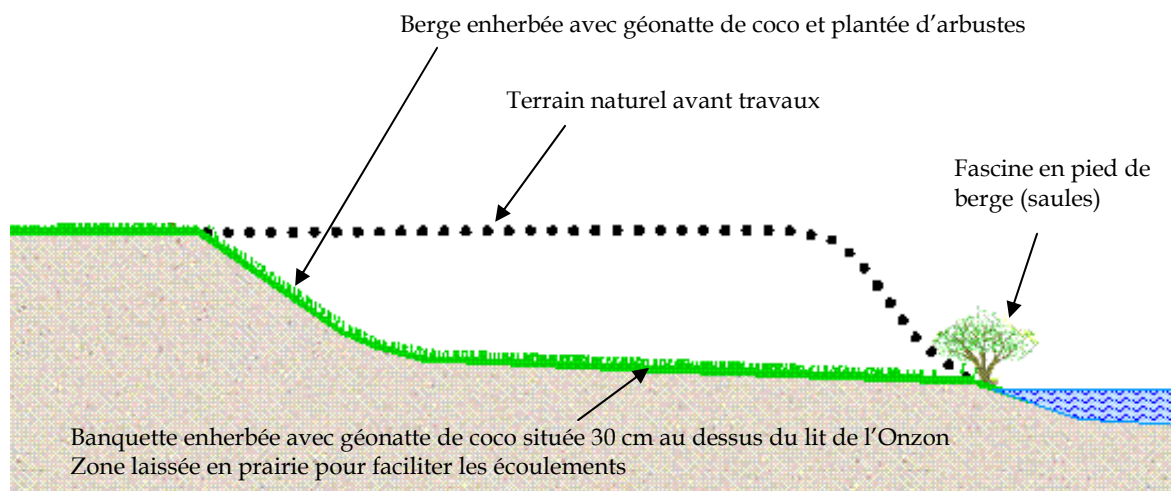


Figure 26 : Schéma d'élargissement de la section d'écoulement avec aménagements en génie végétal

5.1. Suppression du bief de la rue du Puits Pointu

L'objectif de ces travaux est de faire transiter plus de débit dans le lit mineur en aval du pont qu'en l'état actuel. La section d'écoulement du lit mineur en aval a été calibrée pour faire transiter la crue centennale future.

Ces travaux ne pourront être entrepris qu'après la construction du barrage car si un débit supérieur à la crue centennale future transite dans le lit mineur, il y a un risque de sur-inondation des habitations et des industries en aval en rive gauche. La modélisation de Q_{50} actuel n'a donc pas été étudiée.

Une revanche supplémentaire de 5 cm au dessus de la ligne d'énergie pour le haut de berge des aménagements a été prise afin d'obtenir une sécurité sur les débordements.

Le détail des travaux nécessaires pour supprimer ce bief est le suivant :

- Amélioration de l'écoulement sous la rue du Puits Pointu : création d'un nouvel ouvrage d'une largeur de 7 m offrant une section d'écoulement de 10.5 m² (au lieu de 3.6 m de large aujourd'hui). Le prix indiqué pour le remplacement de ce pont est chiffré hors coûts de dévoiements des réseaux présents : gaz distribution, eau potable, électricité.
- Elargissement de la section d'écoulement entre les profils 42.8 et 42.1 : 100 ml de travaux.
 - o Profil 42.8 : Elargissement de la section d'écoulement (rectangulaire) de 2.74 m à 7 m : recul de la rive droite et pose de gabions sur 2 m de hauteur en rive droite (+ ancrage de 1 m sous le niveau du lit) sur 10 ml (mètre linéaire). Le choix des gabions est justifié par la nécessité d'une rugosité minimum et d'assurer dans le virage une section rectangulaire identique à celle du pont.
 - o Profil 42.5 et 42.3 : création d'une banquette basse de 5 m en rive droite située 30 cm au dessus du lit mineur puis berge taillée une pente de 3/1.
 - o Profil 42.4 et 42.1 : création d'une banquette basse de 2 m en rive droite située 30 cm au dessus du lit mineur puis berge taillée avec une pente de 3/1.

Le coût des travaux est indiqué dans le Tableau 6 ci-après.

Désignation	unité	quantité	coût unité (HT)	coût total (HT)
Installation de chantier	forfait	1	2 000 €	2 000 €
Remplacement du pont	m ² de voirie	84	2 000 €	168 000 €
Terrassement	m ³	700	16 €	11 200 €
Gabion	m ³	30	170 €	5 100 €
Abattage d'arbres	u	30	150 €	4 500 €
Désouchage d'arbres	u	30	40 €	1 200 €
Fascine	ml	90	120 €	10 800 €
Géotextile	m ²	1 200	3.6 €	4 320 €
Enherbement	m ²	1 200	0.4 €	480 €
Plantations	u	100	7 €	700 €
divers et imprévus (10 %)				20 830 €
Total des travaux				229 130 €

Tableau 6 : Coût des travaux nécessaires à la suppression du bief de la rue du Puits Pointu

Le profil de la ligne d'eau et le détail des profils en travers pour Q100F avant et après travaux sont indiqués à l'annexe X.

5.2. Suppression du bief Valjoly

L'inondation majeure de l'étude est créée par le bief Valjoly. Afin de pallier ce problème, la suppression de ce pont pourrait être envisagée prochainement (avant construction du barrage). L'impact de la suppression de ce pont sur le débit transitant dans le lit mineur en aval a été étudié de deux manières :

- Pour la crue centennale future afin de simuler l'impact de cette suppression après construction du barrage ;
- Pour le débit de la crue 2008 afin de simuler l'impact de cette suppression si une crue de même intensité survenait avant la construction du barrage.

5.2.1. Modélisation hydraulique de l'effacement du pont 36

Cas n°1 : Modélisation de la crue centennale future

Comme décrit précédemment (§ 4.2.4), le pont désaffecté ne génère qu'un laminage de 0.6 m³/s : L'effacement du pont fera transiter en aval un débit de 15.1 m³/s au lieu de 14.5 m³/s (après création du barrage). Il en résulte un exhaussement de la ligne d'eau de 5 cm sur les profils en aval (profils 37.2 et 37.3).

Les conséquences sont une accentuation des déversements existants mais aucun nouveau déversement ne s'active. Le déversement rive droite entre les profils 37.2 et 37.3 est faible (seulement quelques centimètres d'eau) et ceux-ci rejoignent le bief Valjoly. Ce très faible débit n'a pas été quantifié car son laminage a trop peu d'impact sur la ligne d'eau en aval.

Cas n°2 : Modélisation de la crue 2008

La modélisation de la crue 2008 sans la présence du pont désaffecté a donné les résultats suivants (cf.Figure 27) :

- En amont du profil 36.1, l'abaissement de la ligne d'eau de près de 30 cm à l'amont (profil 35.5) empêche l'activation du bief Valjoly à cet endroit.
- A l'aval de ce profil, 5.4 m³/s supplémentaires (débit estimé du bief Valjoly en 2008) sont injectés dans le lit mineur par rapport à 2008 ce qui surélève la ligne d'eau de 12 cm environ. L'écoulement qui était jusqu'alors peu débordant en rive droite entre les profils 37.2 et 37.3 s'intensifie : provoquant une ligne d'eau débordante de 15 cm sur 50 m de linéaire. Ce débordement a été quantifié à environ 3 m³/s.
- L'habitation en rive gauche située au profil 37.3 est sur-inondée.
- Plus en aval, un 2^{ème} débordement se produit à partir du profil 37.5. Ce débordement, qui a été visualisé en 2008, s'intensifie et est capable d'évacuer le sur-débit restant (2.4 m³/s) dans le lit majeur droit.

Ces deux débordements rive droite suivent la pente du terrain et retrouve le tracé du bief Valjoly à partir du profil 37.9 (situé en amont des enjeux). La conséquence de ces débordements est de faire transiter à nouveau dans le bief Valjoly un débit équivalent à celui créé par le pont désaffecté et d'impacter les mêmes enjeux.

En aval du profil 37.9, le débit qui transite dans le lit mineur est similaire à celui rencontré lors de la crue de 2008 générant des débordements de même ampleur.

Si toutefois des aménagements étaient entrepris entre les profils 37.2 et 37.9, le lit mineur n'est pas capable de faire transiter le débit total de la crue 2008 et des débordements se produiront en aval dans le lit majeur droit.

Les travaux d'effacement du pont devront être entrepris après construction du barrage.

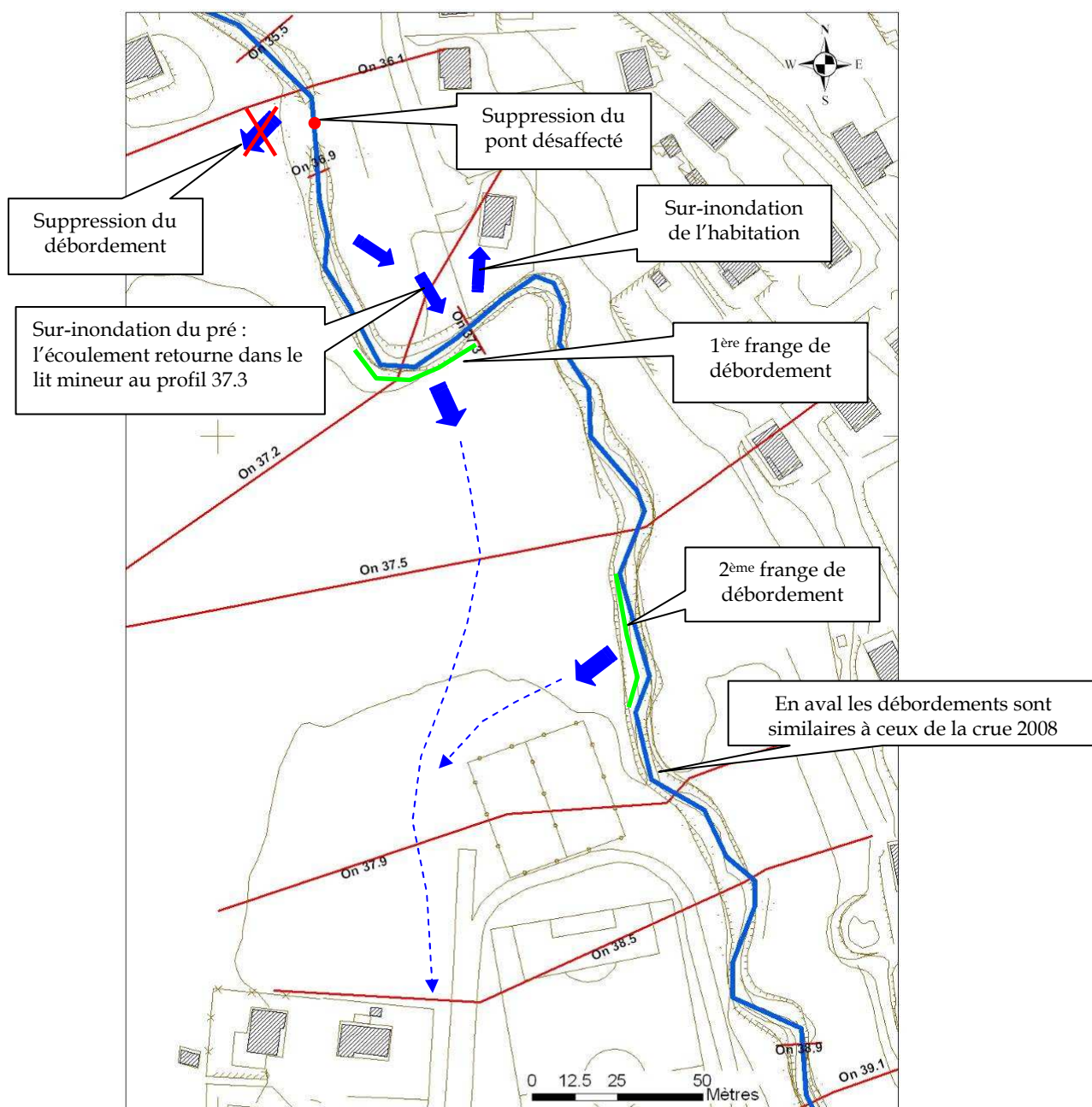


Figure 27 : Cartographie des écoulements pour Q_{crue} 2008 en supprimant le pont désaffecté

5.2.2. Détail des travaux

Après construction du barrage, les travaux qui peuvent être entrepris sont les suivants :

- Suppression du pont désaffecté au profil 36.1 et élargissement de la section d'écoulement en aval (le coût des travaux est indiqué dans le Tableau 7).
 - o Profil 37.2 : Création d'une banquette basse de 2 m en rive gauche située 30 cm au dessus du lit mineur puis berge taillée une pente de 3/1.

- o Profil 37.3 : Création d'une banquette basse de 2 m en rive gauche située 30 cm au dessus du lit mineur puis berge taillée une pente de 3/1.
- o La berge située en rive gauche entre les profils 36.9 et 37.2 est fortement soumise à l'érosion : Afin d'éviter d'érosion entre les travaux du pont désaffecté et le profil 37.2, le linéaire complet de cette berge sera repris en techniques végétales (berge taillée une pente de 3/1).

Désignation	unité	quantité	coût unité (HT)	coût total (HT)
Installation de chantier	forfait	1	2 000 €	2 000 €
Suppression du pont	m ³ de béton	230	28 €	6 440 €
Abattage d'arbres	u	30	150 €	4 500 €
Désouchage	u	30	40 €	1 200 €
Terrassement	m ³	820	16 €	13 120 €
Fascine	ml	160	120 €	19 200 €
Géotextile	m ²	350	3.6 €	1 260 €
Enherbement	m ²	350	0.4 €	140 €
Plantations	u	10	7 €	70 €
divers et imprévus (10 %)				4 793 €
Total des travaux				52 723 €

Tableau 7 : Coût des travaux nécessaires à la suppression du pont désaffecté et l'élargissement de la section d'écoulement en aval.

- Élargissements ponctuels de 3 sections limitantes (le coût des travaux est indiqué dans le Tableau 8).
- o Profil 37.5 et 38.5 : Création d'une banquette de 2 m en rive droite située 30 cm au dessus du lit mineur puis berge taillée une pente de 3/1.
- o Profil 40.9 : destruction du parement en enrochement et retalutage de la berge.

Désignation	unité	quantité	coût unité (HT)	coût total (HT)
Installation de chantier	forfait	1	2 000 €	2 000 €
Terrassement	m ³	265	16 €	4 240 €
Abattage d'arbres	u	12	150 €	1 800 €
Désouchage	u	7	40 €	280 €
Rabotage de souches	u	5	70 €	350 €
Fascine	ml	25	120 €	3 000 €
Géotextile	m ²	210	3.6 €	756 €
Enherbement	m ²	210	0.4 €	84 €
Plantations	u	25	7 €	175 €
divers et imprévus (10 %)				1 269 €
Total des travaux				13 954 €

Tableau 8 : Coût des travaux nécessaires à l'élargissement de 3 sections limitantes.

- Optimisation du champ d'expansion de crue en rive gauche entre les profils 41.2 et 42.1 (le coût des travaux est indiqué dans le Tableau 9).

Afin de soulager le lit mineur entre les profils 41.2 et 42.1 et d'éviter des débordements en rive droite, la digue protégeant le pré en rive gauche doit être arasée. La topographie naturelle du site permet de réinjecter le laminage créé dans le pré en amont du profil 42.1 comme observé en 2008.

En amont, au droit du virage, la berge sera taillée avec une pente de 4/1 (profils 41.2 et 41.3) puis sur les profils en aval, la pente sera de 3/1 (profils 41.4 à 41.8).

La création de ce champ d'expansion crée un risque supplémentaire pour l'habitation située en aval en rive gauche. En effet, bien que la topographie du site dirige les écoulements dans le lit mineur en amont de la parcelle, le mur protégeant l'habitation doit être protégé. Par sécurité, un merlon de terre sera créé parallèlement au mur.

Désignation	unité	quantité	coût unité (HT)	coût total (HT)
Installation de chantier	forfait	1	2 000 €	2 000 €
Terrassement	m ³	650	16 €	10 400 €
Abattage d'arbres	u	70	150 €	10 500 €
Désouchage	u	70	40 €	2 800 €
Fascine	ml	160	120 €	19 200 €
Géotextile	m ²	1 300	3.6 €	4 680 €
Enherbement	m ²	1 100	0.4 €	440 €
Plantations	u	400	7 €	2 800 €
divers et imprévus (10 %)				5 282 €
Total des travaux				58 102 €

Tableau 9 : Coût des travaux nécessaires à l'optimisation du champ d'expansion de crue.

Le profil de la ligne d'eau et le détail des profils en travers pour Q100F avant et après travaux sont indiqués de l'annexe X pour le champ d'expansion et recalibrage du profil 40.9 et à l'annexe XI pour le reste.

5.3. Suppression de l'inondation au profil 33.7

Afin de soustraire l'habitation en rive gauche du risque d'inondation, plusieurs simulations d'élargissement de la section d'écoulement ont été testées.

Le fait de prendre une très grande surface d'écoulement au droit du profil n'abaisse pas suffisamment le niveau d'eau pour éviter l'inondation en rive gauche : La section de contrôle qui rehausse la ligne d'eau est située 40 m en aval

La suppression de l'inondation de l'habitation n'est possible que par un calibrage relativement conséquent de la section d'écoulement nécessitant des emprises foncières importantes et un coût disproportionné par rapport à l'enjeu, sachant que parallèlement cette habitation possède un mur de protection qui ne sera pas surversé en Q_{100F} . L'inondation provient seulement du fait que son mur n'est pas continu : l'installation d'un batardeau sur l'échancrure suffirait à protéger l'habitation.

Les travaux de reprise de l'entonnement amont du pont n'ont donc pas été étudiés.

5.4. Suppression de l'inondation entre les profils 30.9 et 33.1

Plusieurs simulations hydrauliques ont été testées.

En 1^{er} lieu, les modélisations ont concernées la suppression de l'exhaussement généré par le pont situé au profil 32.1. Les travaux proposés sont la création d'une passerelle située au dessus du niveau des rives et l'élargissement des entonnements amont et aval. Ces travaux permettent d'offrir une section d'écoulement plus importante de supprimer l'inondation de l'industrie en rive gauche, propriétaire de ce pont.

En amont, d'autres simulations portant sur des élargissements de sections d'écoulement ne suffisent pas à supprimer l'inondation en rive droite. En effet, la parcelle de l'habitation n'est pas protégée par une digue (digue visible sur le profil 30.9) et est située seulement 1 m au dessus du lit mineur.

La seule solution serait d'entreprendre des travaux pour assurer la continuité de la digue mais avec un risque toujours présent de rupture de digue, pouvant générer des dégâts plus importants. Le coût des travaux est seulement donné à titre indicatif dans le Tableau 10).

Désignation	unité	quantité	coût unité (HT)	coût total (HT)
Installation de chantier	forfait	1	2 000 €	2 000 €
Remplacement du pont	m ² de voirie	76	2 000 €	152 000 €
Terrassement	m ³	700	16 €	11 200 €
Fascine	ml	12	120 €	1 440 €
Géotextile	m ²	36	3.6 €	130 €
Enherbement	m ²	36	0.4 €	14 €
divers et imprévus (10 %)				16 678 €
Total des travaux				183 462 €

Tableau 10 : Coût des travaux nécessaires au remplacement du pont de l'entreprise Sogran Lotrans.

Le détail de la modélisation pour ses travaux n'est pas présenté en annexe n'ayant pu supprimer totalement le risque d'inondation sur ces enjeux.

6. Conclusion

La particularité de cette modélisation provient du fait qu'elle survient après un épisode majeur. La présence de nombreuses laisses de crues et de témoignages de riverains ont permis d'analyser finement les hauteurs d'eau et les directions d'écoulements.

L'intensité de la crue de novembre 2008 a été estimée à une crue de fréquence cinquantennale. Cette valeur a ensuite été confirmée sur l'ensemble du linéaire avec une bonne concordance entre les laisses de crues et la ligne d'eau modélisée.

De nombreux débordements touchant des habitations ont été relevés. Certains ont été provoqués par les capacités d'écoulements insuffisantes de ponts et sont à l'origine de biefs qui, déconnectés de l'écoulement en lit mineur, ont inondés de grandes surfaces de zones urbanisées.

Le débit atteint par cette fréquence de retour cinquantennale ($20,6 \text{ m}^3/\text{s}$ à l'amont de la zone d'étude, correspondant au débit au droit du futur barrage) est supérieur au débit évacué par le futur barrage en crue centennale ($10,5 \text{ m}^3/\text{s}$).

L'impact de ce futur débit centennal, étudié à partir du modèle hydraulique calé sur la crue de novembre 2008, a révélé la présence de débordements résiduels. L'objectif de l'étude est de localiser et quantifier les débordements résiduels après la construction du barrage. Des élargissements de la section d'écoulements ont été étudiés pour faire transiter la crue centennale future.

La suppression du bief Valjoly passe par la destruction d'un pont, l'élargissement de 90 ml de section d'écoulement et l'optimisation d'un champ d'expansion de crue, pour un coût total de 125 K€.

La suppression du bief de la rue du Puits Pointu nécessite quand à lui le recalibrage d'un pont et l'élargissement de 90 ml de section d'écoulement sont nécessaires, pour un coût total de 229 K€.

Des débordements touchant des enjeux isolés sont encore présents du fait de l'urbanisation très dense au bord de l'Onzon. Le débit centennal futur ne peut transiter sans déborder sur des terrains lotis. Des modélisations ont montré que les travaux de recalibrage du lit étaient soit d'un coût disproportionné par rapport à l'enjeu soit impossible pour supprimer totalement le risque d'inondation. Seules des protections individuelles (batardeaux) ou un déplacement des enjeux hors zone inondables peuvent être envisagés pour ces enjeux isolés.

LEXIQUE

Débit de fuite : Débit de sortie du barrage écrêteur de crue calibré par un pertuis.

Ecoulement fluvial : Ecoulement à surface libre dont le niveau d'eau est inférieur à la ligne d'eau critique. Le nombre de Froude est inférieur à 1. Le contrôle de la hauteur d'eau s'effectue par l'aval.

Ecoulement torrentiel : Ecoulement à surface libre dont le niveau d'eau est inférieur à la ligne d'eau critique. Le nombre de Froude est supérieur à 1. Le contrôle de la hauteur d'eau s'effectue par l'amont : cas des rivières à très fortes pentes.

Ecrêtement : Résultat du phénomène hydraulique du laminage (voir ce mot).

Laminage : Effet de diminution du débit de pointe de la crue. Une partie du volume est stocké temporairement dans la retenue du barrage.

Ligne d'eau critique : Hauteur d'eau de l'écoulement, située entre le régime fluvial et le régime torrentiel.

Ligne de charge : Niveau d'énergie que l'écoulement atteindrait en cas de vitesse nulle.

Lit majeur : Espace occupé par la rivière en crue.

Lit mineur : Espace délimité par les berges du cours d'eau.

Modélisation hydraulique : modèle numérique qui permet de résoudre les équations de l'hydraulique à surface libre.

Pluies cévenoles : grandes masses d'air humide provenant de la Méditerranée qui butent sur les Cévennes et provoquent des pluies longues et intenses

Section de contrôle : Section d'écoulement réduite qui, en comprimant l'écoulement, rehausse la ligne d'eau à l'amont dans le cas d'un écoulement en régime fluvial.

BIBLIOGRAPHIE

PLANTIER, M., 2003, Prise en compte des caractéristiques physiques du bassin versant pour la comparaison des approches globales et semi-distribuée en modélisation pluie/débit, Thèse, ENGEEES.

CETMEF, Groupe d'hydraulique fluviale, 2002, Hydraulique des cours d'eau [en ligne] Disponible sur :<<http://master.cetmef.developpement-durable.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/>> (consulté le 10.06.2008)

Orthophotoplan :

Copyright © Saint-Etienne Métropole / InterAtlas CitiesRevealed, 2002.

Carte géologique :

M. Chenevoy, J.M. Peterlongo, P. Pruvost, J. de Maistre, M. de Montjamont, 1970. Carte géol. France (1/50 000e), Feuille St Etienne. Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans.

Etudes sur l'Onzon réalisées par des bureaux d'études :

- Etude hydraulique du Furan et de ses affluents – SOGREAH, 2001
- Etude hydrologique de l'Onzon – SAFEGE, 2006
- Etude hydraulique « Aménagement des berges, élargissement des ponts » – GEOPLUS, 2007
- Etude hydraulique « Aménagement des berges du secteur du Puits Pointu à la RD1498 » – HTV, 2008.

TABLE DES MATIERES

1.	Introduction	3
2.	Présentation	3
2.1.	La structure d'accueil	3
2.2.	Outils contractuels	4
2.3.	Le site d'étude	5
2.3.1.	Situation	5
2.3.2.	Topographie	5
2.3.3.	Géologie	7
2.3.4.	Occupation des sols	7
2.3.5.	Climatologie	8
3.	Matériels et méthodes	8
3.1.	Inventaire des laisses de crues	9
3.2.	Cartographie de la zone inondée en novembre 2008	11
3.2.1.	Profils 16.1 à 24.7 : Bief du Grand Quartier	11
3.2.2.	Profils 24.9 à 28.5	13
3.2.3.	Profils 29.5 à 34.8	14
3.2.4.	Profils 34.8 à 39.9 : Bief Valjoly	15
3.2.5.	Profils 39.9 à 43	17
3.2.6.	Aval du site d'étude	18
3.2.7.	Conclusion	19
3.3.	Base de données SIG	19
3.4.	Géométrie du modèle	20
3.5.	Données hydrauliques	20
3.5.1.	Hydrologie	21
3.5.2.	Apport hydrologiques intermédiaires	22
3.5.3.	Calcul du débit transitant dans chaque bief	24
3.6.	Conditions limites	25
3.7.	Coefficient de rugosité	25
3.8.	Modèle hydraulique	26
3.8.1.	Calcul du débit de pointe de la crue 2008	26
3.8.2.	Calage de la ligne d'eau	27
3.9.	Débordements résiduels pour la crue centennale future	27
3.10.	Carte des risques	28
4.	Résultats	28
4.1.	Modélisation hydraulique de la crue 2008	28
4.1.1.	Estimation du débit de pointe	28
4.1.2.	Comportement hydraulique des ouvrages	30
4.1.3.	Calcul du débit transitant dans chaque bief	30
4.1.4.	Calage du modèle	34
4.1.5.	Synthèse	34
4.2.	Modélisation de la crue centennale future	34
4.2.1.	Profils 16.1 à 24.7 : Bief du Grand Quartier	34
4.2.2.	Profils 24.9 à 28.5	35
4.2.3.	Profils 29.5 à 34.8	35
4.2.4.	Profils 34.8 à 39.9 : Bief du Valjoly	35
4.2.5.	Profils 39.9 à 43	36

4.2.6.	Aval du site d'étude	36
4.2.7.	Synthèse	36
4.3.	Modélisation des seuils de débordements	37
4.3.1.	Débordements apparaissant pour un débit inférieur à $Q_{10 \text{ futur}}$	37
4.3.2.	Débordements supplémentaires apparaissant pour un débit inférieur à $Q_{30 \text{ futur}}$	37
4.3.3.	Débordements supplémentaires apparaissant pour un débit inférieur à $Q_{50 \text{ futur}}$	38
4.3.4.	Débordements supplémentaires apparaissant pour un débit inférieur à $Q_{100 \text{ futur}}$	38
4.4.	Synthèse : création d'une carte de risques	39
5.	Discussion	42
5.1.	Suppression du bief de la rue du Puits Pointu	43
5.2.	Suppression du bief Valjoly	44
5.2.1.	Modélisation hydraulique de l'effacement du pont 36	44
5.2.2.	Détail des travaux	46
5.3.	Suppression de l'inondation au profil 33.7	48
5.4.	Suppression de l'inondation entre les profils 30.9 et 33.1	49
6.	Conclusion	50

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Plan de situation (fond de carte Scan 25 issu de l' IGN)	6
Figure 2 : Carte de l'occupation du sol du site d'étude (source : orthophoto de l'agglomération stéphanoise, 2003)	7
Figure 3 : Photographie des marquages de laisses au lendemain de la crue de novembre 2008.....	9
Figure 4 : profil en long schématisant la surélévation de la ligne d'eau due à un obstacle.....	10
Figure 5 : profil en travers schématisant la surélévation de la ligne d'eau due à un coude (CETMEF, 2002).....	10
Figure 6 : Lit perché de l'Onzon au profil 17.6	11
Figure 7 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 16.1 et 24.7	12
Figure 8 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 24.9 et 28.5	13
Figure 9 : Photo de la rupture de digue qui s'est produite en rive droite au profil 30.8	14
Figure 10 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 29.5 et 34.8	15
Figure 11 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 34.8 et 40.3	16
Figure 12 : Chenal d'écoulement en crue dissocié du lit mineur au profil 37.2.....	17
Figure 13 : Photographie du pont de la rue du Puits Pointu.....	17
Figure 14 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 39.9 et 43	18
Figure 15 : Cartographie de la crue 2008 entre les profils 16.1 et 23.5	20
Figure 16 : Schéma de principe de l'accumulation des flux	22
Figure 17 : Vue amont du pont rue de l'Entente	27
Figure 18 : Photographie du pont profil 36.5.....	29
Figure 19 : Profil en long de la ligne d'eau (débit cinquantennal) au droit du pont de l'Entente	29
Figure 20 : Profil de la ligne d'eau lors du calage du pont du Banc	31
Figure 21 : Profil de la ligne d'eau en amont de l'ovoïde du lotissement du Grand Quartier	31
Figure 22 : Profil spécifique créé pour le calcul du débit surversant au droit du pont désaffecté	32
Figure 23 : Schéma de répartition des débits	33
Figure 24 : Cartographie des risques des débordements (plan amont).....	40
Figure 25 : Cartographie des risques des débordements (plan aval)	41
Figure 26 : Schéma d'élargissement de la section d'écoulement avec aménagements en génie végétal	42
Figure 27 : Cartographie des écoulements pour Qcrue 2008 en supprimant le pont désaffecté.....	46

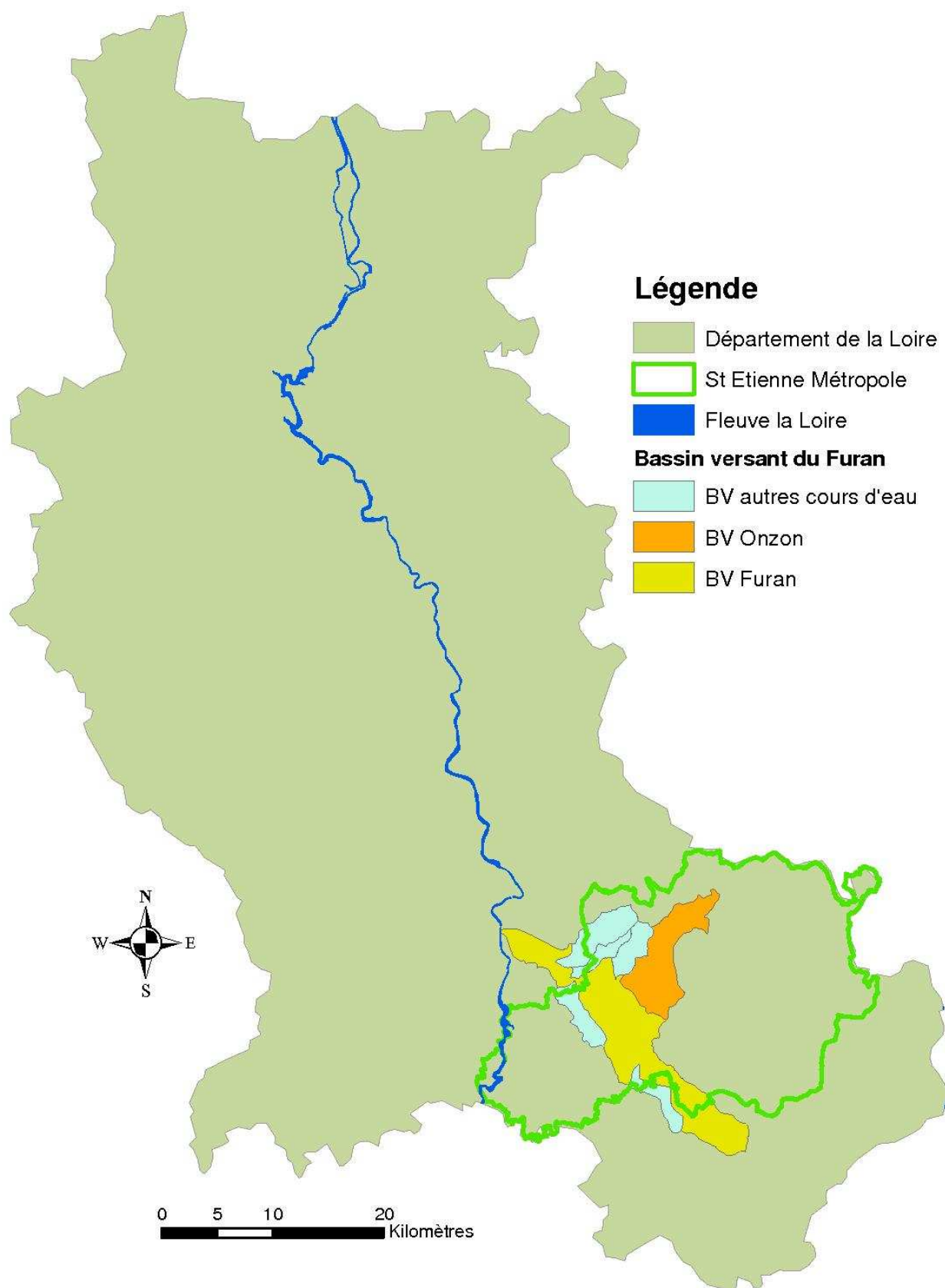
LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : débits actuels avant création du barrage	21
Tableau 2 : débits futurs après création du barrage	21
Tableau 3 : Répartition des débits actuels en crue à l'intérieur du site d'étude	24
Tableau 4 : Répartition des débits futurs en crue à l'intérieur du site d'étude	24
Tableau 5 : Débits maxima en amont des ponts avant mise en charge et débordements.....	30
Tableau 6 : Coût des travaux nécessaires à la suppression du bief de la rue du Puits Pointu	44
Tableau 7 : Coût des travaux nécessaires à la suppression du pont désaffecté et l'élargissement de la section d'écoulement en aval.	47
Tableau 8 : Coût des travaux nécessaires à l'élargissement de 3 sections limitantes.....	47
Tableau 9 : Coût des travaux nécessaires à l'optimisation du champ d'expansion de crue.	48
Tableau 10 : Coût des travaux nécessaires au remplacement du pont de l'entreprise Sogran Lotrans.....	49

LISTE DES ANNEXES

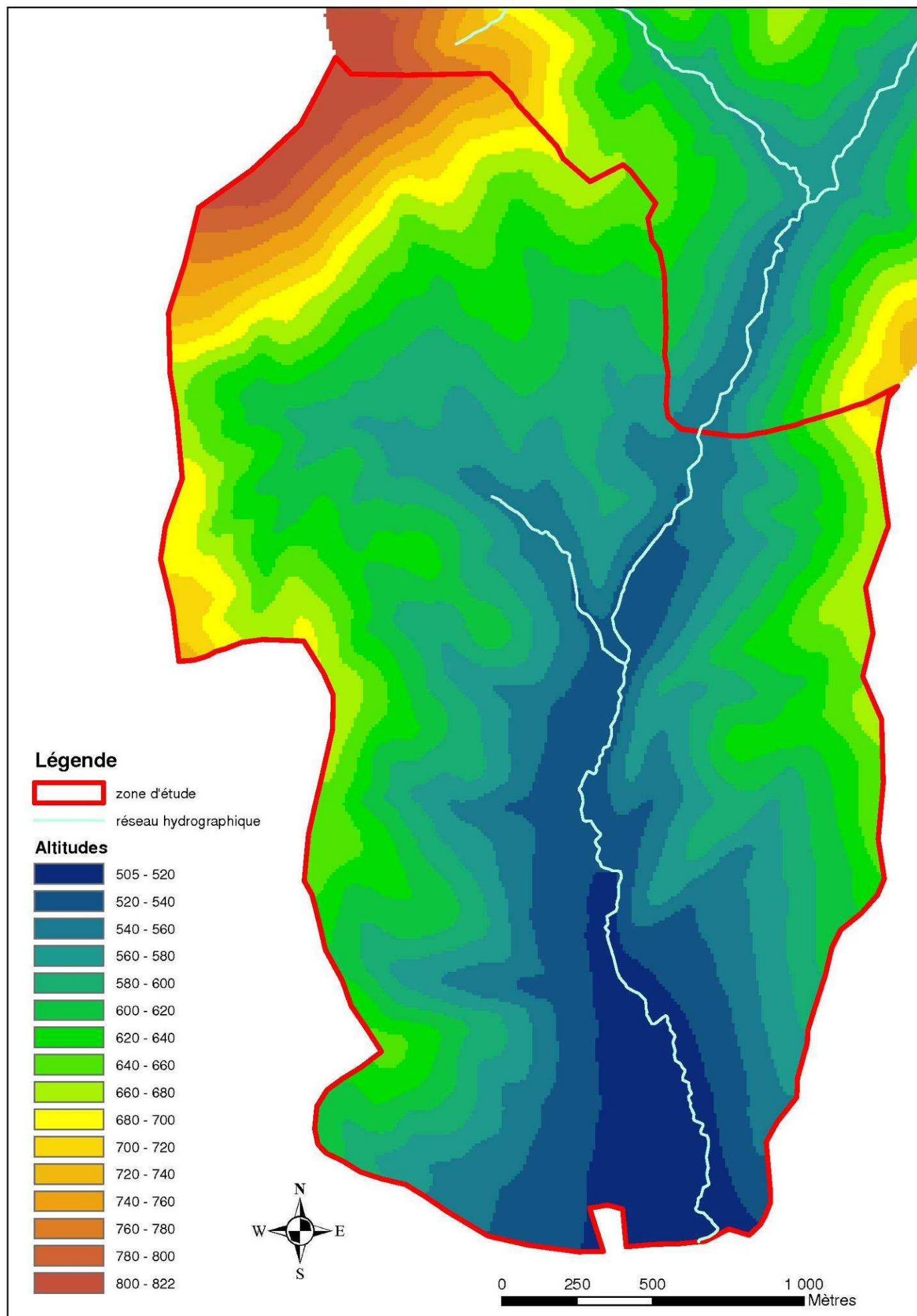
Annexe I :	Carte de situation du bassin versant de l'Onzon
Annexe II :	Carte des altitudes
Annexe III :	Carte des pentes
Annexe IV :	Carte géologique
Annexe V :	Carte de la zone inondée lors de la crue de novembre 2008
Annexe VI :	Carte des sous bassins et du réseau hydrographique créé par le MNT
Annexe VII :	Profil en long de la ligne d'eau de la crue de novembre 2008
Annexe VIII :	Carte des débordements résiduels lors de la crue centennale future
Annexe IX :	Plan de situation des travaux
Annexe X :	Etat projet du profil 43 au profil 40.5 (profils en travers et profil en long)
Annexe XI :	Etat projet du profil 38.5 au profil 34.6 (profils en travers et profil en long)

ANNEXE I : CARTE DE SITUATION
DU BASSIN VERSANT DE
L'ONZON



ANNEXE II : CARTE DES ALTITUDES

Source : MNT maille 10m



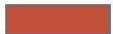
ANNEXE III : CARTE DES PENTES

Source : MNT maille 10m

Légende

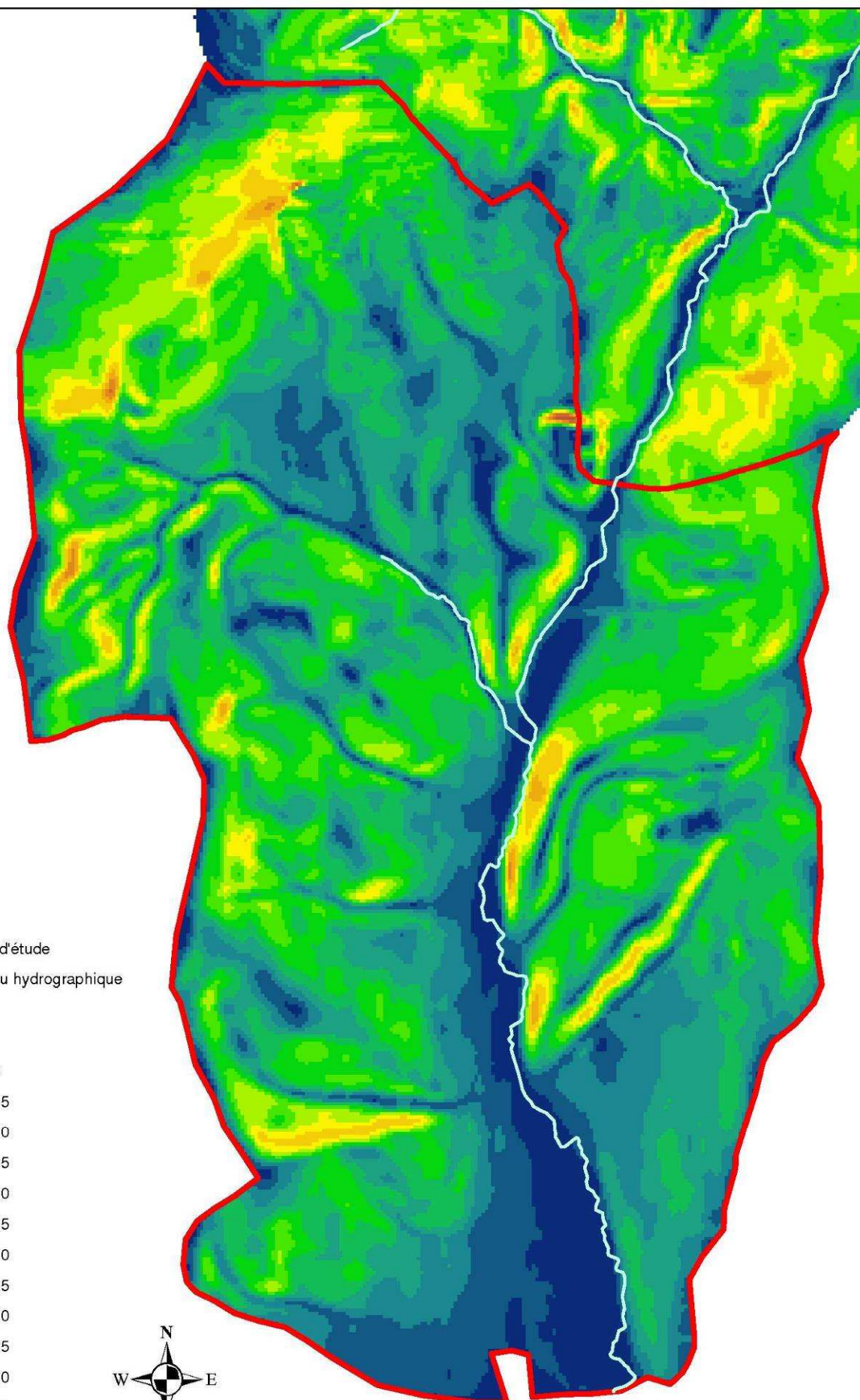
-  zone d'étude
 réseau hydrographique

pente en %

- | | |
|---|---------|
|  | 0 - 5 |
|  | 5 - 10 |
|  | 10 - 15 |
|  | 15 - 20 |
|  | 20 - 25 |
|  | 25 - 30 |
|  | 30 - 35 |
|  | 35 - 40 |
|  | 40 - 45 |
|  | 45 - 50 |
|  | 50 - 55 |
|  | 55 - 60 |
|  | 60 - 65 |
|  | 65 - 70 |



0 250 500 1 000 Mètres

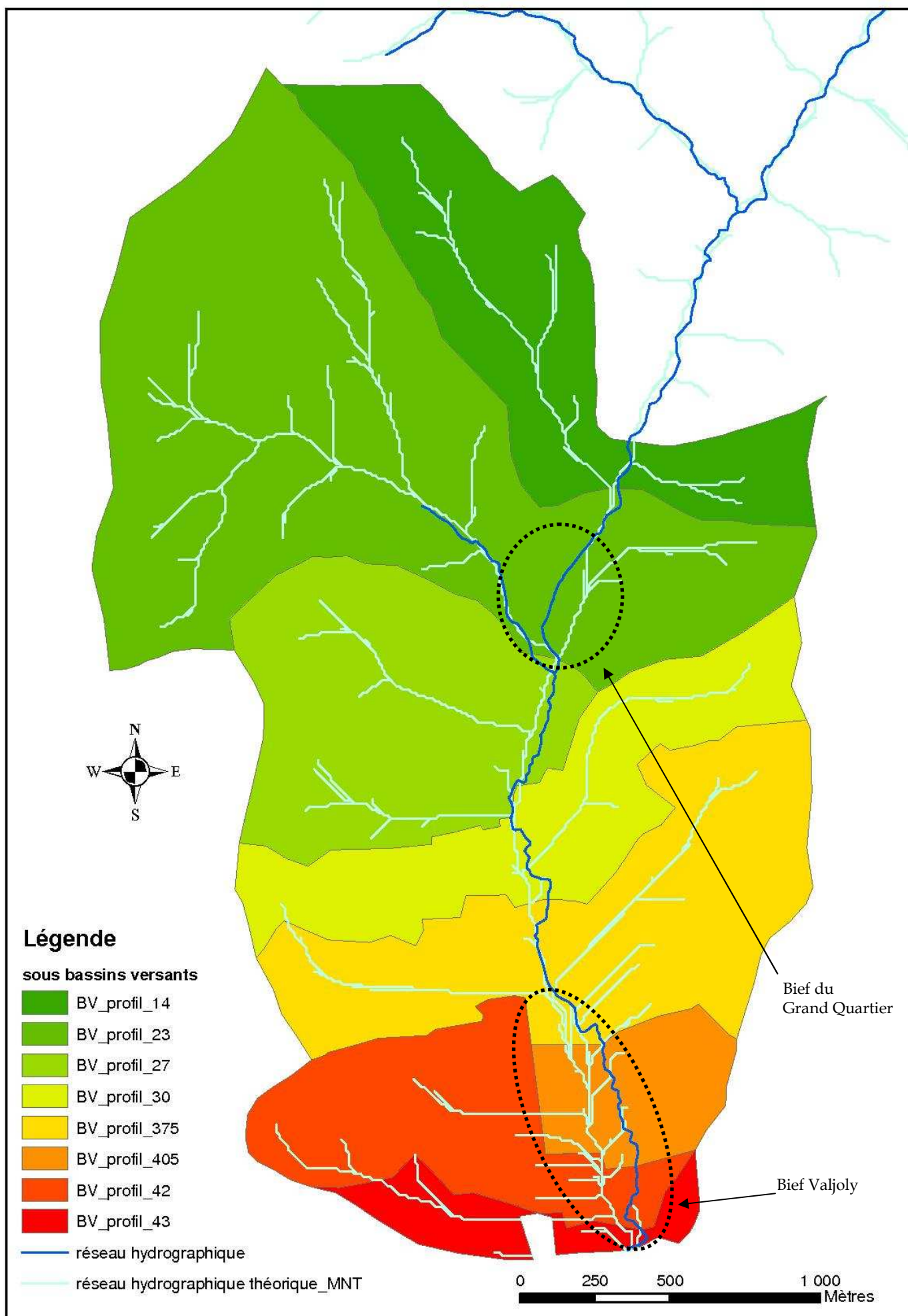


ANNEXE IV : CARTE GEOLOGIQUE

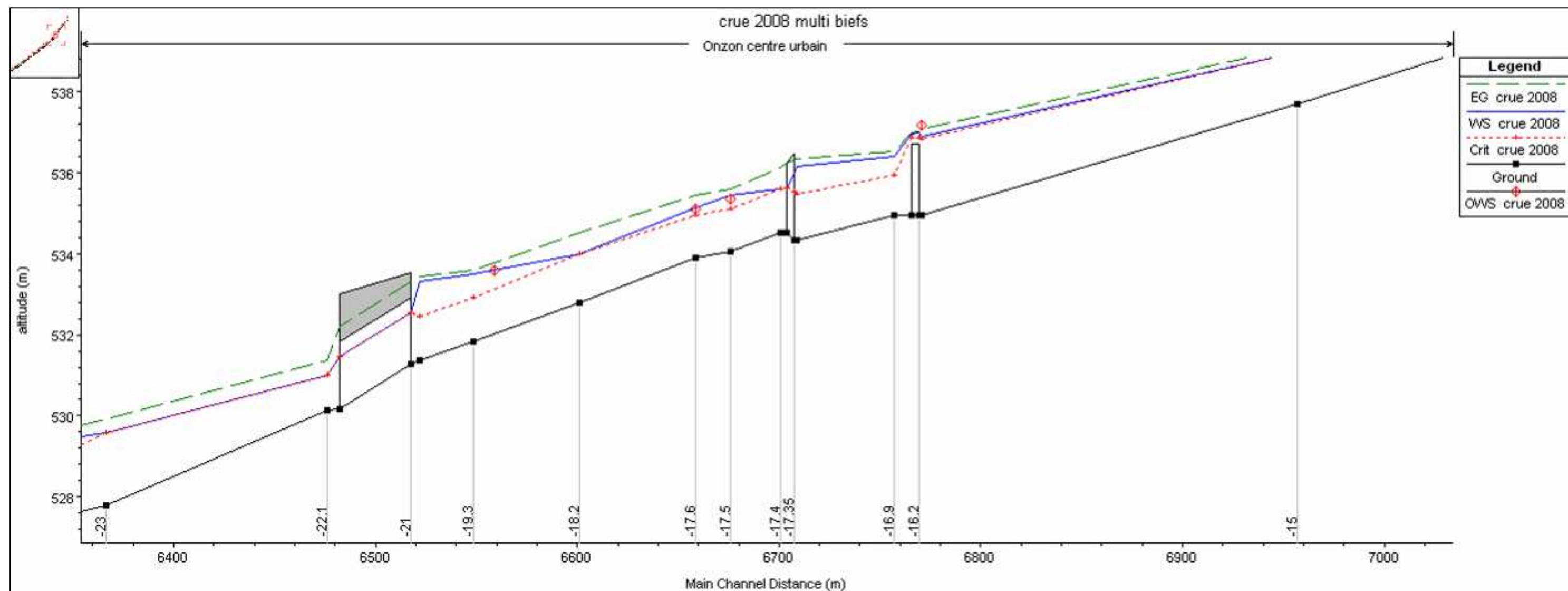
ANNEXE V : CARTE DE LA ZONE
INONDEE LORS DE LA CRUE DE
NOVEMBRE 2008

ANNEXE VI : CARTE DES SOUS- BASSINS ET DU RESEAU HYDROGRAPHIQUE THEORIQUE CREE A PARTIR DU MNT

Source : MNT maille 10 m

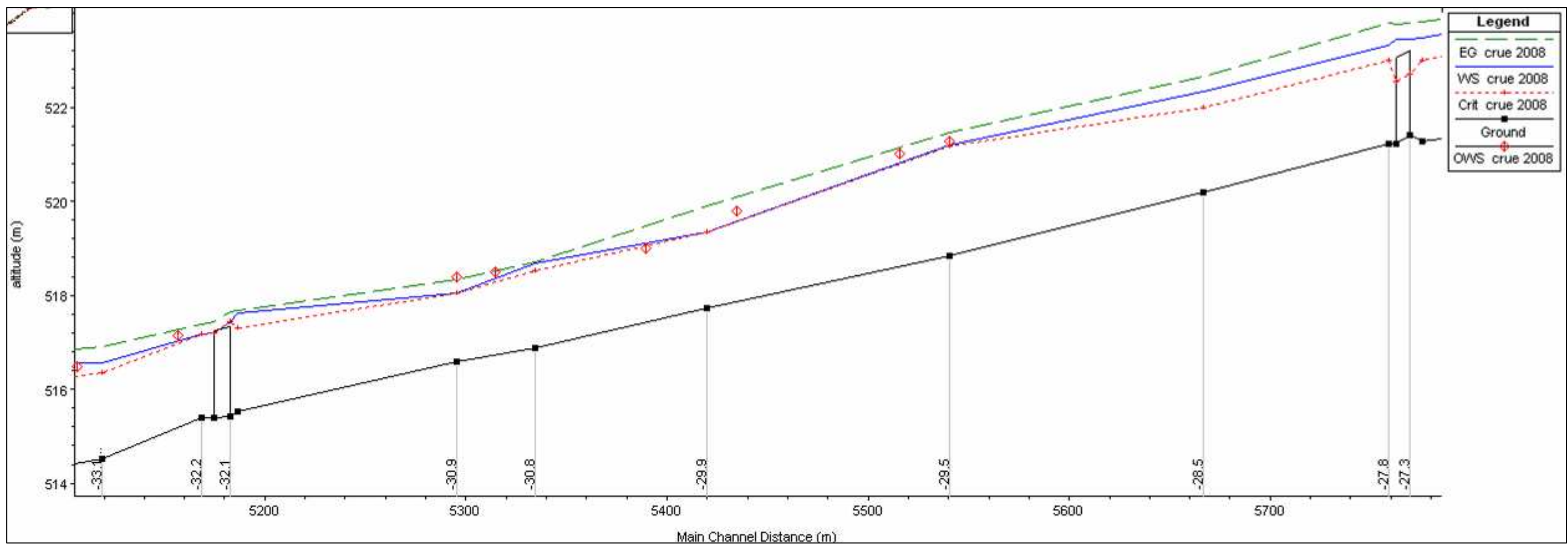
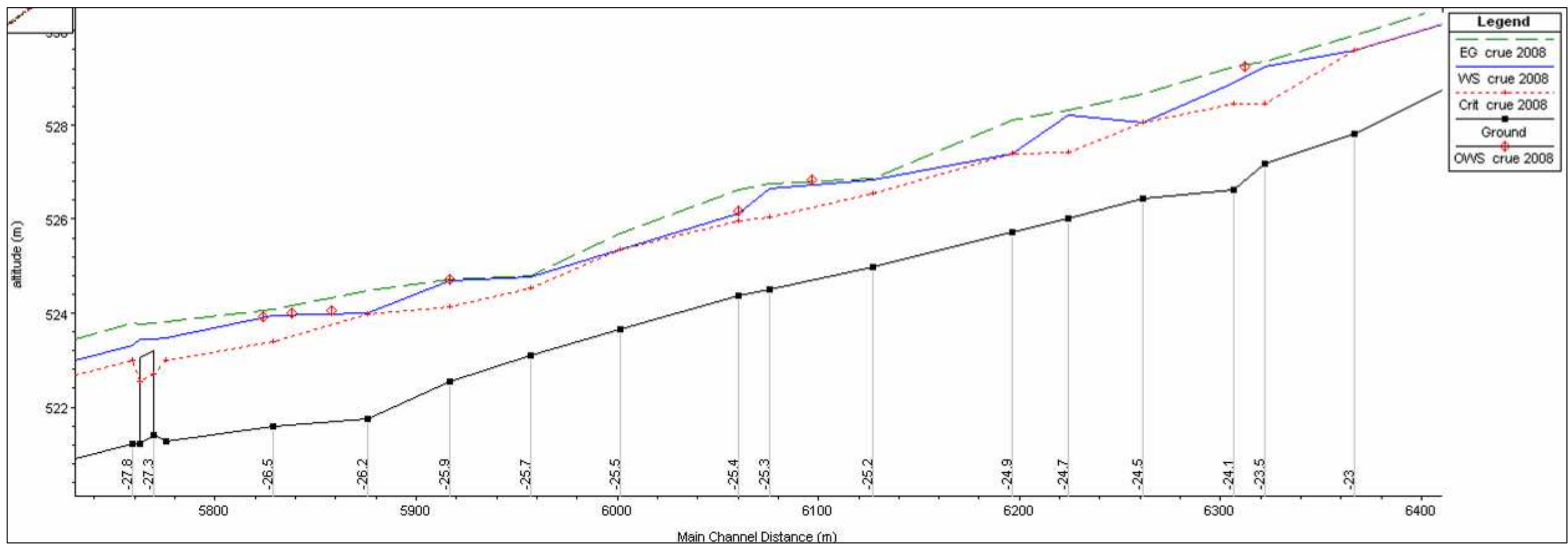


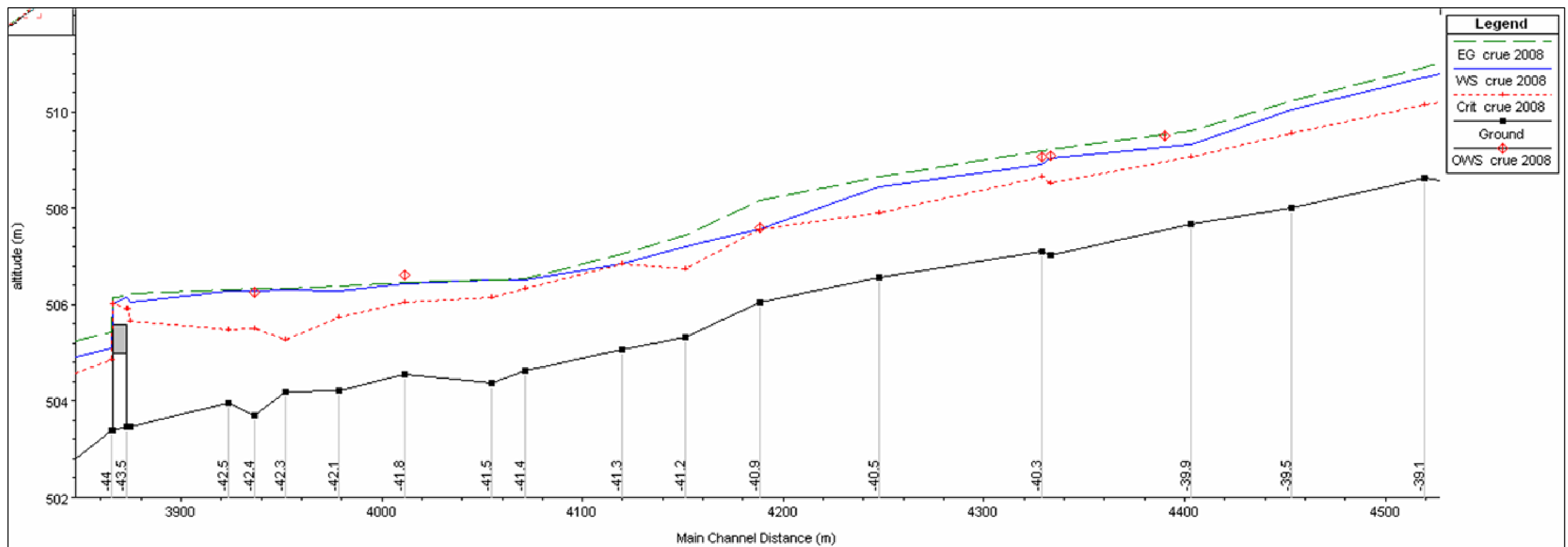
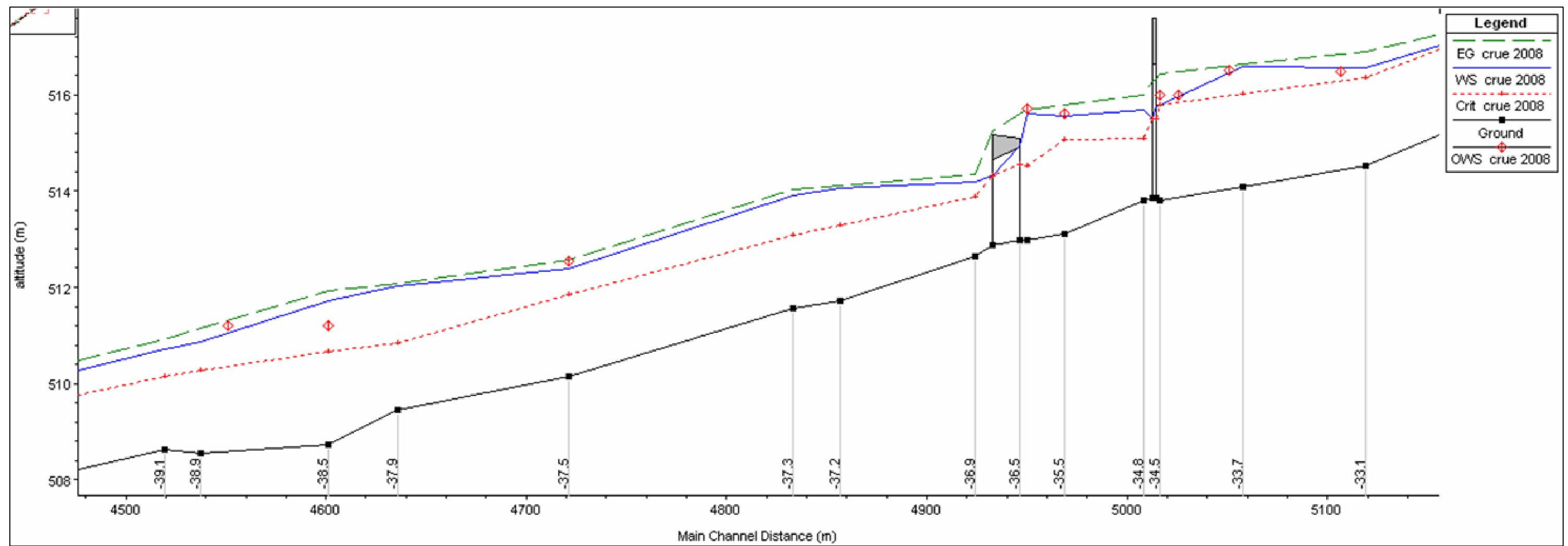
ANNEXE VII : PROFIL EN LONG DE
LA LIGNE D'EAU MODELISEE DE LA
CRUE DE NOVEMBRE 2008



Légende

- Ligne de charge
- Niveau d'eau
- ... Ligne d'eau critique
- Fond du cours d'eau



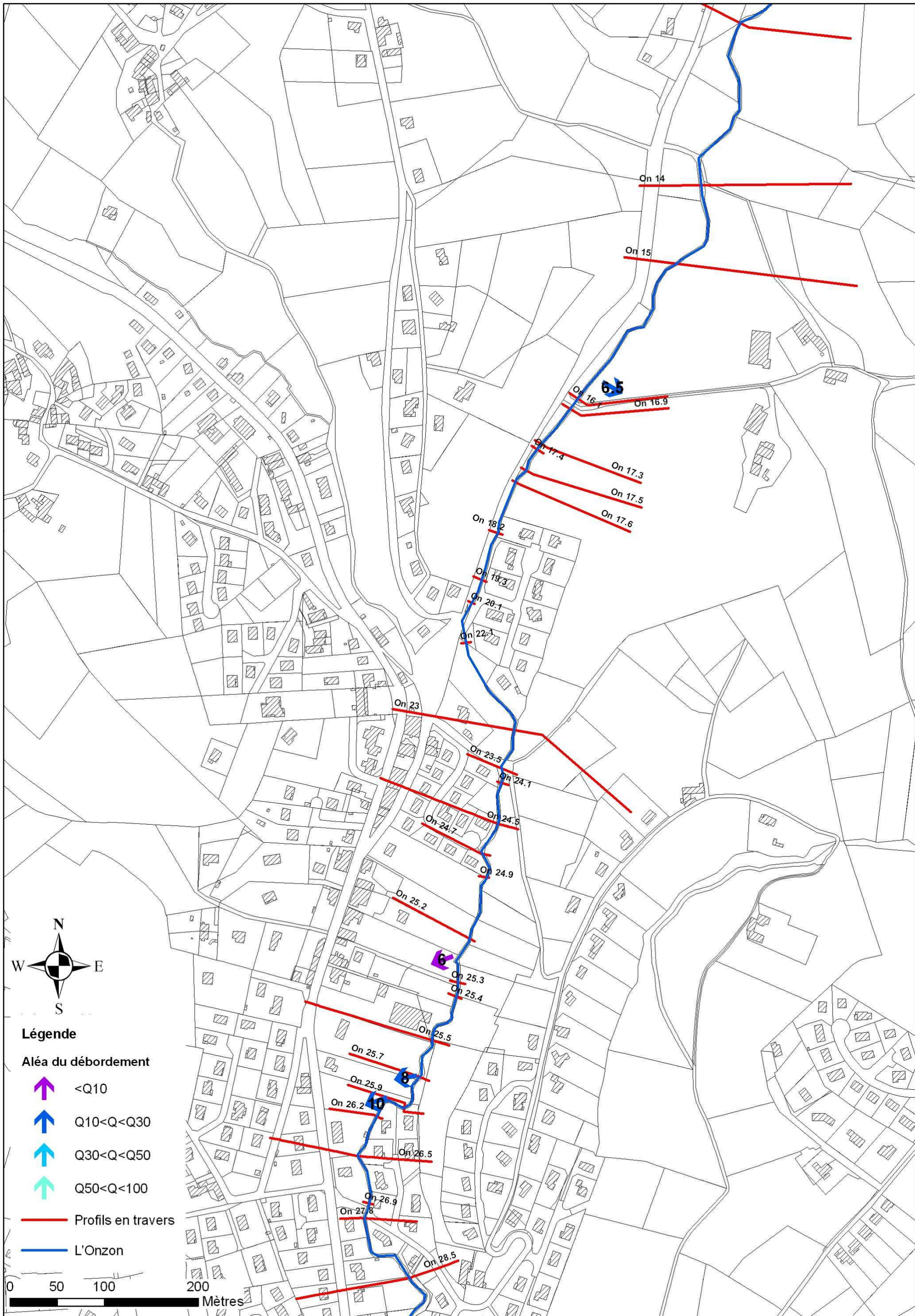


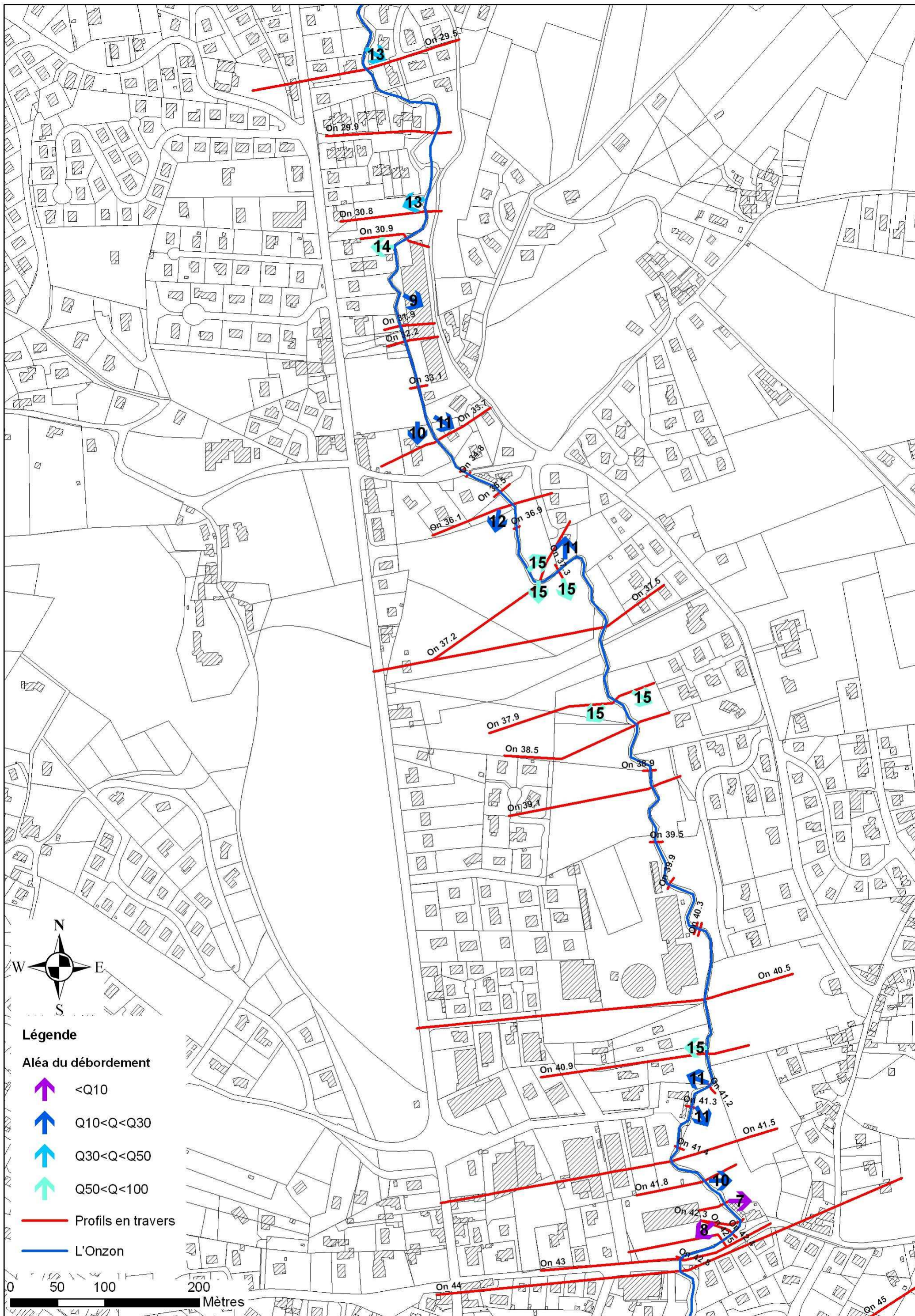
ANNEXE VIII : CARTE DES DEBORDEMENTS RESIDUELS LORS DE LA CRUE CENTENNALE FUTURE

Source : Fond de carte cadastral

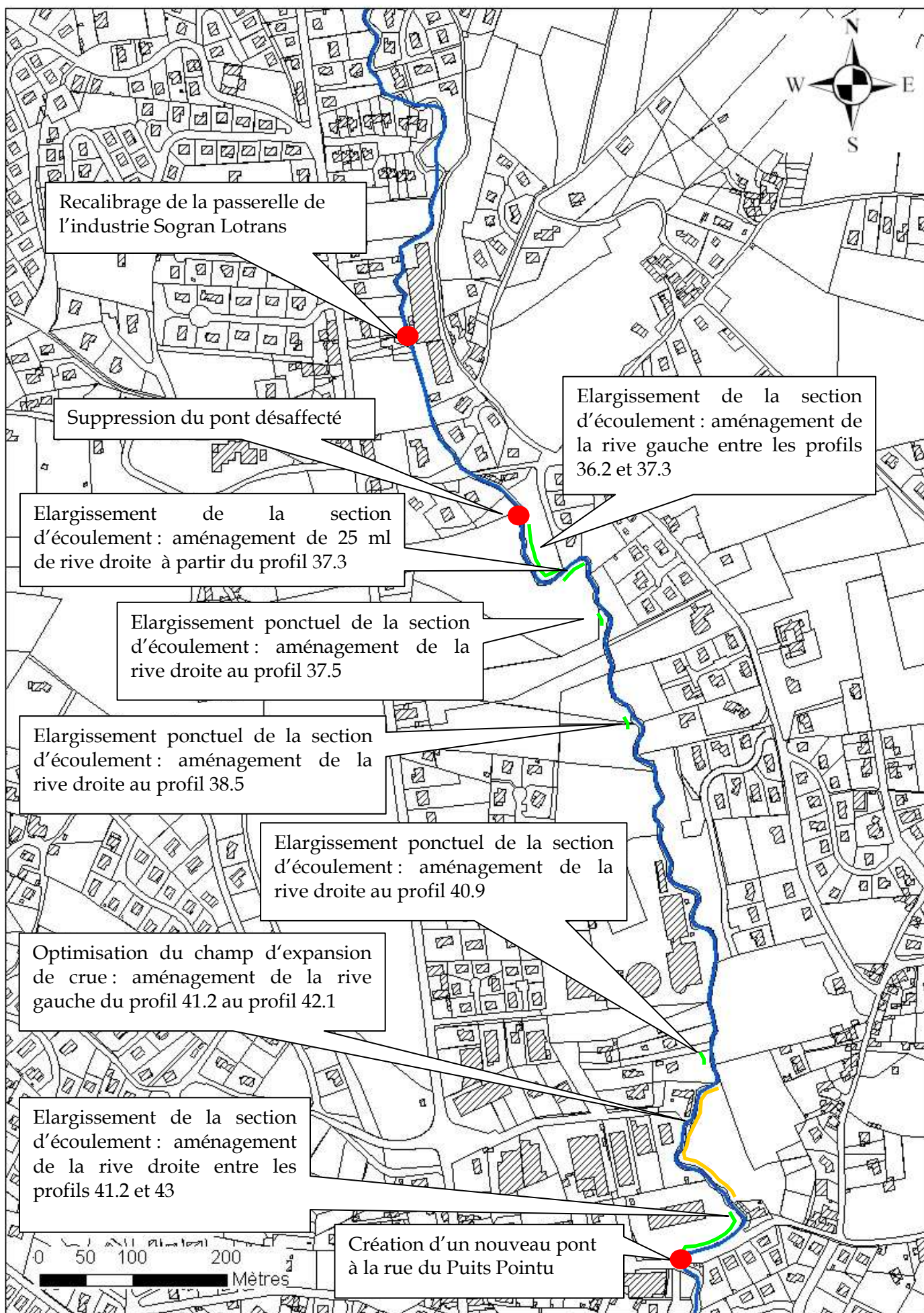
Plan partie amont

Plan partie aval





ANNEXE IX : PLAN DE SITUATION DES TRAVAUX

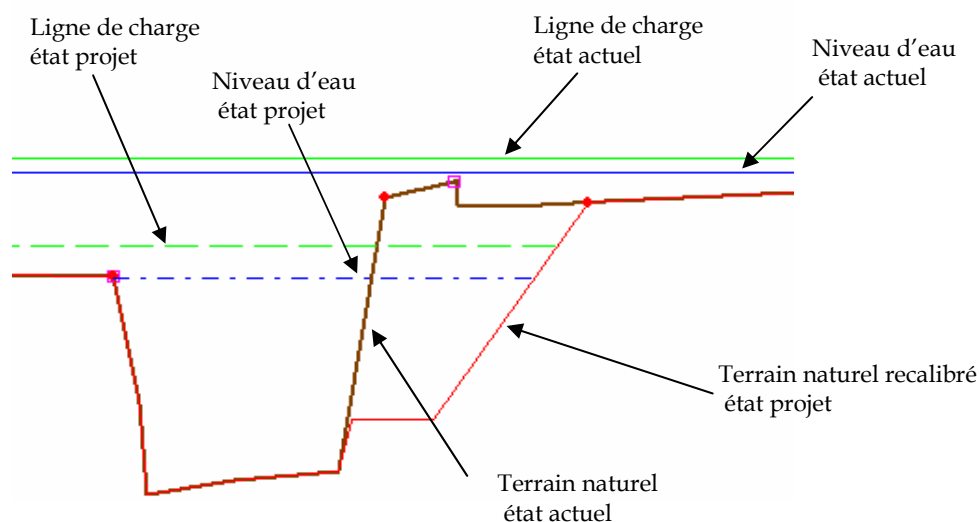


ANNEXE X : ETAT PROJET DU PROFIL 43 AU PROFIL 40.5

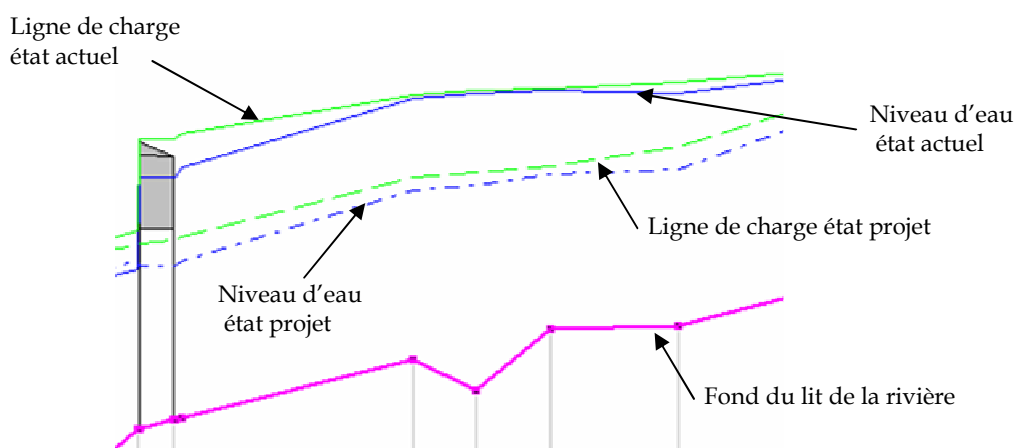
Cette annexe concerne les simulations de la crue centennale future entre la géométrie actuelle (état actuel) et la géométrie future (état projet).

Elle contient les profils en travers et le profils en long avec les 2 lignes d'eau obtenues.

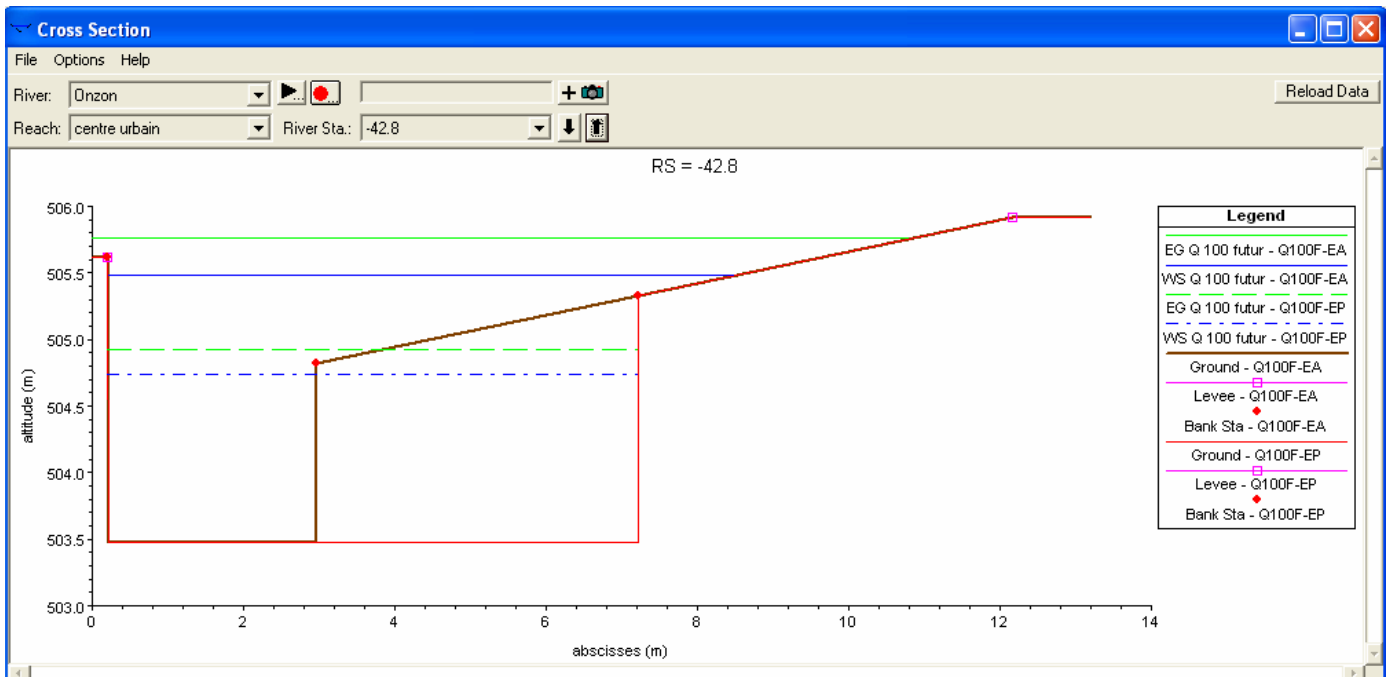
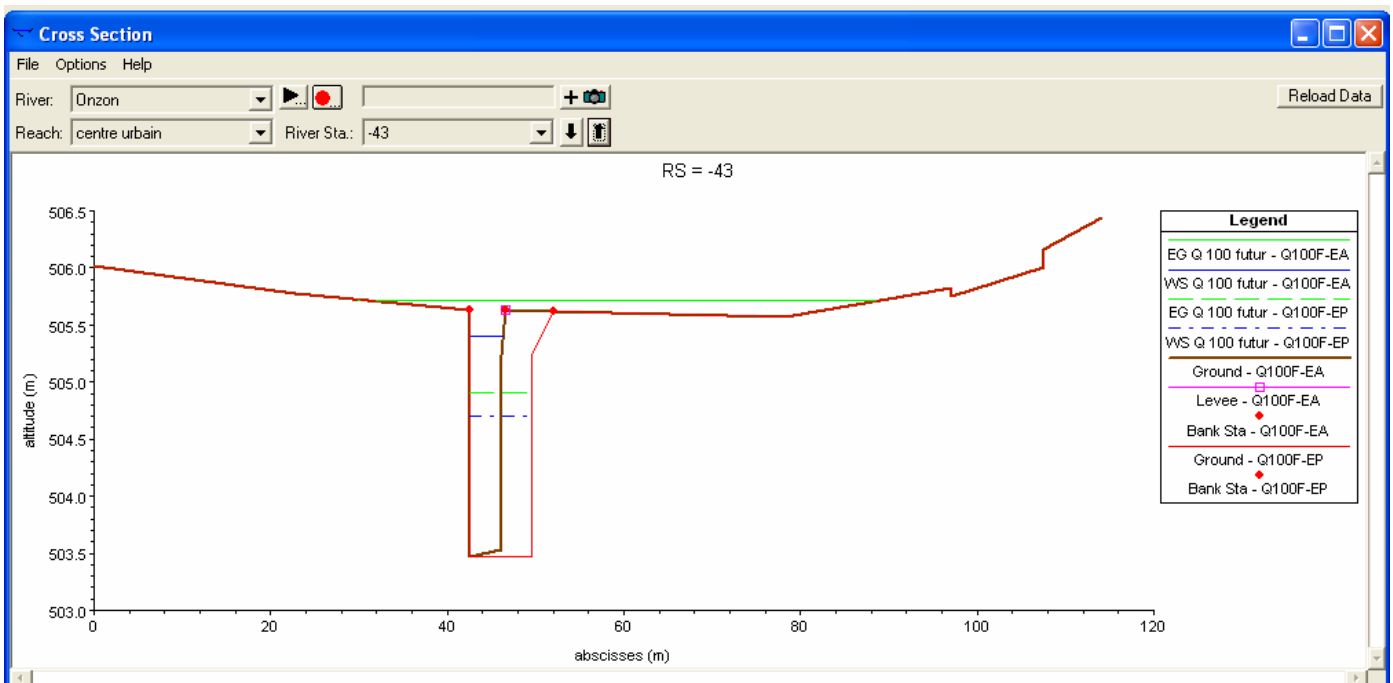
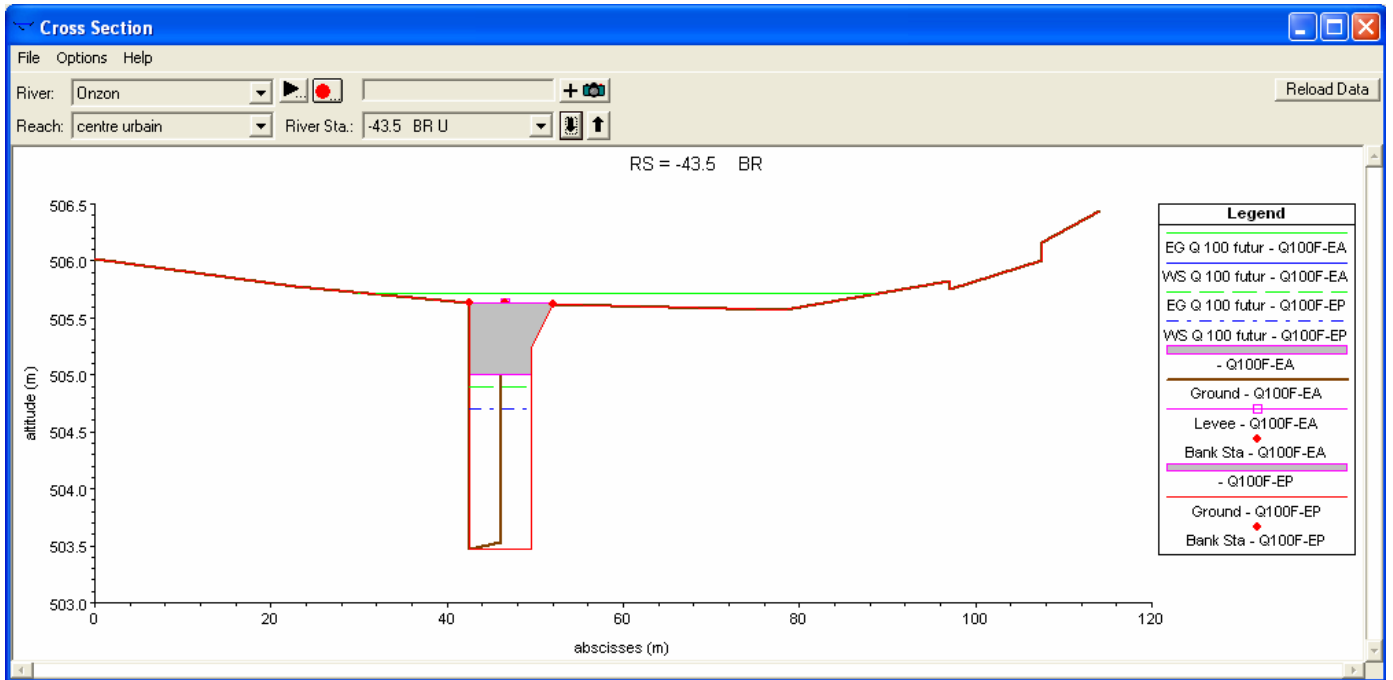
La légende des annexes X et XI concernant les profils en travers est la suivante :

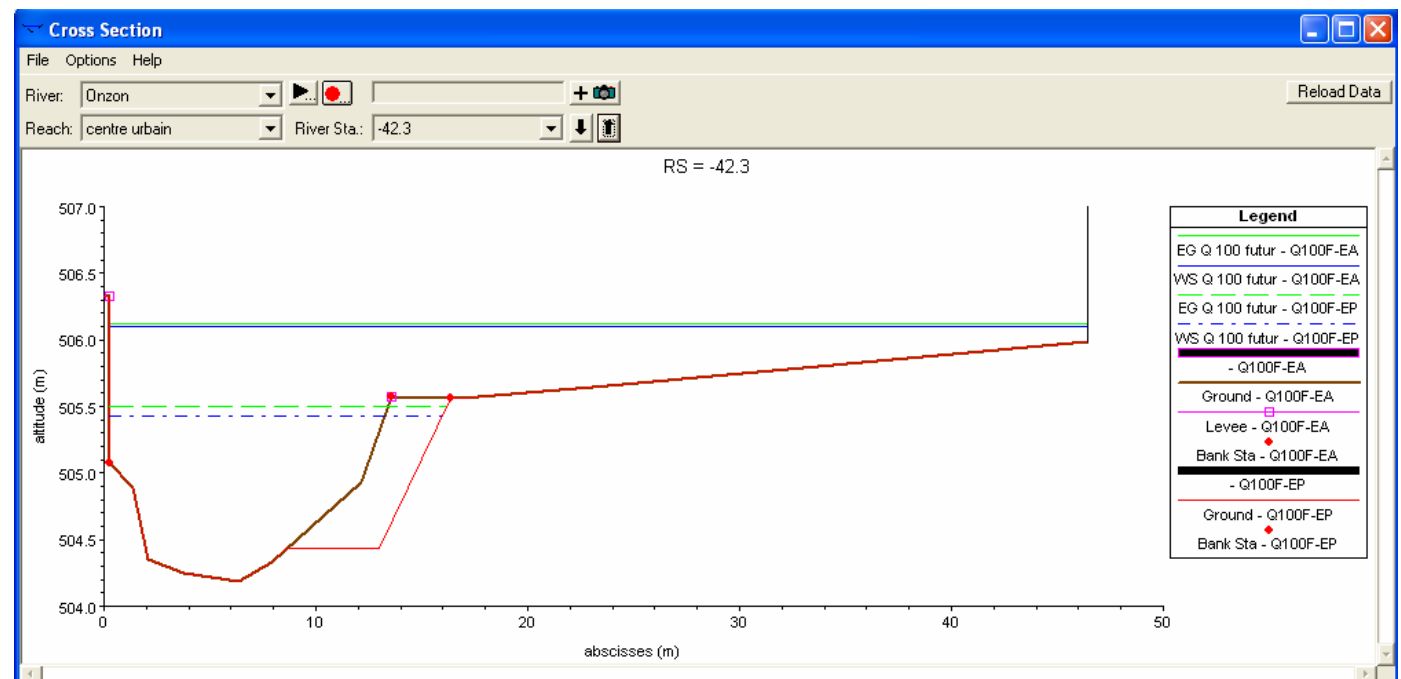
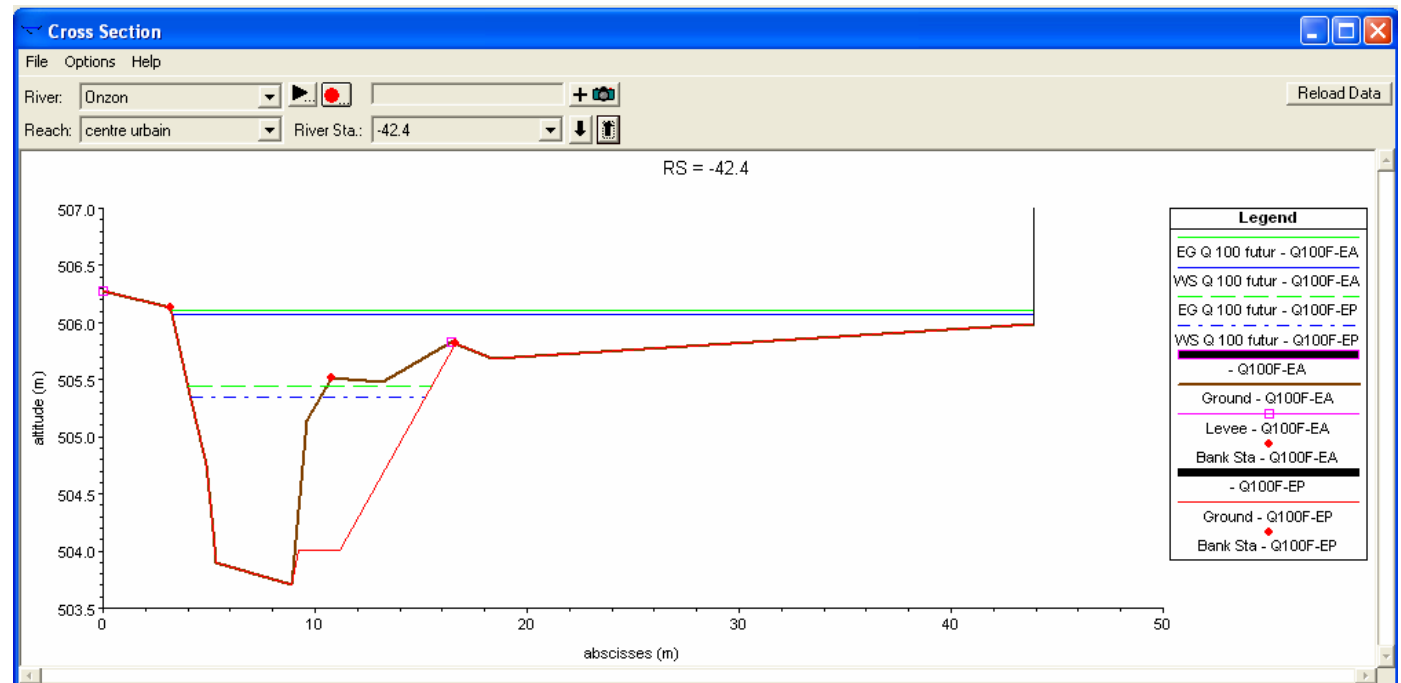
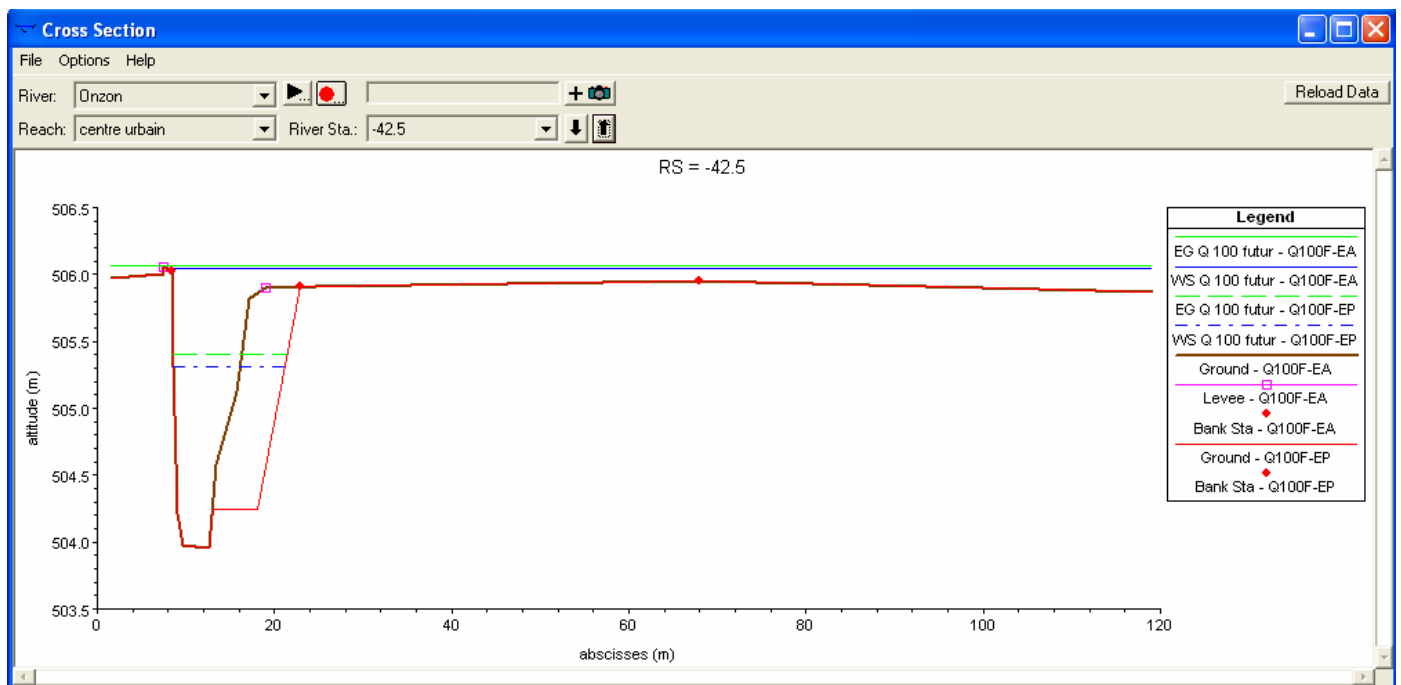


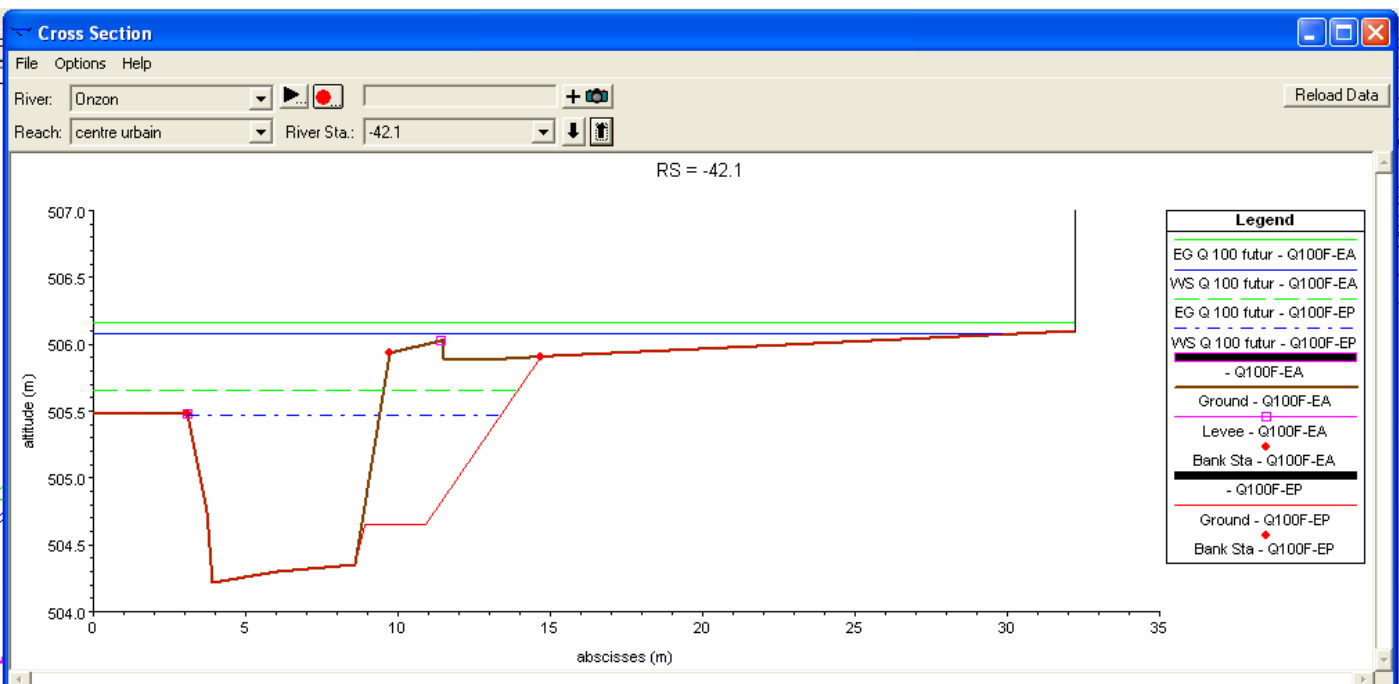
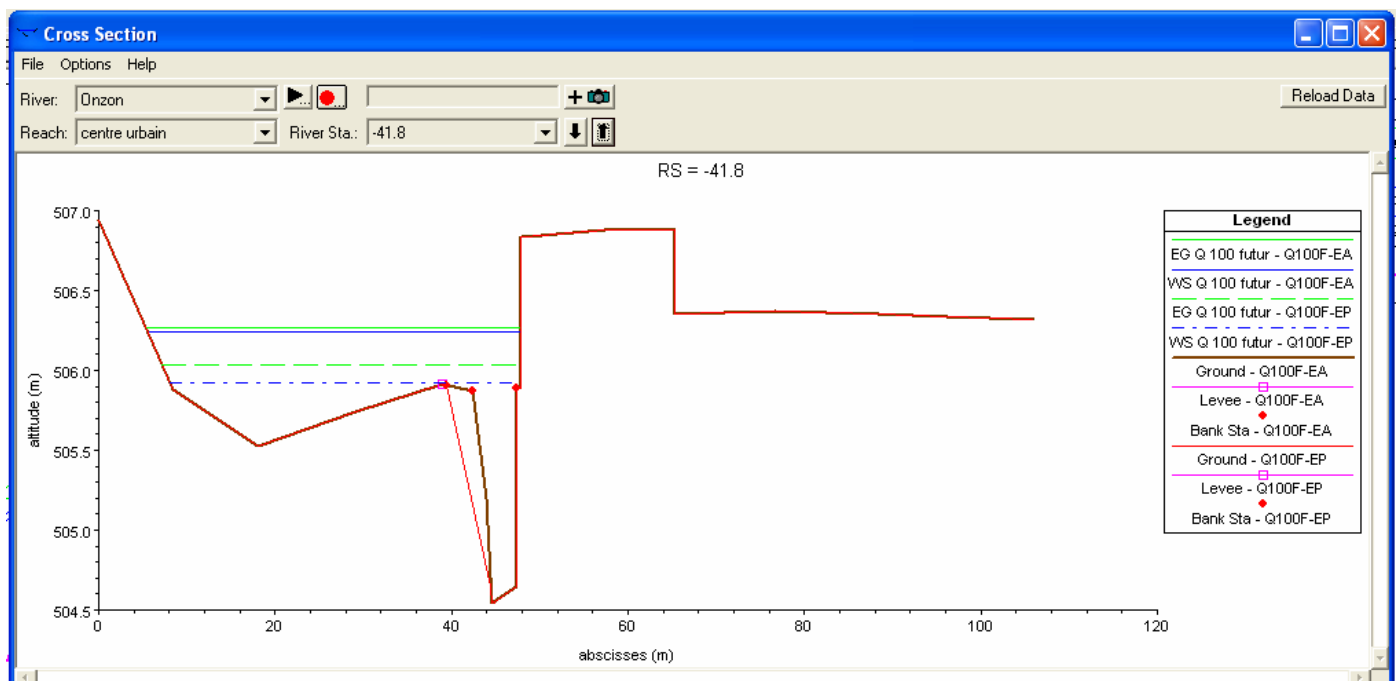
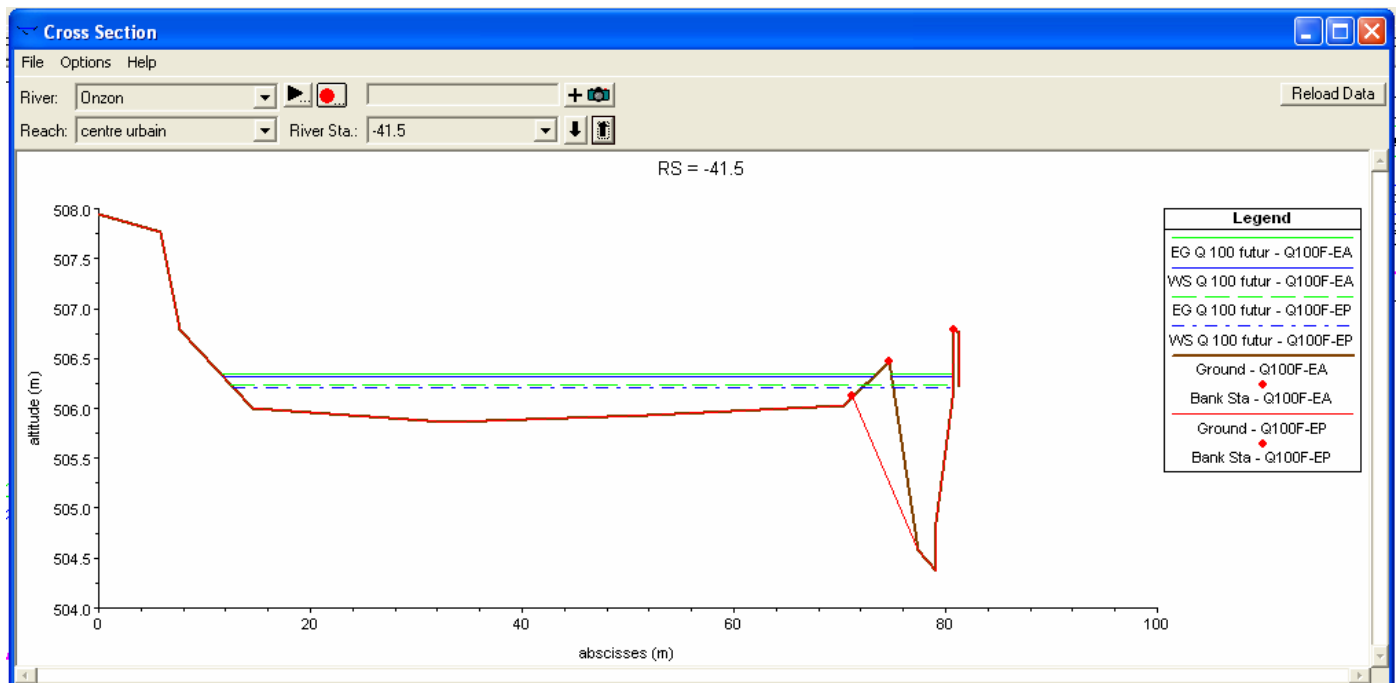
La légende des annexes X et XI concernant les profils en long est la suivante

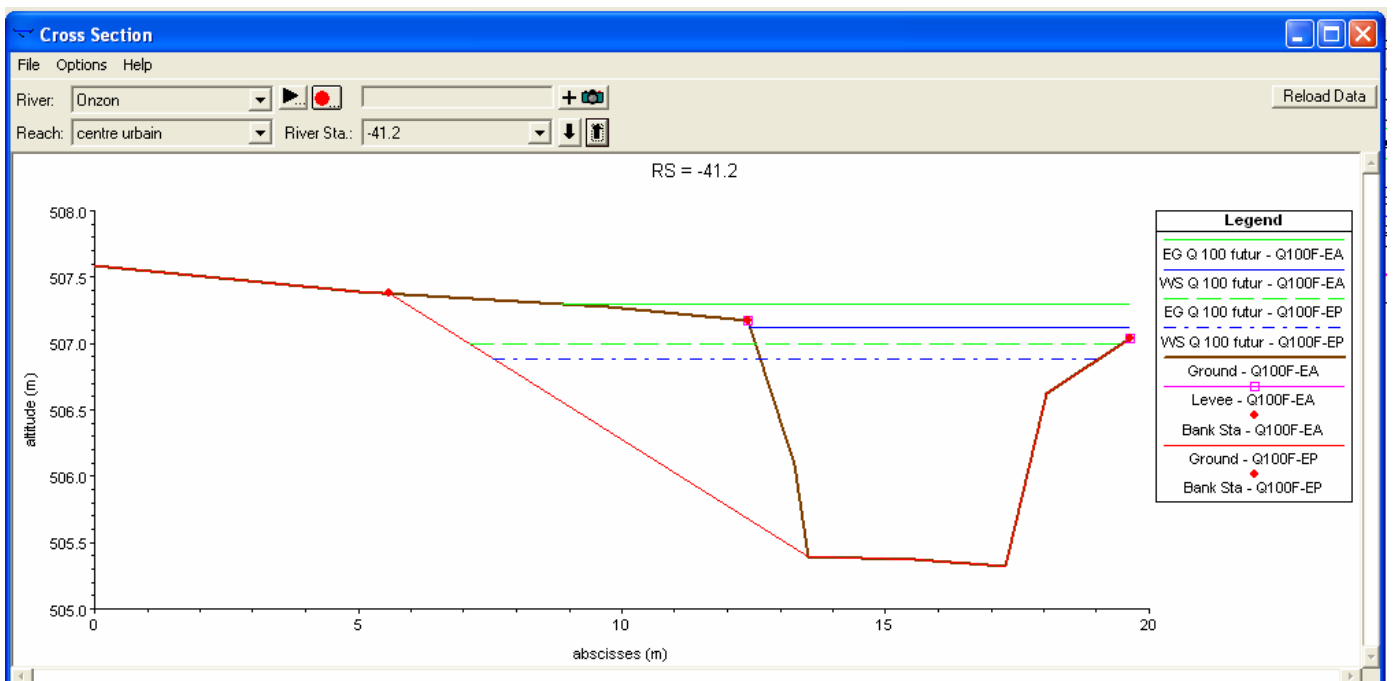
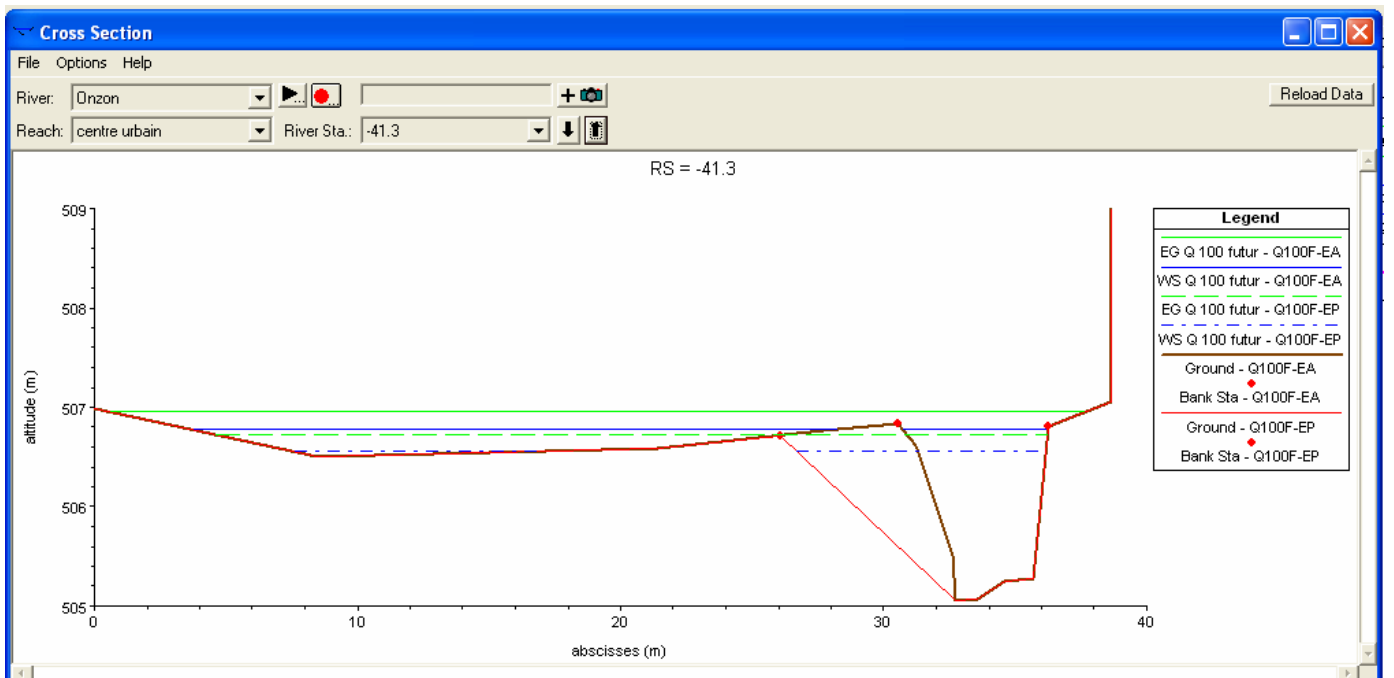
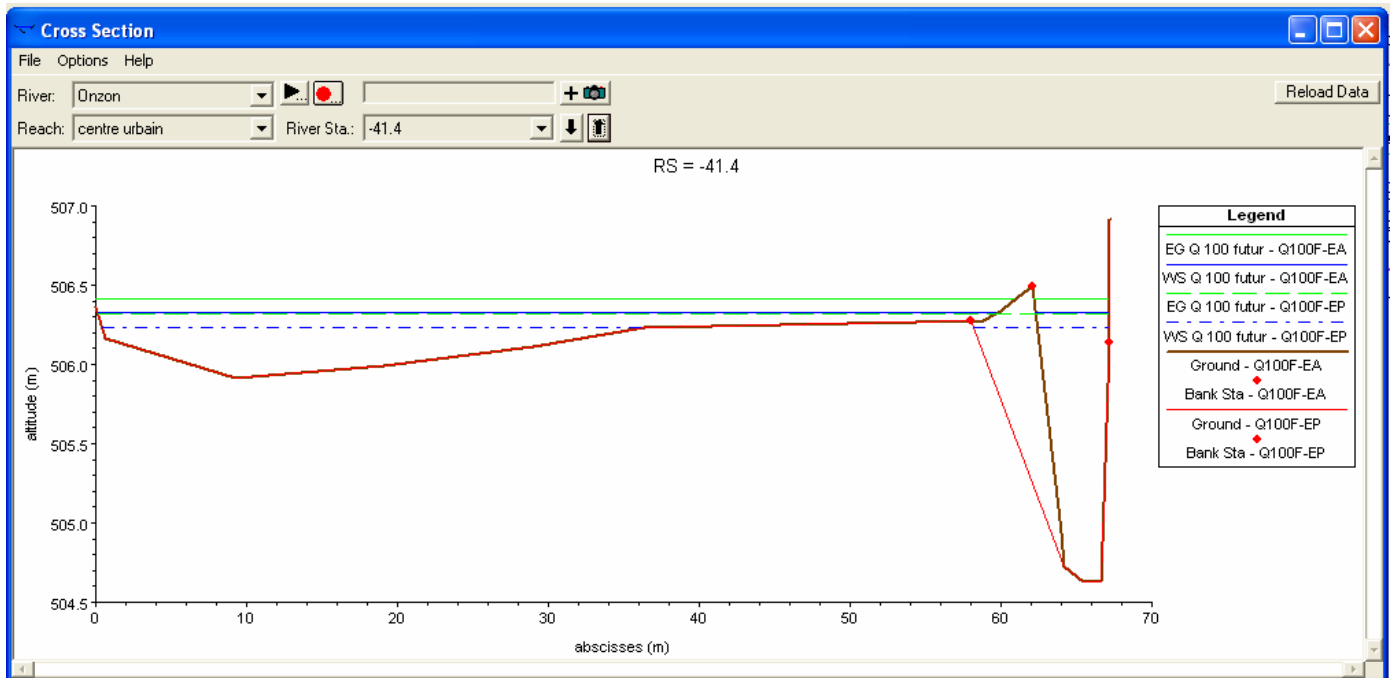


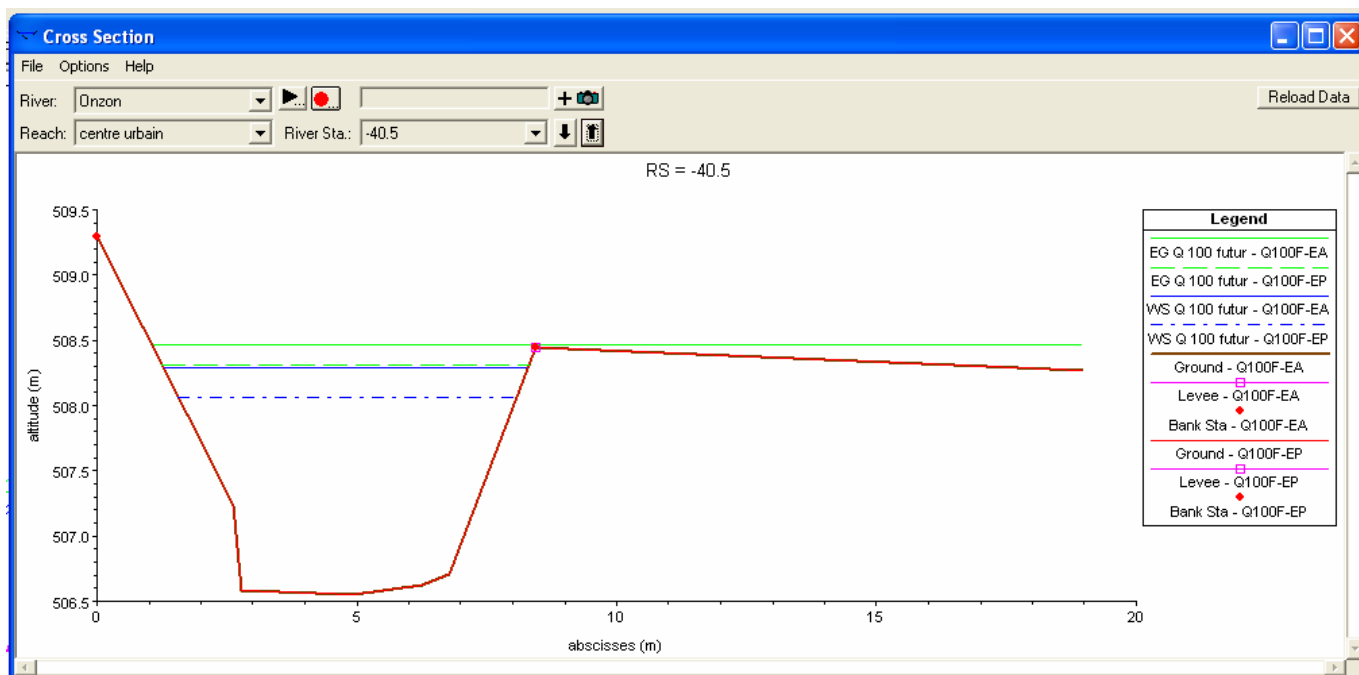
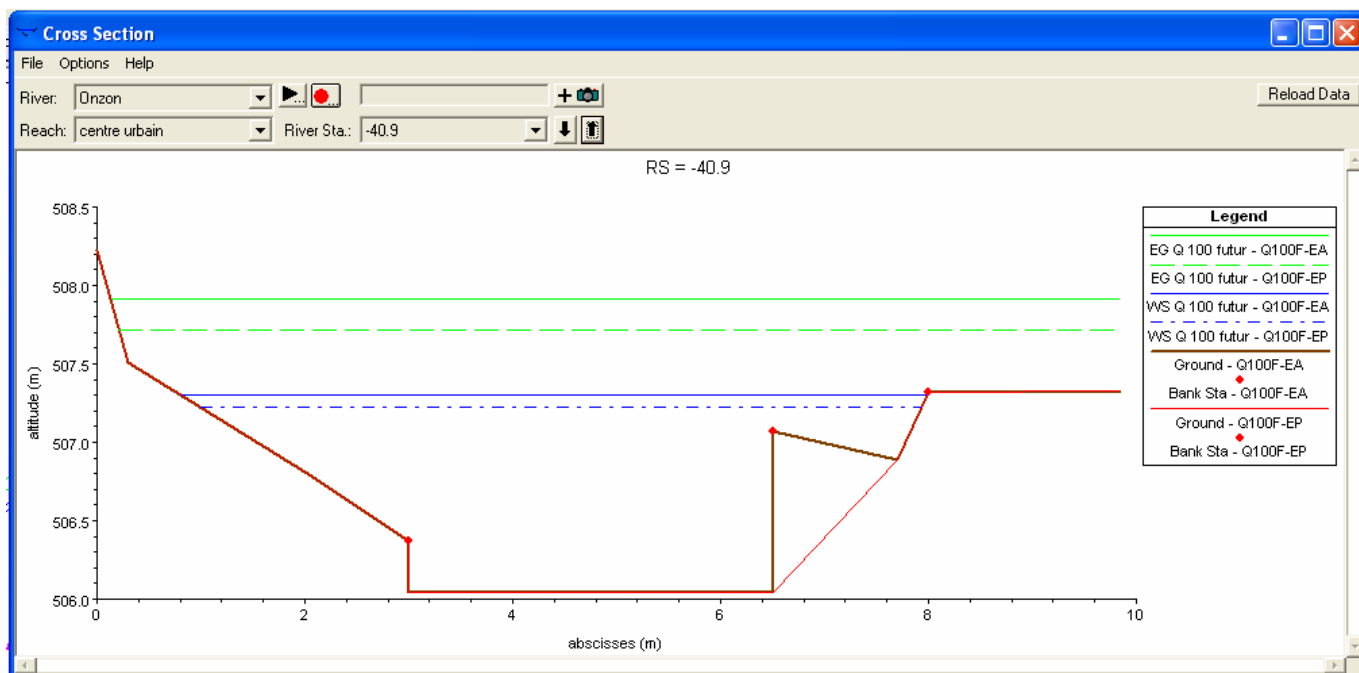
Profil en travers



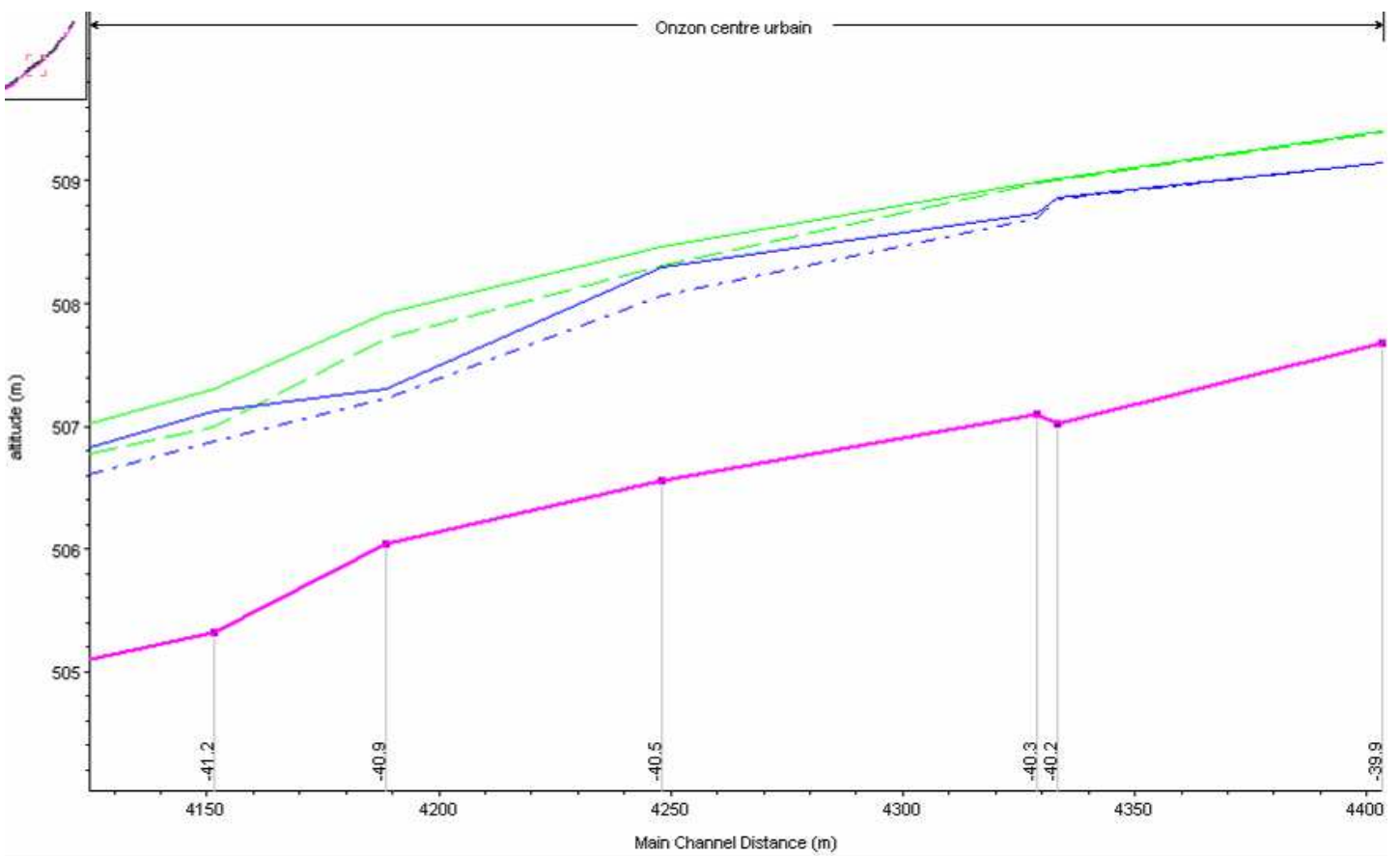
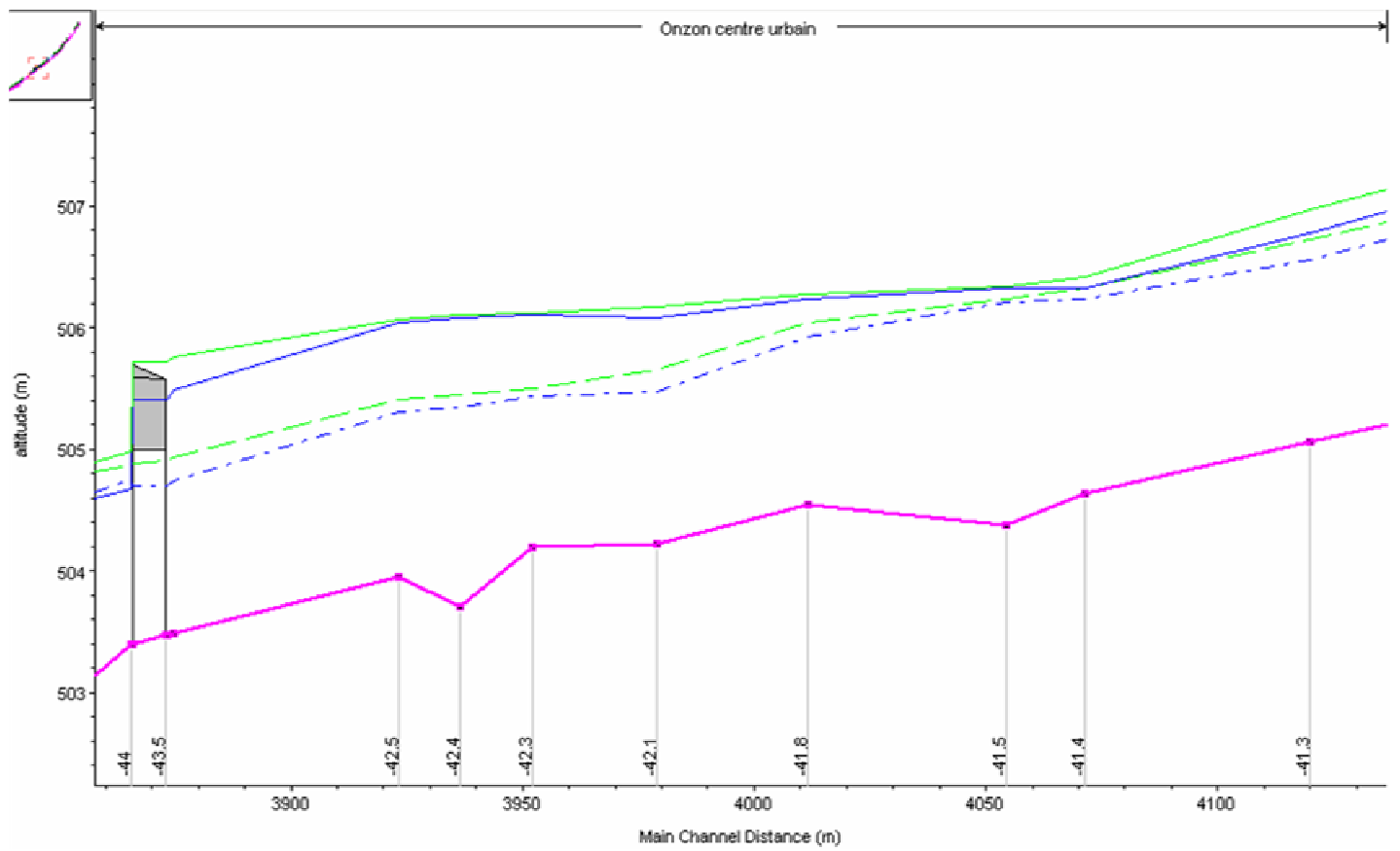








Profil en long de la ligne d'eau



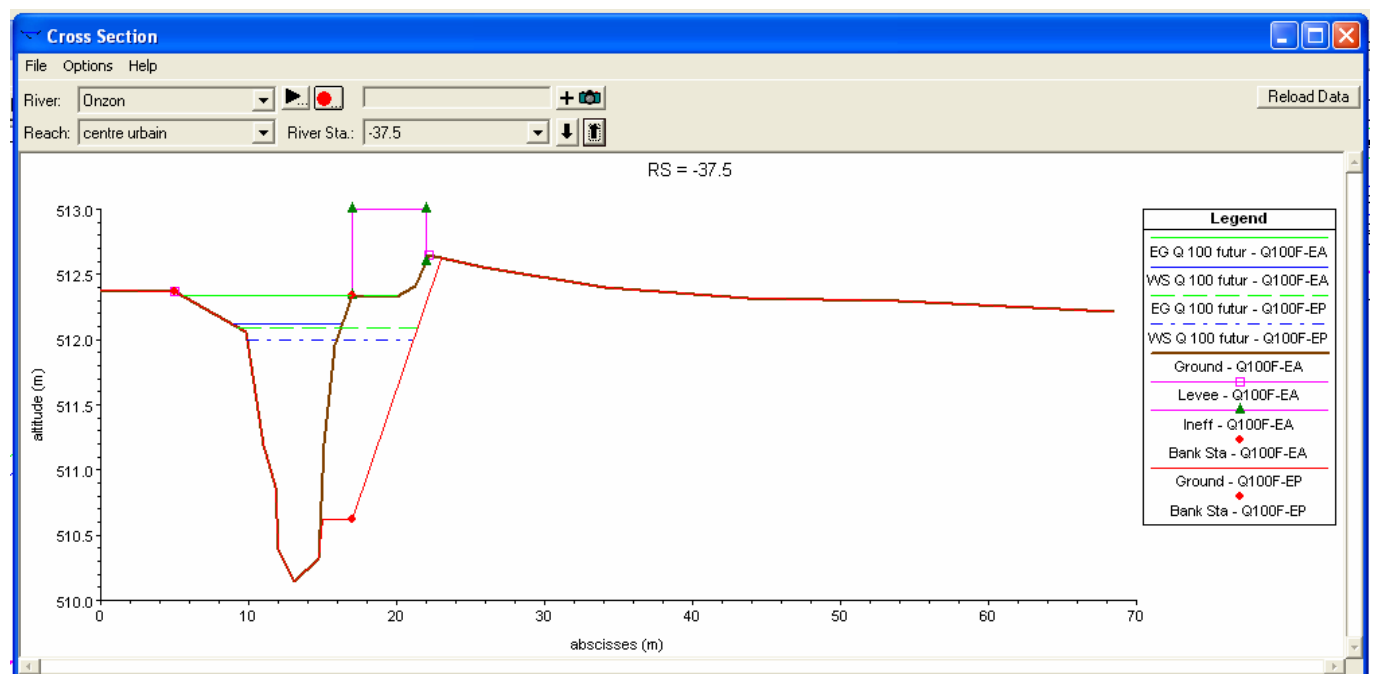
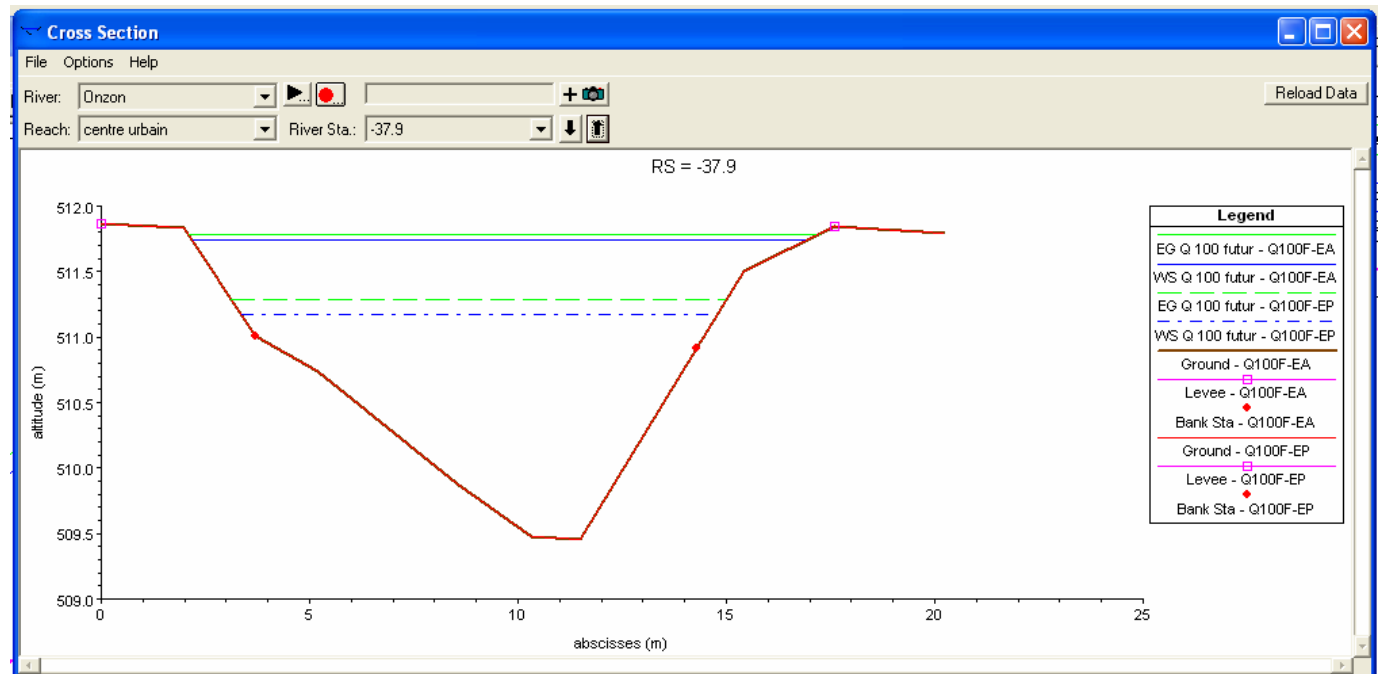
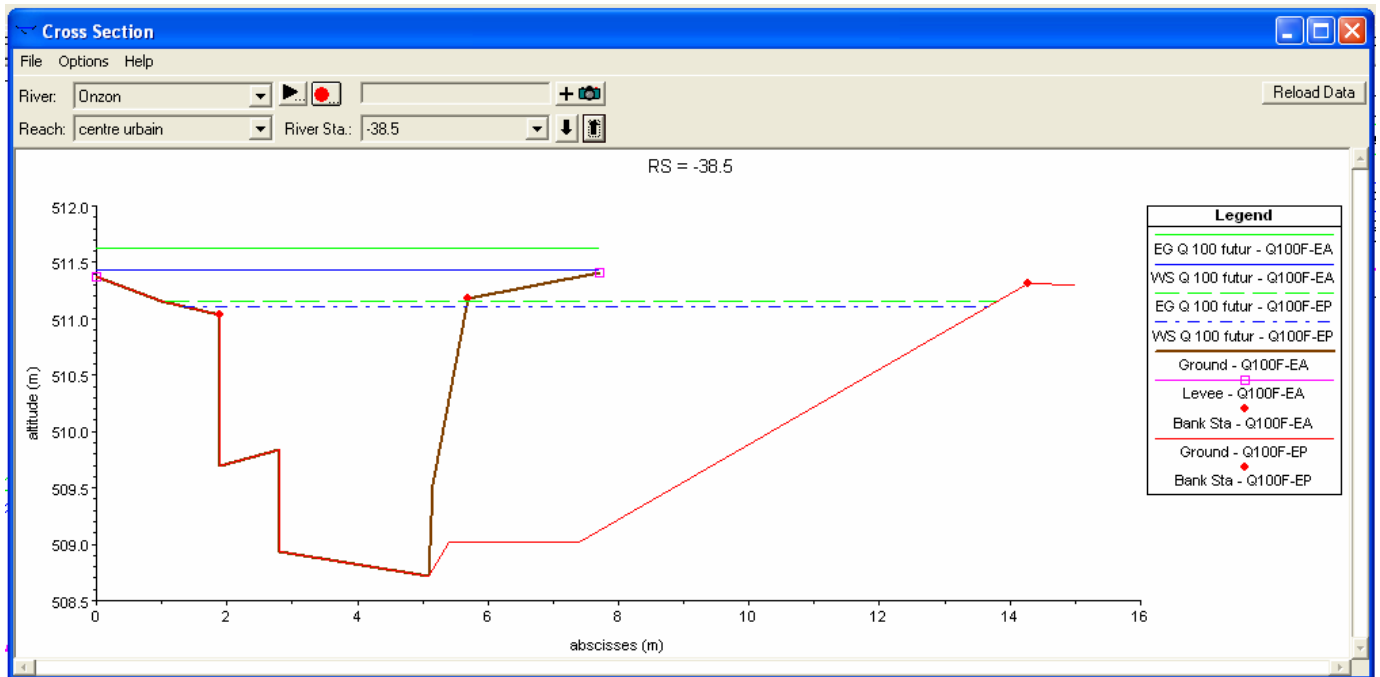
ANNEXE XI : ETAT PROJET DU PROFIL 38.5 AU PROFIL 34.6

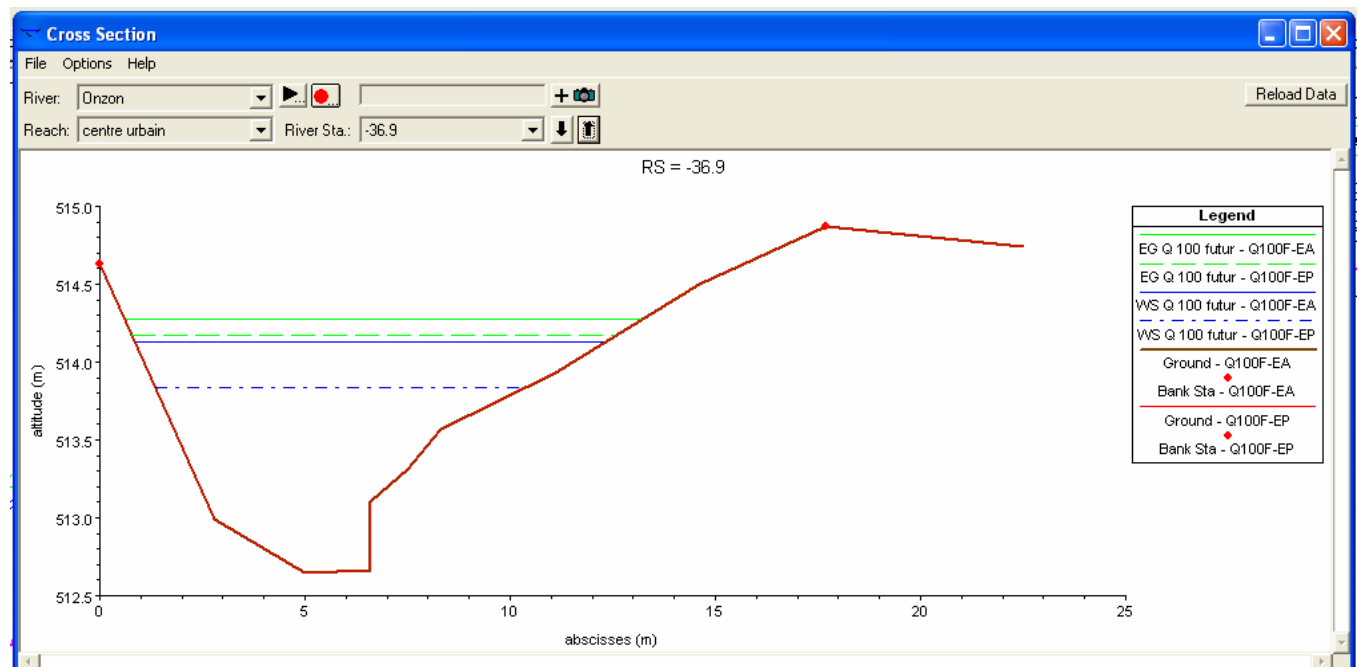
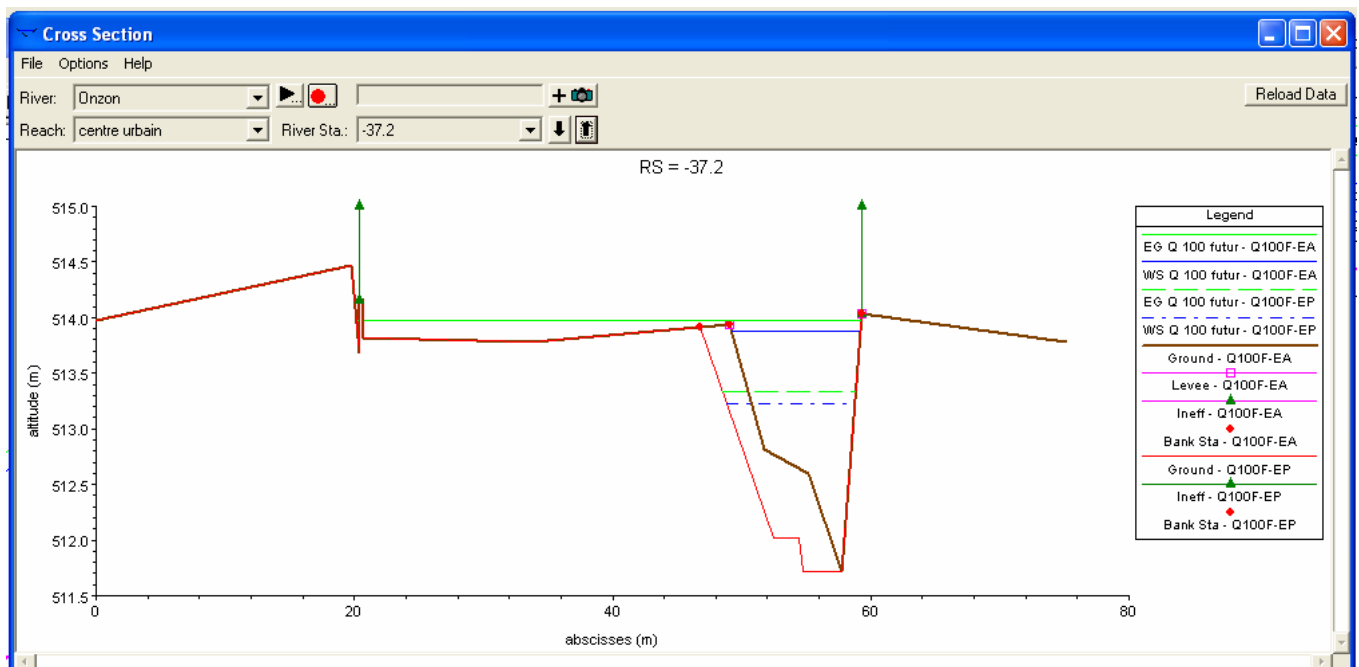
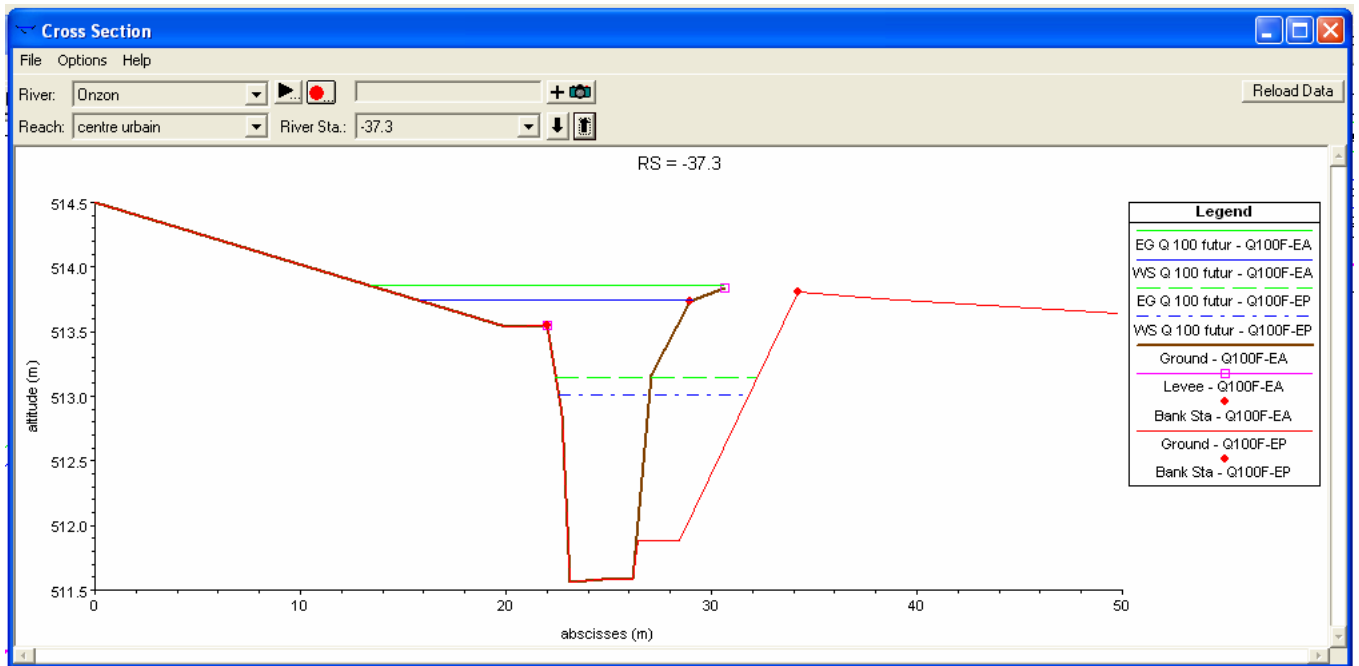
Cette annexe concerne les simulations de la crue centennale future entre la géométrie actuelle (état actuel) et la géométrie future (état projet).

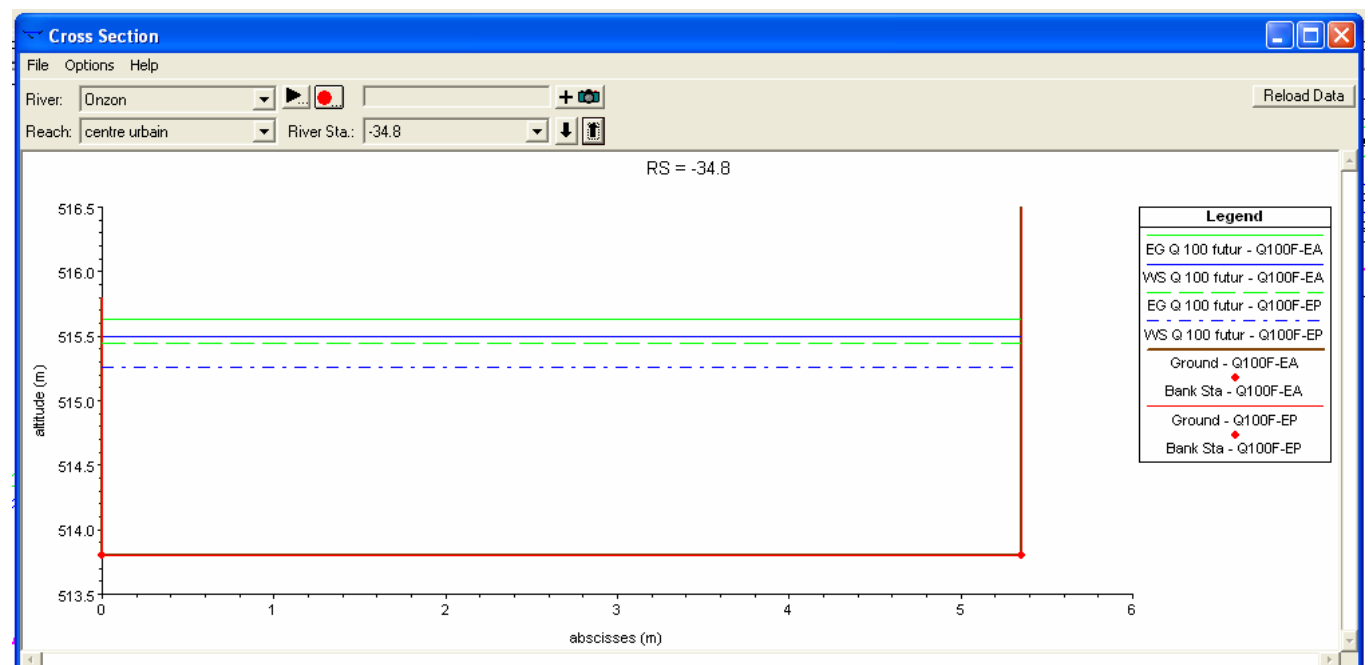
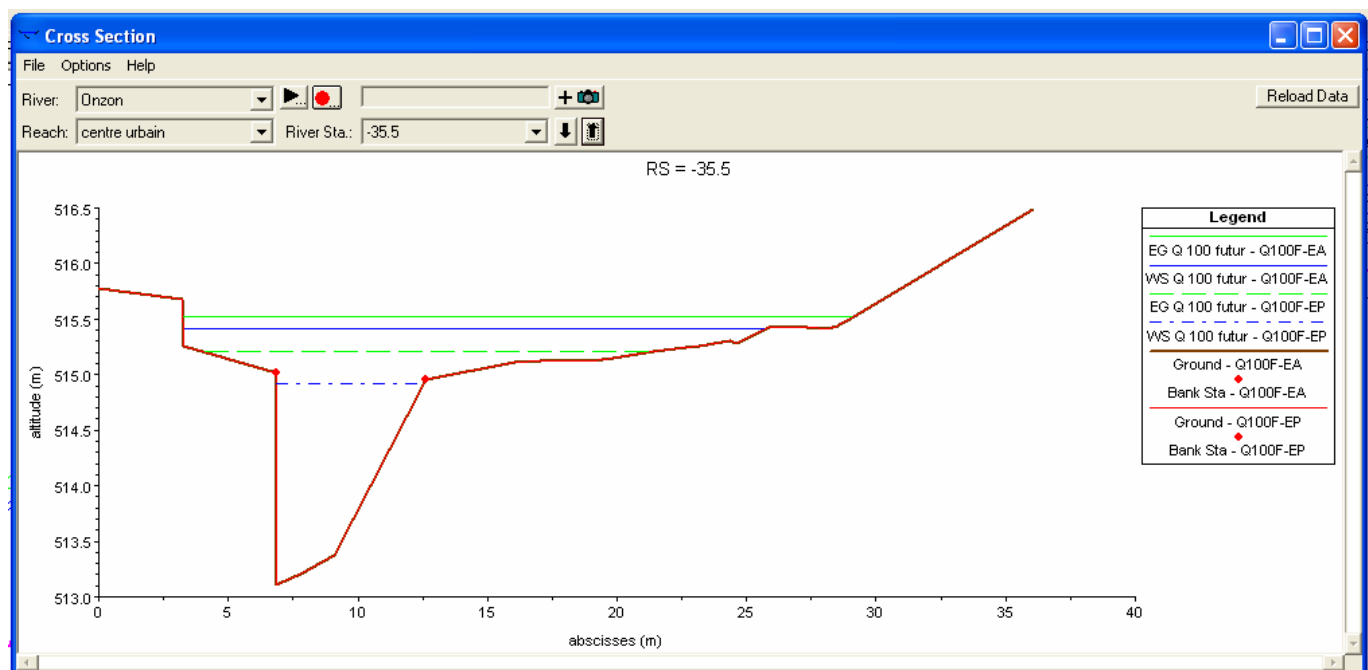
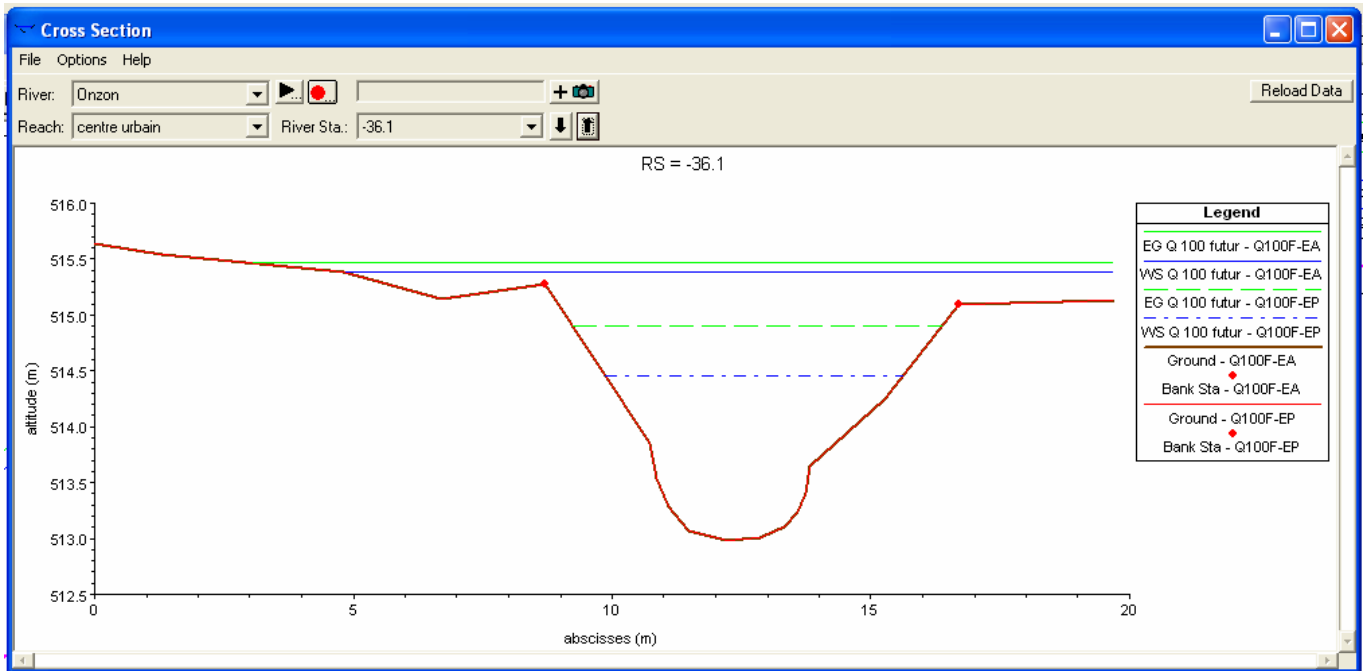
Elle contient les profils en travers et le profils en long avec les 2 lignes d'eau obtenues.

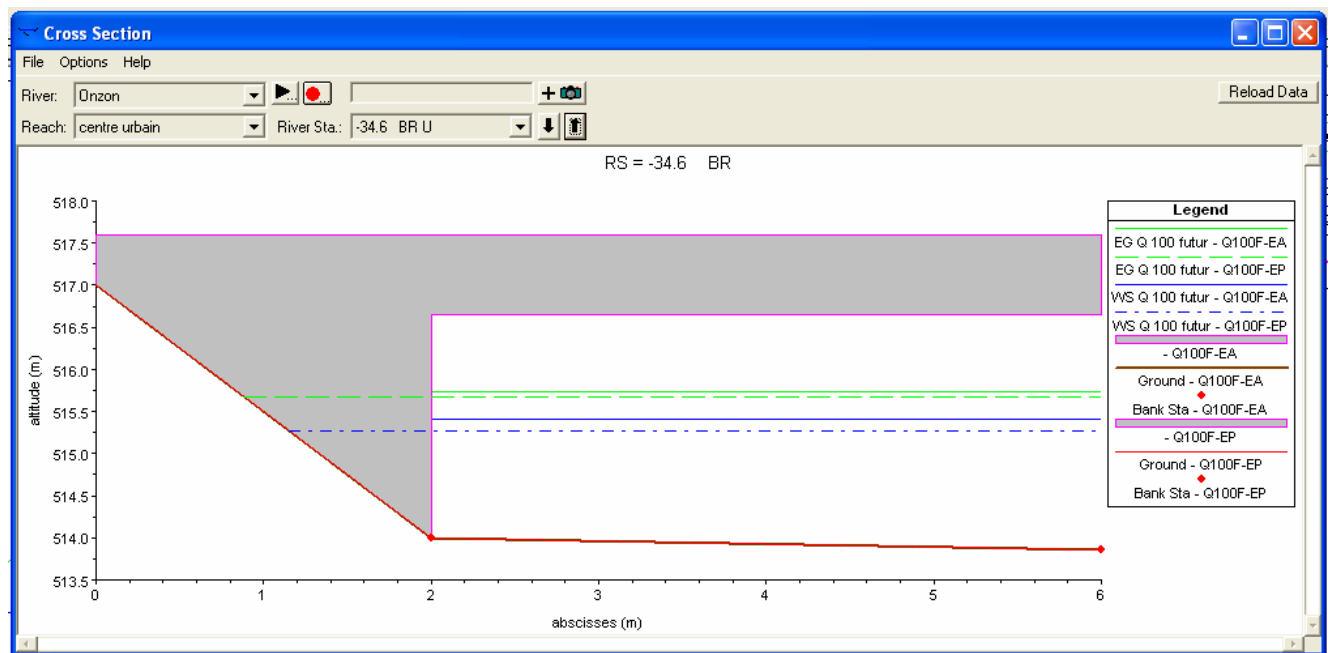
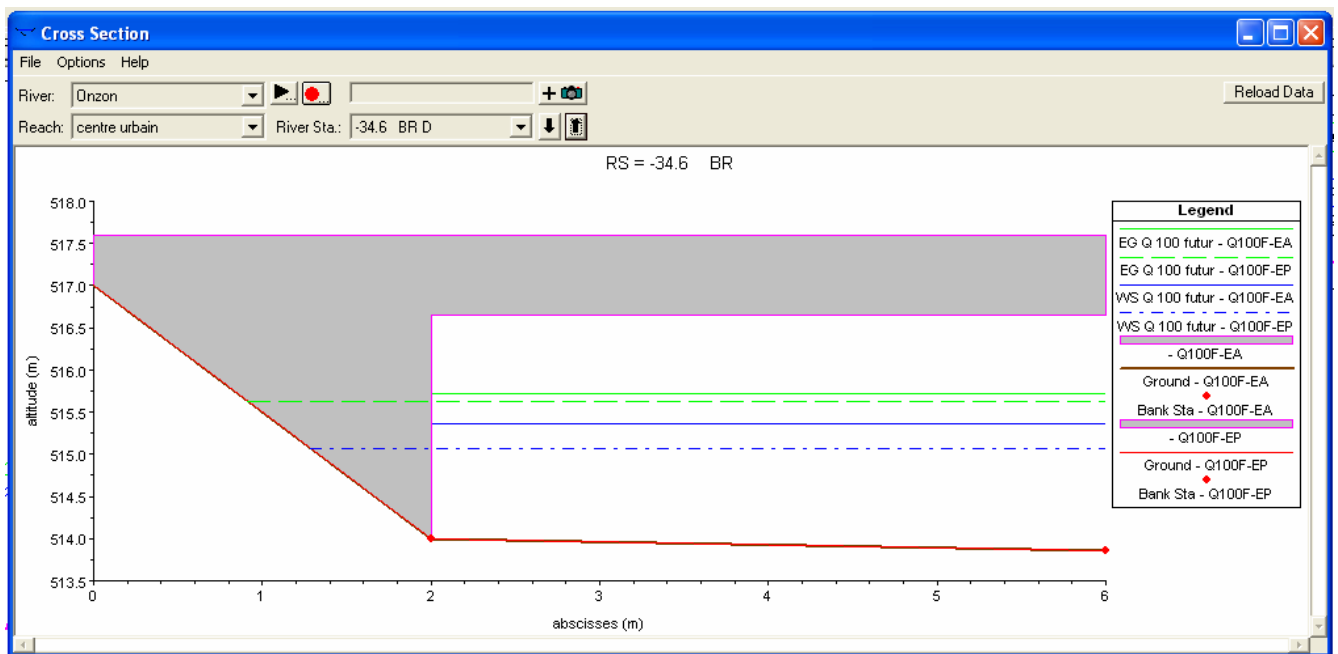
Légende : voir annexe X

Profil en travers









Profil en long de la ligne d'eau

