

Réalisation d'un atlas de zones inondables. L'Aisne amont et l'Aire dans le département des Ardennes.

Méthodologie française et Suisse.



TARDIVO Charles

Mai – Septembre 2005

Réalisé sous la direction de : Stéphane PINEY

Rapport réalisé en vue de l'obtention du diplôme de DESS Ingénierie des Hydrosystèmes
Continents en Europe

Remerciement

Ce stage au LRPC de Blois a été un moment très appréciable tant sur le plan humain qu'au niveau de l'apprentissage et de la pratique des connaissances acquises lors de mon cursus universitaire.

Je tiens particulièrement à remercier :

Stéphane PINEY, responsable de l'unité Hydraulique et Risque de Ruissellement pour son accueil, son aide et son soutien.

Toute l'équipe HRR, **Laetitia HEURDIER**, **Emmanuel LAVAUD** et **Pierre SALOMON** qui m'ont accueilli, supporté, aidé et surtout pour leurs bonnes humeurs.

Merci aussi à : **Jean-Claude JOUANNEAU**, responsable du département environnement, **David GOUTX**, pour ses conseils sur Mascaret et nos quelques heures quotidiennes de train, **Sébastien PINGARD**, collègue stagiaire du DESS IHCE.

N'oublions pas **Robert QUENIOUX**, **Pierre JURANVILLE**, **Maxime HORDEAUX**, **Alain LEGRAND**, **Carine VREL**, **Martine GAULLIER** de l'unité Bathymétrie-Hydraulique pour la bonne ambiance. **Corinne BELLAN**, **Jocelyne CARPENTIER**, les secrétaires du département environnement.

Merci enfin à **Marjorie MENEGON**, sans qui rien ne serait possible...

Sommaire.

<i>Sommaire.</i>	<i>1</i>
<i>Résumé – Abstract.</i>	<i>2</i>
<i>Introduction.</i>	<i>3</i>
<i>Partie I) Présentation du bassin versant d'étude.</i>	<i>5</i>
<i>partie II) La mise en place d'un Atlas de zones inondables.</i>	<i>17</i>
<i>Partie III) Les incertitudes et les problèmes de la modélisation.</i>	<i>45</i>
<i>Partie IV) Les cartes de dangers en Confédération Helvétique.</i>	<i>52</i>
<i>Conclusion.</i>	<i>62</i>
<i>Bibliographie.</i>	<i>63</i>
<i>Table des Matières.</i>	<i>65</i>
<i>Liste des Figures.</i>	<i>67</i>
<i>Liste des Tableaux.</i>	<i>68</i>
<i>Liste des Photographies.</i>	<i>68</i>
<i>Annexes.</i>	<i>69</i>

Résumé – Abstract.

Suite à une inondation ayant coûté la vie à deux personnes en 1993, l'atlas des zones inondables de l'Aisne amont et de l'Aire dans le département des Ardennes doit permettre une prise en compte de ce risque naturel dans les différents documents d'urbanisme.

Une étude approfondie permet de définir les différentes zones d'aléas. Etudes sur le terrain et recherches dans les archives ont permis d'obtenir les informations sur les crues historiques nécessaires ensuite à la modélisation 1D sous le logiciel MASCARET. Cette modélisation, couplée à un MNT, permet de définir les hauteurs d'eau indispensables à la cartographie des zones inondables.

Si la méthodologie française paraît bien au point, d'autres méthodologies semblent très intéressantes. La Suisse, pays fédéral à grande tradition hydraulique, possède une cartographie semblable : la carte des dangers. À une différence majeure près, la prise en compte des aménagements dans la réduction du risque.

Mots clés : Atlas des zones inondables, modélisation hydraulique, prévention des crues, protection contre les inondations en Suisse, cartes des dangers.

Following a flood having cost the life to two people in 1993, the floodable Area Atlas of Aisne and Aire in the department of the Ardennes must taking into account of this natural risk in the various documents of town planning.

A thorough study makes possible to define risk's zones. Studies on the ground and research in archives made possible to obtain information on the historical floods necessary for the 1D model under software MASCARET. This model, coupled to a MNT, makes possible to define the heights of water essential to the cartography of the easily flooded zones.

If French methodology appears well developed, other methodologies seem very interesting. Switzerland, federal country with great hydraulic tradition, has a similar cartography : the map of dangers. Except one difference : the taking into account of installations in the reduction of the risk.

Keywords : floodable Area Atlas, hydraulic modeling, flood prevention, protection against floods in Switzerland, map of dangers.

Introduction.

Les inondations sont de loin le risque naturel le plus présent en France. Hyper médiatisé depuis quelques années, elles sont aussi très coûteuses tant en hommes qu'en matériels. Si certaines régions sont relativement épargnées, certaines villes peuvent se retrouver inondées plusieurs fois par an.

Suite aux graves inondations du début des années 1990 (Nîmes, 1988 : 10 morts et 500 millions d'euros de dégâts, Vaison-la-romaine, 1992 : 47 morts et plus de 500 millions d'euros de dégâts), plusieurs faits ont renforcés la politique de prévention contre les inondations :

- La mise en place, suite à la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, de la gestion intégrée de l'eau en bassin versant à travers les SAGE,
- la mise en évidence de l'importance des zones humides vis à vis des inondations,
- la conférence de RIO de 1992 où la France s'engage à mettre en place une politique de développement durable.

Dans ce contexte, le comité interministériel du 24 janvier 1994 a lancé une nouvelle politique de prévention des risques naturels. Cette politique comprend :

- un programme de prévention des inondations visant à préserver les vies humaines à travers la modernisation des systèmes de surveillance et d'alertes, l'entretien et la restauration des cours d'eau et sur une nouvelle gestion des zones inondables,
- un nouveau document réglementaire de prise en compte du risque dans l'aménagement : le PPR (Plan de Prévention des Risques Naturels).

La partie spécifique aux inondations définit trois objectifs à atteindre :

- interdire les implantations humaines dans les zones les plus dangereuses, quels que soient les aménagements et les limites dans les autres zones,
- préserver la capacité d'écoulement et d'expansion des crues pour ne pas aggraver les risques dans zones amont ou aval,
- sauvegarder l'équilibres des milieux dépendants des petites crues et la qualité des paysages naturels remarquables que sont les cours d'eau.

Très rapidement, un protocole pour créer les Plans de Préventions du risque inondation (PPRI) est mis en place (Figure 1). Il aboutit à deux cartographies (la carte des aléas et la carte des enjeux) qui une fois croisées forment la cartographie du plan de prévention des risques d'inondations.

Dans le présent rapport, nous aborderons spécifiquement la mise en place d'une carte des aléas.

Les cartes des aléas ou atlas des zones inondables ont pour objet de rappeler l'existence et les conséquences des événements historiques et de montrer les caractéristiques des aléas pour la crue de référence choisie (plus forte crue connue ou crue centennale statistique si elle lui est supérieure). Ces atlas, avant d'être une étape dans la cartographie des PPRI, sont un outil destiné à sensibiliser et à informer les élus de l'étendue et de l'importance des inondations, et à les responsabiliser quant au rôle qu'ils doivent ou peuvent jouer dans la prévention du risque.

L'Atlas des zones inondables de l'Aisne amont et de l'Aire dans les Ardennes (08) en amont de Mouron, est une étude commandée par le Service de l'aménagement, de l'urbanisme et de l'environnement la direction départementale de l'équipement des Ardennes. Il n'a pas

vocation à devenir un PPRI (les enjeux sont très faibles) mais un document d'urbanisme informatif prescripteur dans le cadre de l'instruction des permis de construire.

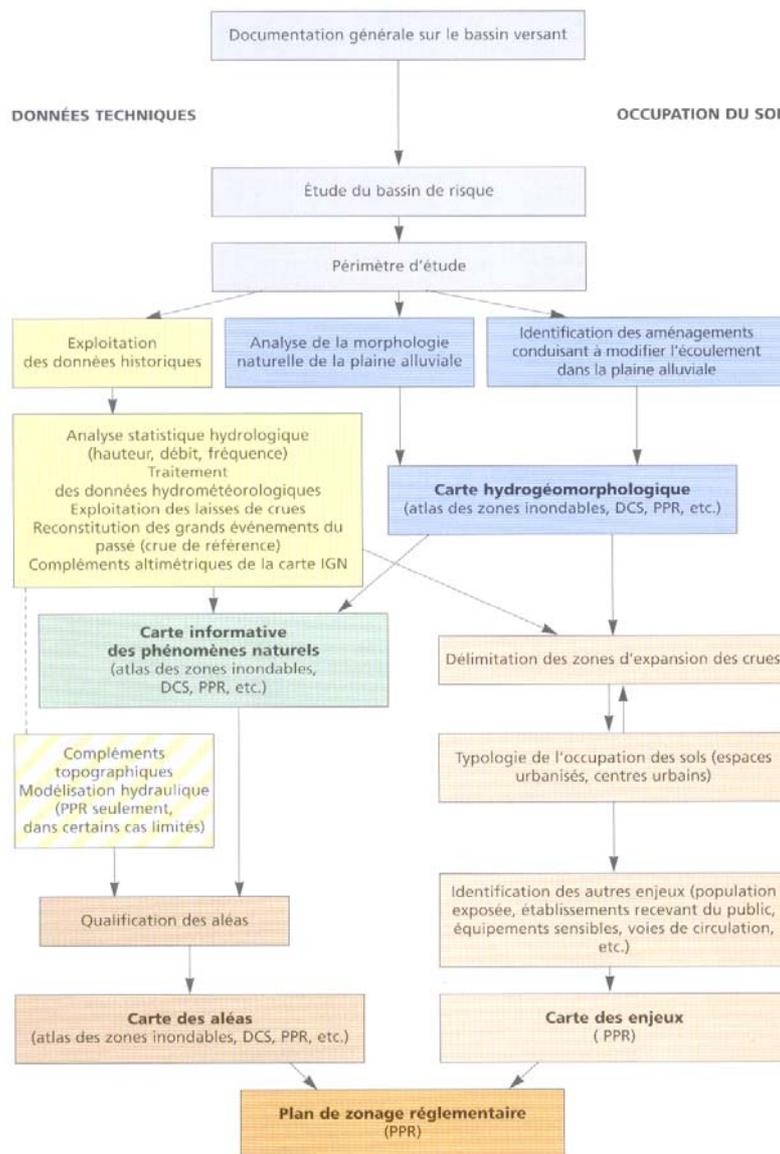


Figure 1 – Principales étapes des études du risque d'inondation.¹

Dans un premier temps, nous aborderons les techniques de mise en place d'une carte d'Aléas à travers l'atlas des zones inondable de l'Aisne et de l'Aire dans les Ardennes, en amont de Mouron.

Après avoir discuté des limites de la mise en place des Atlas en France, nous observerons la mise en place de document similaire en Suisse : les cartes de danger. La Suisse est un Etat qui depuis longtemps pratique l'ingénierie hydraulique (principalement avec de nombreux aménagements draconiens). Partant de ce constat de savoir faire de l'ingénierie hydraulique Suisse, il est intéressant de parcourir et de comparer les modes de préventions et de protections des risques d'inondation. Cette recherche n'a qu'un but informatif et permet aux acteurs de la protection contre les inondations en France de découvrir d'autres méthodologies quant à la cartographie des risques.

¹ Ministère de l'équipement, 1998. *PPRI : guide méthodologique*. La documentation française.

Partie I) Présentation du bassin versant d'étude.

1) Situation Géographique.

a) L'Aisne.

L'Aisne est une rivière du Nord-Est de la France. Elle prend sa source dans le massif de l'Argonne, à la limite entre la Meuse (55) et la Marne (51), et conflue avec l'Oise à Compiègne, dans le département de l'Oise (60). Elle fait partie du bassin versant de la Seine. Elle traverse cinq départements : la Meuse (55), la Marne (51), les Ardennes (08), l'Aisne (02) et l'Oise (60) sur une longueur totale de 300 km. Son bassin versant draine une surface de 8000 km² (figure 2).

Ses principaux affluents sont l'Aire (Ardennes) et la Vesle (Aisne).

Du point de vue juridique, l'Aisne se découpe en trois parties distinctes :

- Non domanial en amont de Mouron (08).
- Domanial non navigable entre Mouron (08) et Condé sur Aisne (02).
- Domanial Navigable en aval de Condé sur Aisne (02).

b) L'Aire.

C'est un affluent majeur de l'Aisne. Lors de leur confluence, le débit de l'Aisne est doublé. Elle a une longueur de 143 km, prend sa source dans le département de la Meuse (55) et conflue avec l'Aisne juste en amont de Mouron dans les Ardennes (08). Son bassin versant a une surface de 1043 km². Ce n'est pas une rivière navigable.

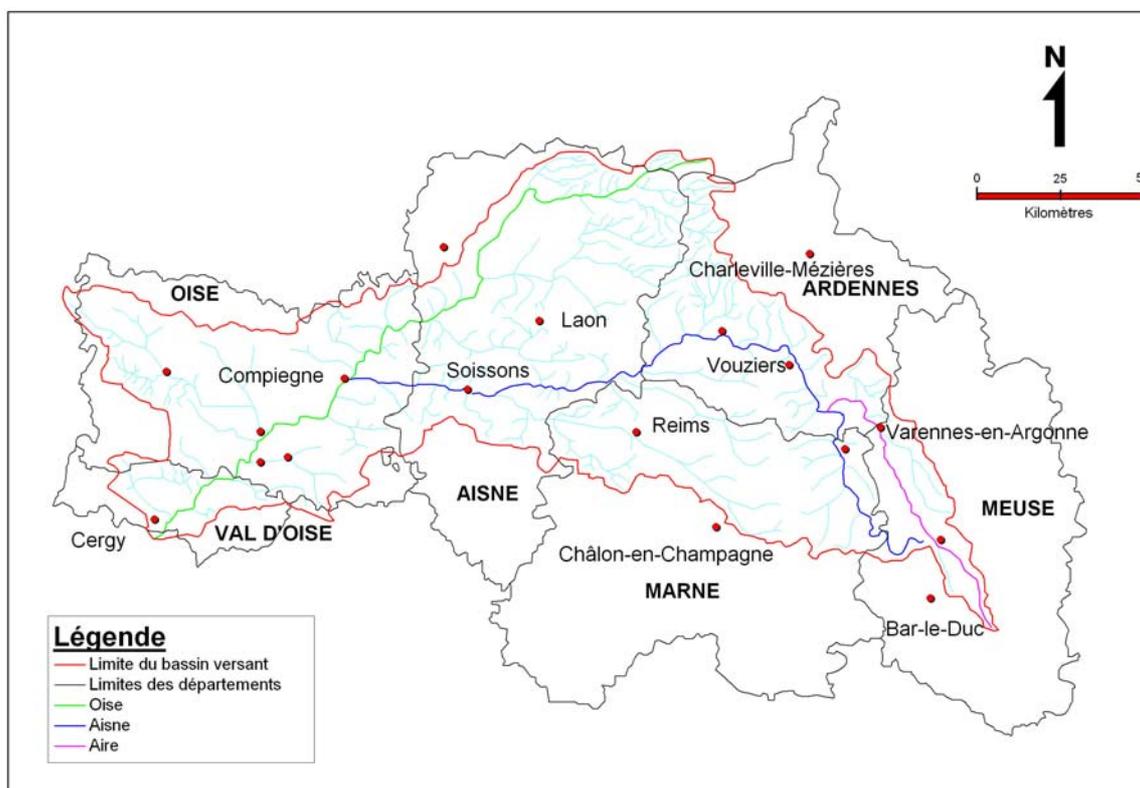


Figure 2 – Bassin Versant de l'Oise, de l'Aisne et de l'Aire (d'après Entente Oise-Aisne).

c) Le secteur d'étude.

Le secteur d'étude concerne le bassin versant amont de l'Aisne et de l'Aire dans leur partie située dans le département des Ardennes. La limite aval correspond à la Commune de Mouron (08). L'étude s'arrête au niveau de la limite départementale avec la Marne pour l'Aisne et avec la Meuse pour l'Aire (Figure 3).

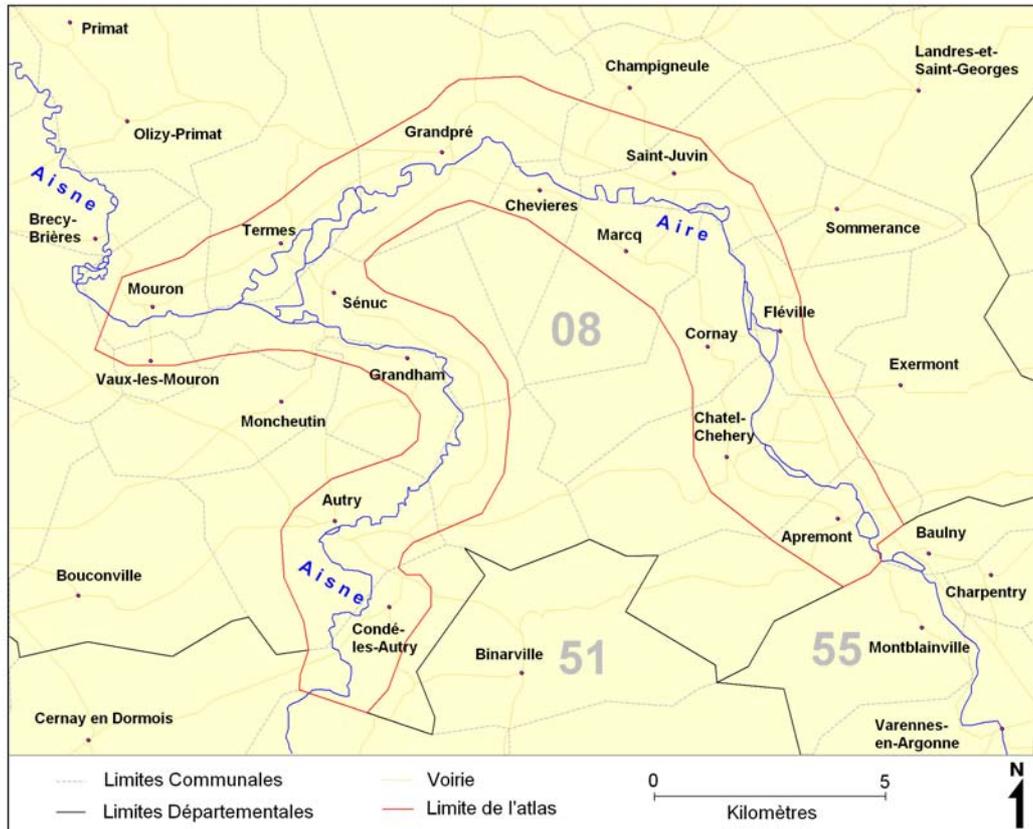


Figure 3 – Limite du site d'étude.

Entre l'Aisne et l'Aire se dressent les collines de l'Argonne qui culminent à 300 mètres. L'Est de la zone d'étude a un relief singulièrement plus important que l'ouest. Avec des dénivelées atteignant parfois 300 mètres dans la vallée de l'Aire contre 150 mètres dans la Vallée de l'Aisne (figure 4).

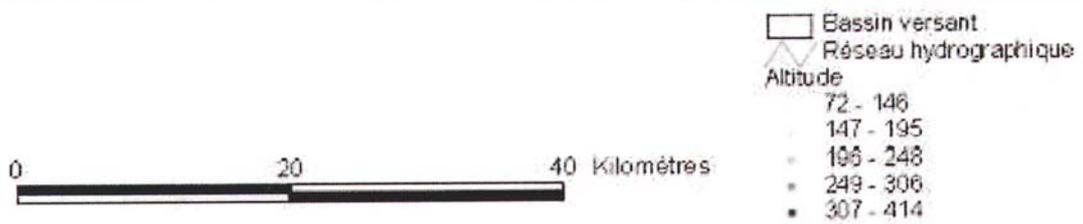
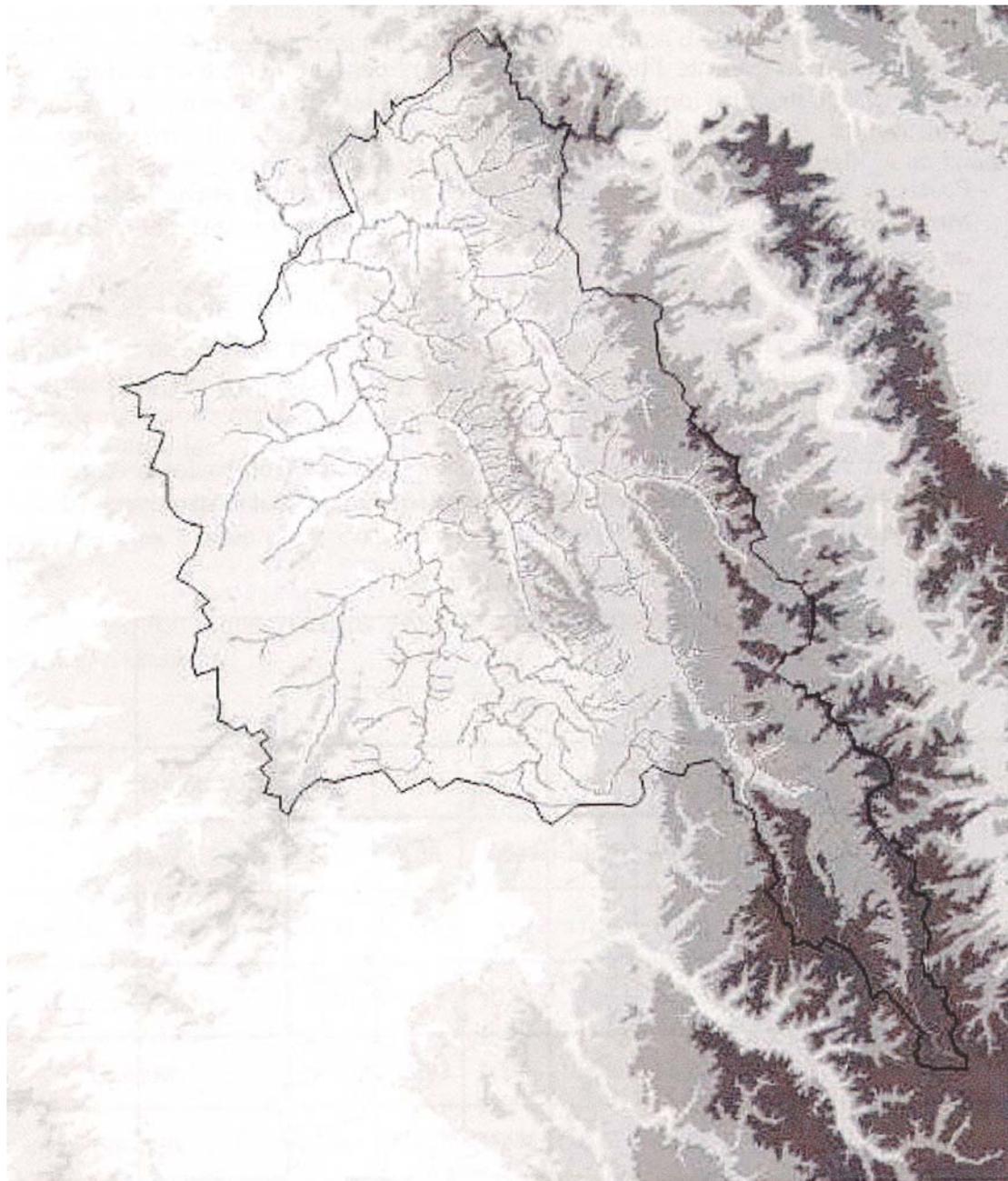


Figure 4 – Altitude du bassin versant de l’Aisne amont et de l’Aire (SAFREG, 2003).

2) Géologie.

Les formations sous-jacentes du bassin amont de l'Aisne et de l'Aire sont principalement composées de roches carbonatées Secondaires. Elles ne sont pas incluses dans le massif des Ardennes (orogénèse Hercynienne du Dévonien inférieur de l'ère Primaire : 390 Millions d'années) mais constituent un dépôt du Bassin Parisien (formation Secondaire et Tertiaire : 245 à 1.64 Ma).

Trois formations sont présentes. Elles sont délimitées par les deux rivières qui coulent parallèlement aux plans de jonction des différentes couches (Figure 5). L'écoulement dans le bassin amont est entièrement dépendant de la géologie et du relief qui en découle.

A l'Est de l'Aire se trouve une formation du Jurassique supérieur (Kimméridgien : 154.7 à 152.1 Ma) qui présentent de nombreux faciès de calcaires massifs et de marnes grises imperméables caractérisées par la présence de fossile d'*Exogyra virgula* (espèce d'huître spécifique à cette formation) et l'apparition de fossiles d'Astartes (Lamellibranche).

Entre l'Aire et l'Aisne, se trouve une formation crayeuse du Crétacé supérieur (Sénonien, Santonien : 86.6 à 83 Ma) de faciès comparable à la craie de Villedieu. Craie dure, imperméable, riche en fossiles d'Ammonites et en concrétions siliceuses (silex). Ce faciès très dur forme une cuesta sur le massif précédent plus tendre. La ligne de crête correspond au massif de l'Argonne (350 mètres).

A l'ouest de l'Aisne se trouve une formation de craie blanche du Campanien (Crétacé supérieur, Sénonien : 83 à 74 Ma) riche en silex, en fossiles d'ammonites et de rostrés de bélemnites (*Belemnitella minor*). La roche est ici beaucoup plus tendre et poreuse, ce qui favorise l'infiltration de l'eau et la dissolution des carbonates. Cette formation est donc sujette à la karstification.

On observe une quatrième formation plus récente qui correspond à des alluvions quaternaires. Ces sédiments déposés par l'Aisne et l'Aire se retrouvent tout le long du linéaire des rivières et on remarque un dépôt plus important à partir de la confluence.

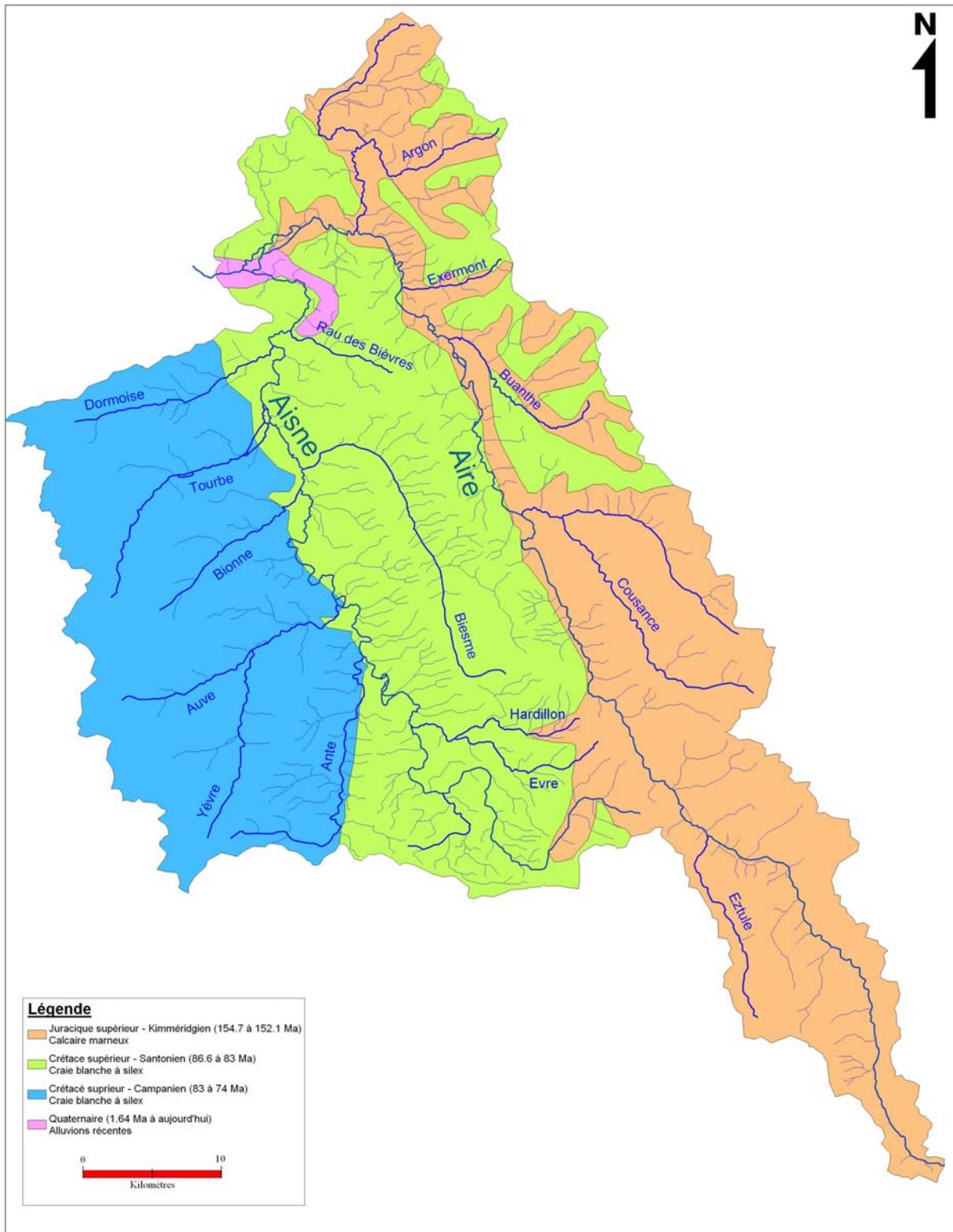


Figure 5 – Carte géologique simplifiée des bassins versants de l’Aisne amont et de l’Aire.

3) Climatologie.

Le haut bassin versant de l'Aisne est soumis à un climat de type semi-continental. La présence de relief favorise les précipitations importantes : les précipitations annuelles moyennes sur le bassin versant varient entre 750 mm et 1100 mm (Figure 6).

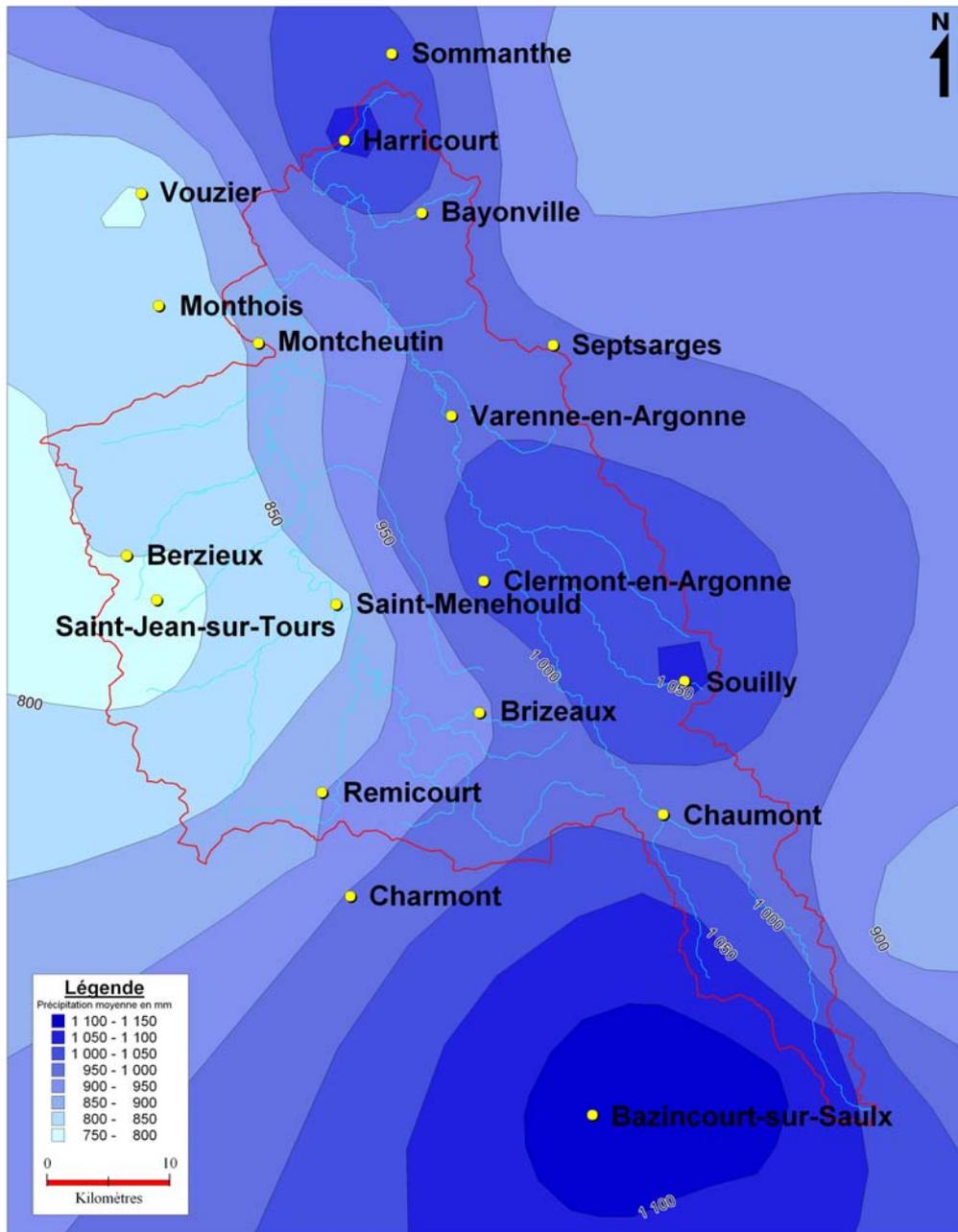


Figure 6 – Cartographie des pluies moyennes annuelles (en mm) sur le bassin de l'Aisne

On peut découper le bassin en deux zones qui présentent des caractéristiques pluviométriques différentes. Toute la zone est du bassin versant est sensiblement plus arrosée. Alors que l'ouest reçoit jusqu'à 25% de précipitations en moins. Cette inégalité de répartition est imputable au relief. La limite entre les deux zones correspond au massif de l'Argonne (300m) et les zones est et sud-est du bassin ont une altitude comprise entre 200 et 420 mètres.

4) Hydrologie.

L'Aisne amont est une rivière de taille moyenne avec un débit moyen de 63 m³/s. Dans le bassin amont, son principal affluent est l'Aire qui possède un débit moyen un peu plus faible. En amont de cette confluence, l'Aisne reçoit de façon régulière des petits affluents (figure 7).

Comme vu précédemment, la perméabilité de la roche sous-jacente joue un rôle prépondérant dans la structuration des écoulements. Les affluents rive gauche de l'Aisne coulent sur un substratum à tendance Karstique dont découle un faible chevelu de rivières (forte infiltration) mais un débit important. Rive droite, seul la Biesme représente un apport important. Bien que drainant la majorité de l'espace entre l'Aisne et l'Aire, elle représente l'équivalent d'un seul des affluents rive gauche.

On peut présumer l'existence d'une nappe dans le calcaire du Campanien qui accumule l'eau lors des fortes précipitations et la restitue tout le long de l'année. Alors que rive gauche, l'eau des précipitations ruisselle rapidement du fait d'une craie relativement imperméable, ce qui conduit à une faible recharge des nappes.

L'Aire possède cinq affluents majeurs. Ils ont la particularité de s'écouler tous sur le substratum Marno-calcaire du Jurassique, imperméable. Ce qui provoque lors des précipitations un fort ruissellement et une rapide concentration des eaux.

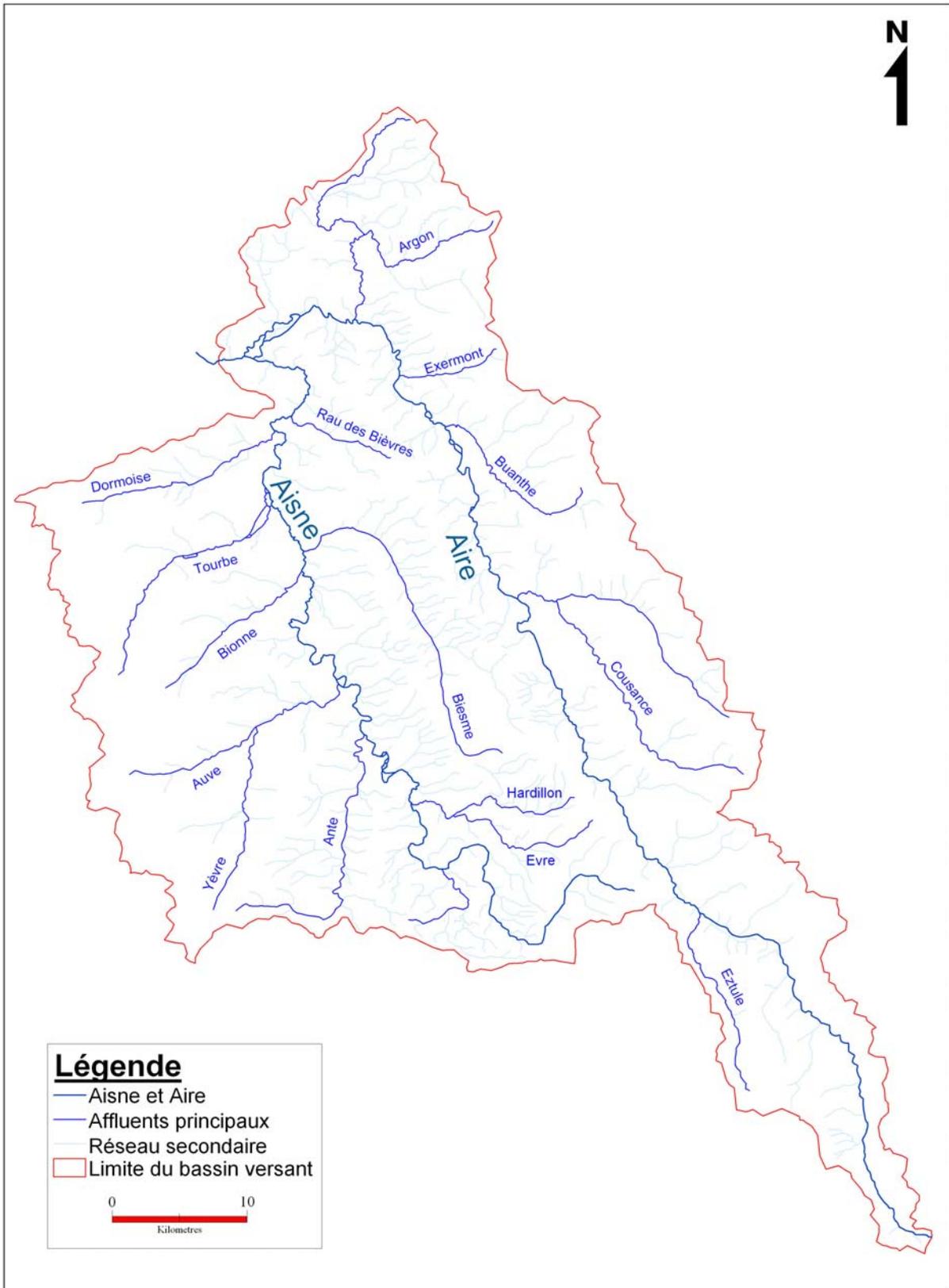


Figure 7 – Réseau hydrographique

5) Hydromorphologie.

L'Aisne et l'Aire sont des cours d'eau de taille moyenne. La largeur des vallées est relativement homogène autour de 550 mètres. Dans le site d'étude, la pente moyenne de la vallée de l'Aisne est de 0.8 ‰. Celle de l'Aire possède une pente deux fois plus forte avec 1.6 ‰. Ce sont des faibles pentes. Les versants des vallées sont abruptes, présentant généralement des pentes supérieures à 10 ‰. Le lit mineur a une largeur variable de 20 à 60 mètres suivant les tronçons.

Il existe différents indices pour caractériser la morphologie d'une rivière et d'un bassin versant.

- Indice de sinuosité : $Si = \frac{I}{L}$

Avec I = Longueur développée du cours d'eau.

L = Longueur du cours d'eau mesurée dans l'axe de la vallée.

Cet indice permet de caractériser l'activité relative d'une rivière.

L'Aisne est un cours d'eau très sinueux à tendance méandriforme ($Si=1.447$) et l'Aire est sinueuse ($Si=1.2$). Quand Si est inférieur à 1.5 on caractérise la rivière d'active c'est à dire qu'elle doit posséder un pouvoir érosif important.

- Indice de densité de drainage : $D = \frac{Ld}{A}$

Avec Ld = longueur cumulée des rivières et A = surface du bassin.

$D = 0.67 \text{ km/km}^2$

- Indice de Compacité (Coefficient de Gravelus 1932) : $K_G = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \approx 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$

Avec P = Périmètre du bassin versant et A = surface du bassin.

$K_G = 1.9$

Le bassin versant de l'Aisne amont et de l'Aire est un bassin de forme plutôt allongé. Il présente un réseau relativement important (1510 km de linéaire un bassin versant de 2280 km² soit 0.67 km de drain par km²) qui induit un fort ruissellement. Le coefficient de Gravelius élevé indique une élongation du bassin. Plus K_G est fort plus la crue sera étalée dans le temps et moins elle sera intense (Figure 8).

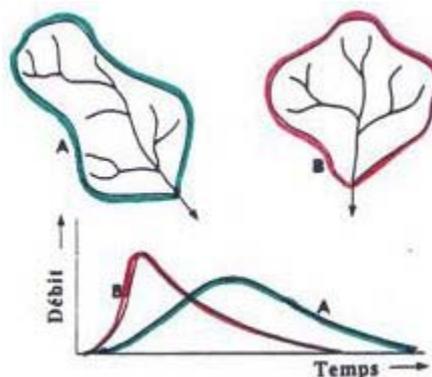


Figure 8 – Relation entre le coefficient de Gravelius et le débit à l'exutoire (d'après Knapp, 1979)

Bassin versant A : Fort Coefficient - Bassin versant B : Faible coefficient

- Ordination des rivières.

L'ordination consiste à donner un rang qui correspond à la position hiérarchique d'une partie du cours d'eau sur l'ensemble du réseau hydrographique. Seule la méthode de Strahler (1957) a été réalisée (Figure 9). Elle est la plus répandue et la plus utilisée car simple à mettre en œuvre. Dans cette méthode, deux tronçons de même ordre qui se rejoignent, forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis que celui qui reçoit un segment d'ordre inférieur conserve le même ordre. Plus le rang est important plus le tronçon est large, profond et le débit fort.

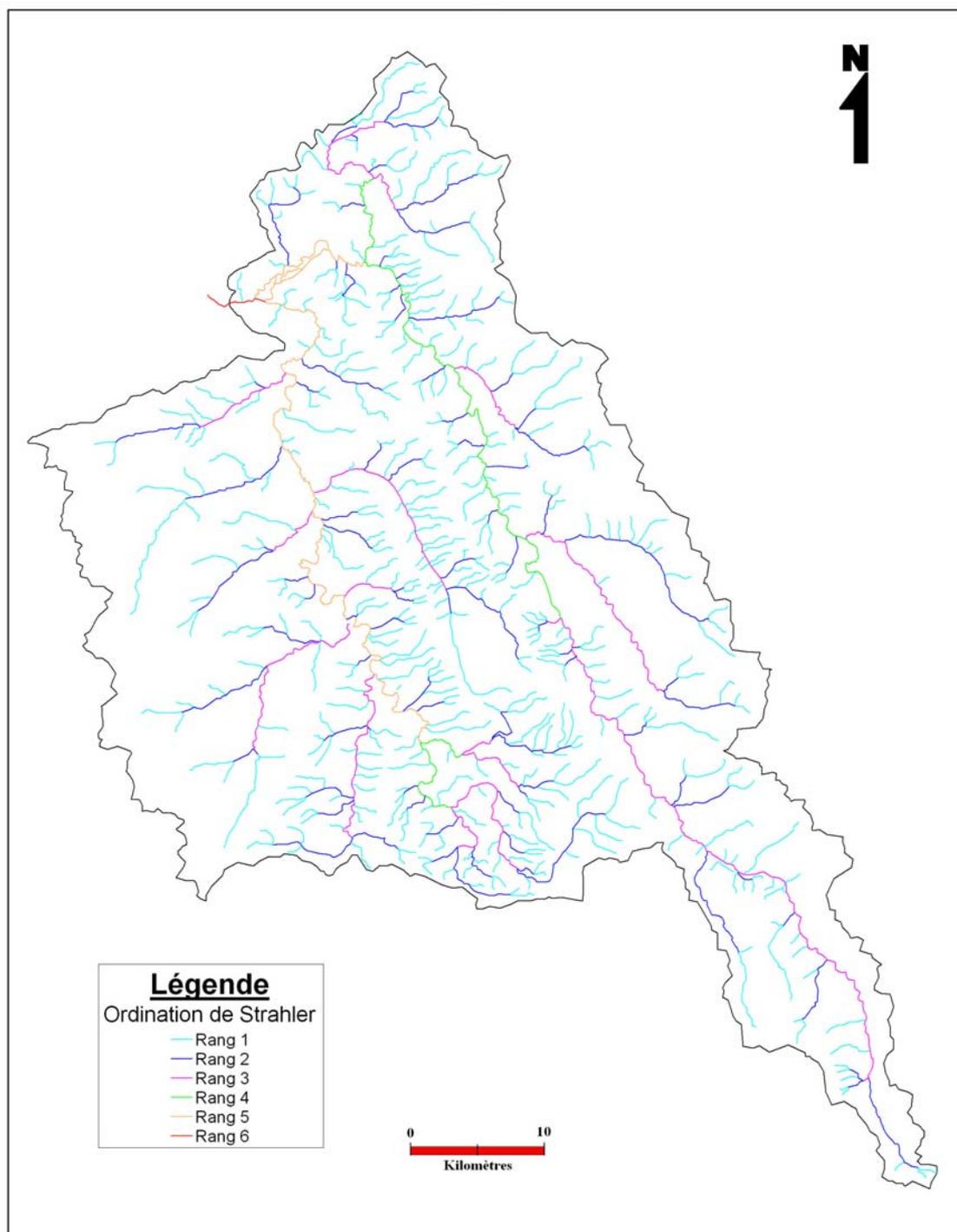


Figure 9 – Les différents rangs de l'ordination de Strahler dans le bassin versant.

On obtient un rang 6 pour l'Aisne en sortie du bassin d'étude. La principale remarque est la prédominance des tronçons de rang 1 et 2 qui composent plus de 75 % du bassin avec un linéaire de 1172 km (figure 10). Sur le secteur d'étude l'Aire et l'Aisne possèdent des rangs déjà importants (4 puis 5 pour l'Aire et 5 pour l'Aisne).

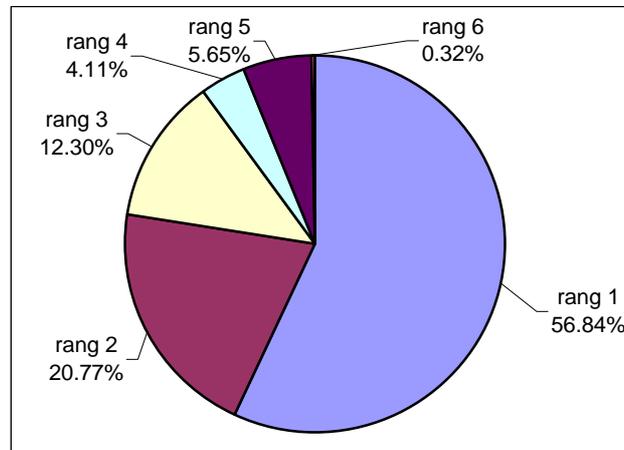


Figure 10 – Répartition des rangs.

6) Occupation du sol.

Le bassin versant de l'Aisne en amont de Mouron et de l'Aire dans le département des Ardennes a une vocation principalement agricole. Le lit majeur est couvert de cultures et de prairies herbacées. On y observe très peu de présences arbustives et arboricoles (Figure 11).

Il n'existe pratiquement pas de zones bâties dans le lit majeur. Mis à part quelques-uns, les villages alentours comme les routes y conduisant sont construits en dehors des secteurs d'action des cours d'eau.

Les collines et plateaux au-delà du val ont une occupation principalement forestière ou agricole. La grande forêt d'Argonne couvre l'intégralité de l'espace entre les deux rivières. La vallée de l'Aisne fait office de zone de transition entre la région d'agriculture intensive de la Champagne et le massif des Ardennes.

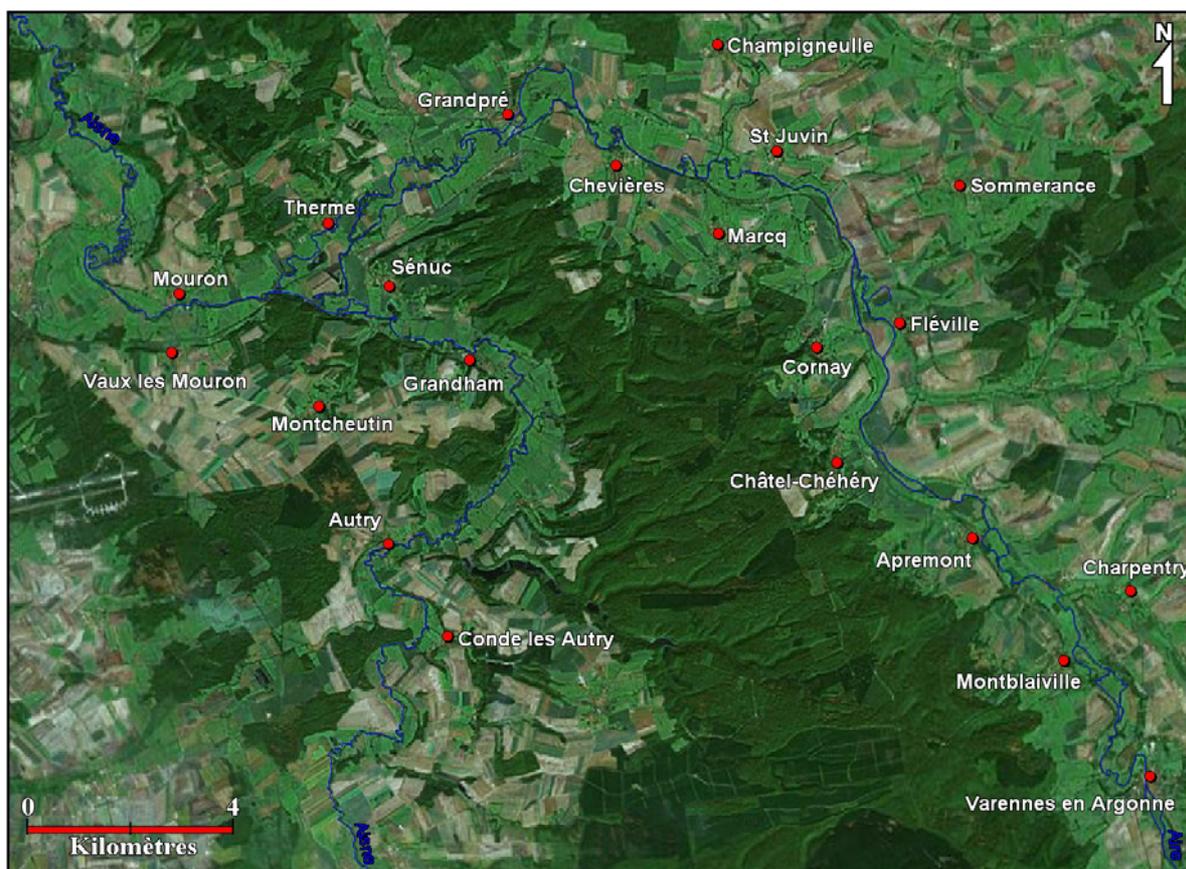


Figure 11 – Photo satellite de la zone d'étude, occupation du sol. ©Google earth

En vert foncé : forêt, vert clair : prairie, du gris au marron : champs cultivés.

partie II) La mise en place d'un Atlas de zones inondables.

Les crues, qu'ils s'agissent d'inondations de plaines, de remontées de nappes, de marées exceptionnelles ou de crues torrentielles sur le relief, représentent le risque naturel le plus présent en France. Le réseau hydrographique français est assez dense avec un linéaire proche de 280 000 kilomètres. Selon une enquête du ministère chargé de l'Environnement en 1998, une commune sur trois est susceptible d'être inondée en France.

Tout le monde a en mémoire un épisode de crue, que se soient les crues historiques du siècle dernier ou celles plus récentes de Vaison-la-romaine (1992), de la Somme (2001) ou du Rhône (2004). Les inondations ont provoqués la mort d'une centaine de personnes ces dernières années et occasionnés plusieurs milliards d'euros de dégâts sans oublier les milliers de sinistrés.

La notion de risque naturel représente un phénomène naturel potentiellement destructeur. Pour les spécialistes du risque, ce n'est pas le phénomène en lui-même mais le danger qu'il représente pour une population donnée qui caractérise le risque. Le risque ou situation à risques découle d'une part de la présence d'un danger (Aléa) et d'autre part de la présence de l'homme dans la zone de danger (Enjeux).

Ces dernières années, on observe une recrudescence des inondations. Mais le danger est souvent resté le même. Cette croissance de la vulnérabilité résulte de différents facteurs :

- l'urbanisation et l'installation d'activités humaines dans les zones inondables. L'urbanisation récente s'est réalisée dans ces zones qui paraissaient attractives : Facilité de construction, développement des réseaux d'infrastructures, proximité du centre urbain, tout cela sans aucune prise en compte du risque que pouvaient représenter les inondations. De plus, l'augmentation du niveau de vie a induit un meilleur équipement des foyers donc lors des inondations, une augmentation des coûts ;

- diminution du champ d'extension des crues. De nombreuses digues ainsi que des remblais ont été construits pour protéger l'urbanisation récente et les axes de transports ;

- aménagement des cours d'eau. Dans les années 70-80, de nombreux aménagements ont été réalisés sans prise en compte du fonctionnement global des cours d'eau. Exploitation des granulats, recalibrage pour faciliter le drainage des parcelles agricoles, canalisation de rivières. Toutes ces actions ont entraîné une augmentation des vitesses dans les lits mineurs et une dégradation sans précédent de la qualité physique, chimique et biologique des cours d'eau.

- homogénéisation de l'occupation du sol dans les plaines alluviales. Les forêts alluviales et les prairies de pâture ont cédés leurs places à une agriculture souvent intensive laissant nu le sol une partie de l'année. L'absence de végétation induit une augmentation du ruissellement, un écoulement plus rapide et une concentration des eaux qui peut contribuer à aggraver les crues.

Tous ces paramètres ont provoqué une augmentation des fréquences et des envergures des crues. Suite à quoi les collectivités ont pris conscience du problème et engagé des réformes pour assurer la protection des populations et de leurs biens. Cette prise de conscience a conduit à la création d'un nouvel outil réglementaire : le Plan de Prévention des Risques (loi du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement).

Le Plan de Prévention des Risques se décline sous différentes formes suivant la nature du risque. A terme toutes les collectivités locales doivent le mettre en place. Cet outil cartographie les zones d'Aléas et les recoupe aux zones d'enjeux. Il en découle un zonage en fonction de la probabilité du risque et une contrainte réglementaire forte.

Nous allons principalement nous intéresser à la mise en place de la cartographie des zones d'Aléas ou Atlas des Zones Inondables (AZI).

1) Définition.

Un atlas des Zones Inondables est une cartographie des zones d'aléas. C'est à dire une carte faisant figurer le niveau atteint par une crue dite de référence ou de projet. Ce n'est pas une simple cartographie des plus hautes eaux connues mais une cartographie qui prend en compte des classes de profondeurs comme zonages d'intensités de crue et de probabilités d'occurrence. En termes de réglementation, la circulaire du 14 janvier 1994 précise que l'événement de référence à retenir pour le zonage est « la plus forte crue connue et, dans le cas où celle-ci serait plus faible qu'une crue de fréquence centennale, cette dernière ». Ce choix découle de deux volontés :

- se référer à des événements historiques, non contestables et susceptibles de se produire à nouveau,
- privilégier la protection des populations en zonant des crues rares ou exceptionnelles mais dont la puissance serait à même de provoquer d'énormes dégâts tant matériels qu'humains.

L'atlas des Zones Inondables constitue un outil de référence pour les services de l'Etat, dans les différentes tâches dont ils ont la responsabilité. Il doit en particulier :

- améliorer la pertinence des « porter à connaissance » opérés par les services de l'Etat, contribuant à la prise de conscience du risque par les opérateurs institutionnels dans le cadre de l'établissement des documents d'urbanisme,
- guider les services dans la programmation des actions de l'Etat en matière d'établissement de Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR),
- contribuer à une bonne prise en compte du risque d'inondations dans l'application du droit des sols,
- guider les services de l'Etat dans la programmation des aides aux travaux de protection,
- aider les services de l'Etat pour l'application de la police de l'eau et des milieux aquatiques,
- faciliter l'information préventive des populations,
- aider à la mise au point de plans de secours.

L'atlas des Zones Inondables doit par ailleurs guider les collectivités territoriales dans leurs réflexions sur le développement et l'aménagement du territoire, en favorisant l'intégration du risque d'inondations dans les documents d'urbanisme (schémas de cohérence territoriale, plans locaux d'urbanisme, cartes communales, règlements de lotissement, permis de construire). Il peut faciliter l'identification des zones de rétention temporaires des eaux de crues ainsi que les zones de mobilité du lit mineur des cours d'eau. Il doit aider à la mise au point des plans communaux de sauvegarde. Enfin, il contribuera plus généralement à l'information du public, des professionnels et des décideurs.

Il existe trois classes de zonage définies en fonction des hauteurs de submersions (Tableau 1). La hauteur d'eau de un mètre délimite la borne inférieure du plus fort aléa. Elle a été délimitée par la circulaire ministérielle du 2 février 1994 pour les raisons suivantes :

- mobilité fortement réduite pour un adulte et impossible pour un enfant,
- limite d'efficacité d'un batardage mis en place par un particulier,
- soulèvement et déplacement des véhicules qui vont constituer des dangers et des embâcles,
- difficulté d'intervention des engins terrestres des services de secours.

Risque de submersion	Hauteur d'eau
Faible et Moyen	< à 1 m
Fort	> à 1 m

Tableau 1 – Hauteur des classes de zones inondables.

Parfois, une quatrième classe est ajoutée pour les niveaux d'eau supérieurs à 2 mètres. Cette classe d'Aléa très fort est parfois nécessaire dans les zones fortement urbanisées. Dans certains cas, inondations rapides ou inondations par les torrents, la caractérisation par les hauteurs sera insuffisante. Il faudra prendre en compte les vitesses d'écoulement (Tableau 2).

Hauteur	Vitesse		
	Faible <0.20 m/s	Moyenne	Forte >0.50 m/s
De 0 à 0.5 m	Faible	Moyen	Fort
De 0.5 à 1 m	Moyen	Moyen	Fort
> à 1 m	Fort	Fort	Très Fort

Tableau 2 – Qualification des aléas en fonction de la hauteur et de la vitesse.

Pour obtenir un tel zonage, il est parfois nécessaire de recourir à une modélisation hydraulique de la zone. Cette modélisation prend en compte des levés topographiques sur le terrain, une collecte des informations relatives aux crues précédentes et historiques ainsi qu'une étude hydraulique.

2) *Choix de la modélisation.*

Il existe de nombreuses modélisations possibles prenant en compte les différents paramètres. Le choix de la modélisation est capital. Modélisation numérique 1D, 2D ou modèle physique, les hypothèses prises en compte diffèrent d'une modélisation à l'autre.

Pour un atlas des Zones Inondables, ce qui importe, c'est le niveau d'eau induit par un débit donné dans une topographie connue. Toutes les variables de vitesses, de variation latérale de débit et d'écoulement secondaire dans la plaine d'inondation ne sont pas indispensables pour obtenir une cartographie des zones inondables.

Pour un atlas des Zones Inondables, seule une modélisation 1D est nécessaire. Le logiciel utilisé pour la modélisation numérique (Mascaret) utilise le modèle de Saint-Venant 1D. Pour ce modèle, plusieurs hypothèses s'imposent :

- conservation de la masse et du volume de l'eau,
- la direction de l'écoulement du lit mineur est privilégiée,
- la pression est hydrostatique (les variations transversales de la ligne d'eau ne sont pas prises en compte),
- pente de la ligne d'eau faible (inférieure à 10%),
- écoulement et hydromorphologie relativement homogènes entre les sections.

Les équations de Saint-Venant sont établies à partir des équations générales de la mécanique des fluides (Conservation de la masse et de l'énergie).

Équation de continuité :
$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1$$

Équation dynamique :
$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) = -gS \frac{\partial Z}{\partial x} - gSJ + \gamma_1$$

Définition des variables et des paramètres

J : Coefficient de perte de charge globale, nombre adimensionnel

$$J = \frac{Q^2}{D^2} = \frac{Q^2}{K^2 S^2 R_h^{4/3}}$$

β : coefficient de Boussinesq, nombre adimensionnel traduisant l'hétérogénéité du champ de vitesses.

$$\beta = \frac{S}{Q^2} \int U^2 dS$$

Tant qu'il n'y a pas de débordement $\beta=1$

R_h(m) : Rayon hydraulique

$$R_h = \frac{S}{P}$$

S(m²) : Section mouillée

t(s) : Temps

Q(m³/s) : Débit

U(m/s) : Vitesse Moyenne

x(m) : Abscisse curviligne

q₁(m²/s) : Apport latéral de débit par unité de longueur

γ₁(m³/s) : apport latéral de quantité de mouvement

K(m^{1/3}/s) : Coefficient de Strickler

D(m³/s) : Débitance

P(m) : Périmètre mouillé

Pour réaliser une modélisation 1D, il est nécessaire de posséder des données sur l'écoulement et sur la géométrie de la rivière. Plus d'information sur l'hydrologie des cours d'eau figuré en annexe (Annexe IV).

3) Géométrie du cours d'eau.

La géométrie est constituée par un ensemble de profils en travers dans une vallée. Le choix de la disposition et du nombre de ces profils est capital. En effet, les profils retenus doivent rendre compte le plus fidèlement possible de la géométrie du cours d'eau, de la plaine d'inondation et du comportement hydraulique de la rivière. Il est nécessaire de disposer des profils à tous les endroits où se produisent des changements sensibles de la géométrie. De même il est indispensable d'encadrer les singularités hydrauliques (seuil, pont, déversoir, etc.) qui engendrent une variation de l'écoulement et une perte de charge singulière. Ces profils sont ensuite nommés en fonction de leur point kilométrique (PK) qui définit le positionnement du profil en fonction de tous les autres (Figure 12). Il est indispensable que les profils soient tous créés de la rive gauche vers la rive droite pour une question de compatibilité avec le logiciel qui génère la cartographie des zones inondables (Ophyca).

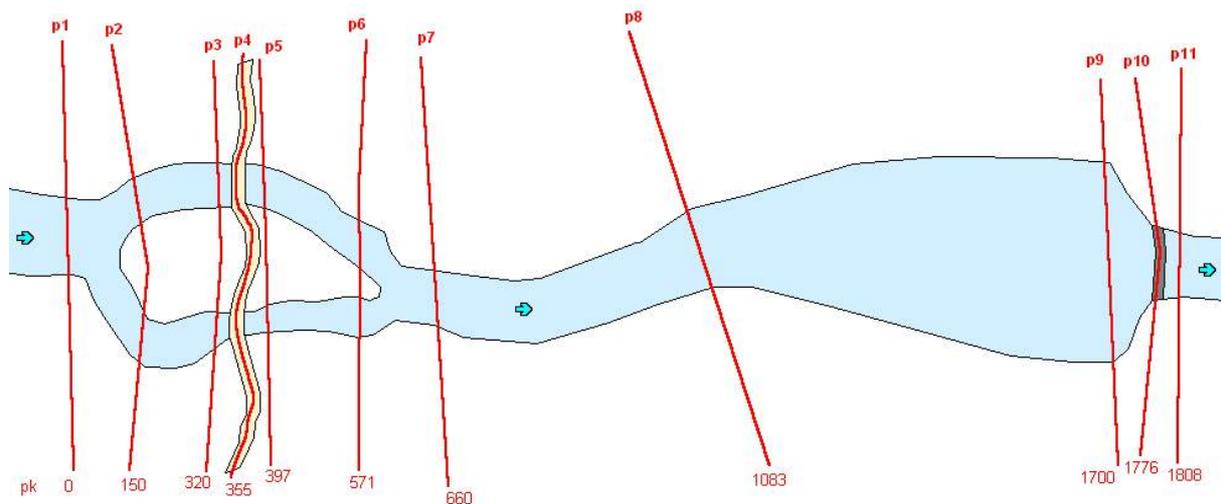


Figure 12 - Principe de localisation des profils en travers en rivière.

Après avoir défini le positionnement des profils, il faut déterminer leur géométrie. Pour cela, de nombreuses méthodes existent ; seules les techniques utilisées sont présentées ci-dessous.

a) La Photogrammétrie ou modèle numérique de terrain (MNT)

La photogrammétrie est une technique de mesure de la forme et de la position d'objets à partir de photographie. Elle fournit la plupart des données topographiques nécessaires aux modélisations numériques. Cette technique consiste à obtenir des plans topographiques à partir de la digitalisation de plans papiers eux mêmes issues de plusieurs orthophotographies. Il est concevable que certaines parties de la topographie issues de photographies aériennes soient incomplètes car inaccessibles (comme les surfaces en eau et les forêts) ; les données correspondantes sont recueillies via des levés terrestres complémentaires.

La position des points destinés à constituer le modèle numérique de terrain, est déterminée grâce à plusieurs étapes.

La photographie aérienne subit une stéréopréparation qui permet de déterminer des coordonnées planimétriques et altimétriques d'un ensemble de points destiné à servir de référence : c'est le canevas du géomètre. Il permet dans la phase suivante, l'aérotriangulation, de calculer les coordonnées planimétriques et altimétriques des points couples stéréoscopiques (points qui permettent à l'ordinateur de fusionner deux photographies en faisant ressortir le relief). Les points calculés forment le canevas photogrammétrique. C'est à partir de ce dernier canevas que se fait la restitution photogrammétrique. En choisissant une densité de points suivant l'échelle du plan photogrammétrique choisi, cette phase permet de calculer la trame du MNT (1 point par ha pour une échelle de plan de 1/5000^e ou 4 points par ha pour une échelle de plan de 1/2000^e). Le plan final présente, en plus des courbes de niveaux et des limites des objets topographiques (bois, réseaux hydrographiques, damier parcellaire, voiries, occupations urbaines, etc.), un réseau de points cotés permettant par triangulation d'obtenir les coordonnées planimétriques et altimétriques de tous les points quelconques de la vallée (Figure 13).



Figure 13 – Rendu cartographique d’un Modèle Numérique de Terrain.

Cette technique est particulièrement intéressante pour disposer de points en lit majeur mais du fait de la taille de la trame, le lit mineur des MNT n’est pas représentatif. De même les ouvrages d’art ne sont pas correctement levés. Il faut donc compléter le MNT par des levés sur le terrain.

b) Levés terrestres.

Les techniques sont aussi nombreuses qu’il existe d’instruments (théodolite, tachéomètre, laser, GPS, bathymétrie par sonar, etc.). Lors de nos campagnes de terrain, seule la méthode de nivellement avec un théodolite a été utilisée. Cet outil permet, via des mesures d’angle et de distance, de calculer la hauteur des points visés au sol, relevés par un cheminement.

Nous avons utilisé deux appareils distincts : un théodolite Wild T2 couplé à un distancemètre et un géodimètre 4000 (Photographie 1). Ces deux appareils donnent des données différentes dont résulte un traitement distinct (Figure 14). (Annexe III – feuille d’acquisition des données pour le t2 et le 4000)



Photographie 1 – Exemple d'utilisation d'un théodolite.

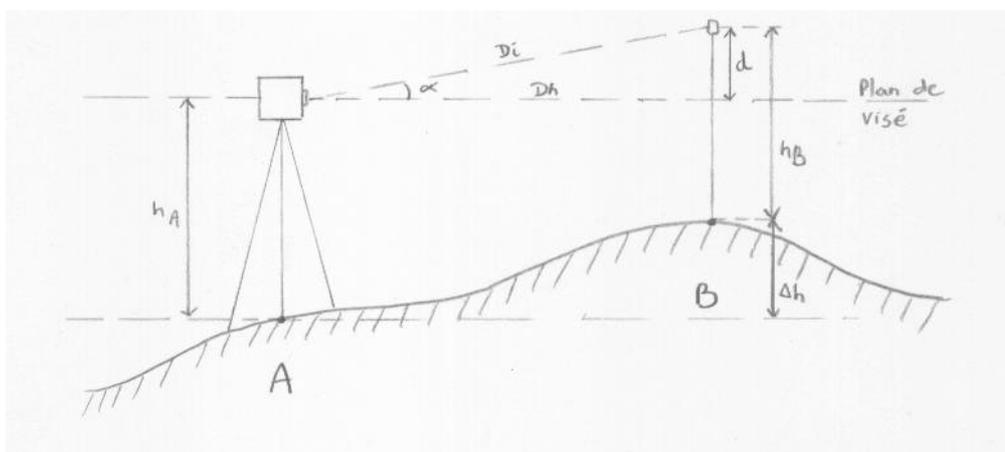


Figure 14 – les différentes données mesurées par un théodolite.

D_i : distance inclinée, D_h : distance horizontale, α : angle vertical, d :dénivelée.

Le théodolite T2 permet une lecture de l'angle vertical α (en grades) et le distancemètre donne la distance inclinée D_i . Un angle vertical supérieur à 300 grades indique une visée ascendante et une dénivelée d positive. Un angle vertical inférieur à 300 grades indique une visée descendante et une dénivelée d négative.

Le géodimètre 4000 donne la dénivelée d avec son signe et la distance horizontale D_h .

Le rattachement du nivellement se fait sur les repères du système géodésique français (Photographie 2) installés par IGN (Institut Géographique National). Ils sont répertoriés sur la base de données Internet de l'IGN. L'altitude donnée est celle du système en vigueur : le NGF IGN 69. (Annexe III – Exemple de fiche IGN)



Photographie 2 - Repère de Nivellement de l'IGN.

Les techniques de nivellement sont différentes suivant la position des points :

- L'instrument est placé sur un des points :

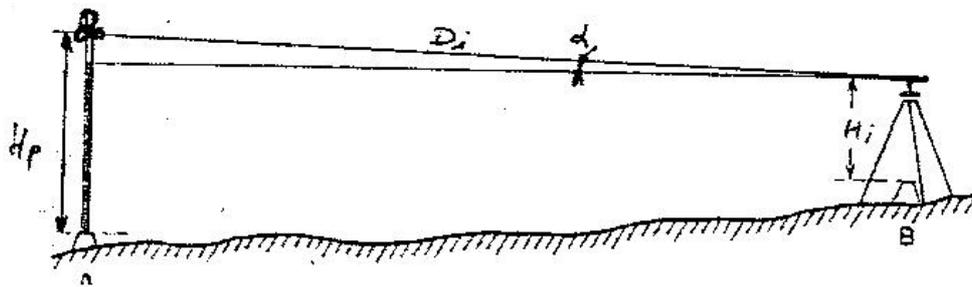


Figure 15 – Théodolite placé sur un des points.

$$Z_A = Z_B + H_i \pm D_i \sin \alpha - H_p$$

Avec Z_B : altitude du point B, H_i : hauteur de l'instrument au dessus du point B, α : angle vertical, D_i : distance inclinée, H_p : hauteur du prisme et Z_A : altitude du point A.

- L'instrument est placé entre les deux points :

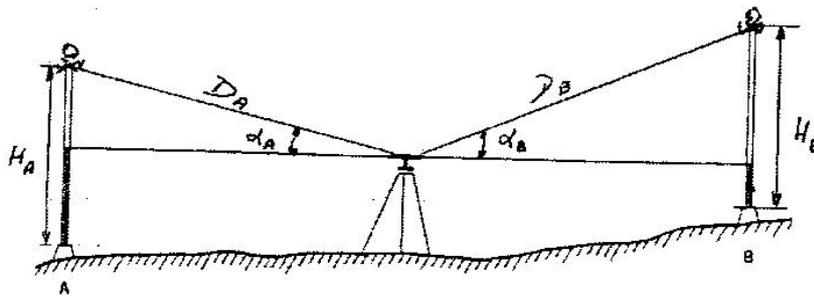


Figure 16 – Théodolite placé entre les deux points.

$$Z_B = Z_A + H_A \pm D_A \sin \alpha_A \pm D_B \sin \alpha_B - H_B$$

Avec Z_A : altitude du point A, H_A : hauteur de prisme sur A, α_A : angle vertical vers A, D_A : distance inclinée vers A, Z_B : altitude du point B, H_B : hauteur de prisme sur B, α_B : angle vertical vers B, D_B : distance inclinée vers B.

- L'instrument est placé derrière les points :

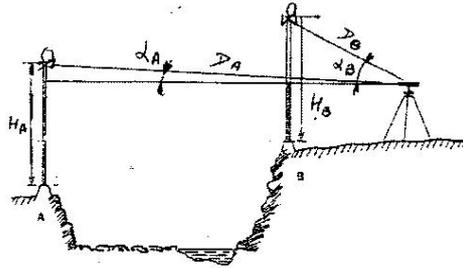


Figure 17 –Théodolite placé derrière les points.

$$Z_B = Z_A + H_A \pm D_A \sin \alpha_A \pm D_B \sin \alpha_B - H_B$$

Avec Z_A : altitude du point A, H_A : hauteur de prisme sur A, α_A : angle vertical vers A, D_A : distance inclinée vers A, Z_B : altitude du point B, H_B : hauteur de prisme sur B, α_B : angle vertical vers B, D_B : distance inclinée vers B.

- Le nivellement par cheminement.

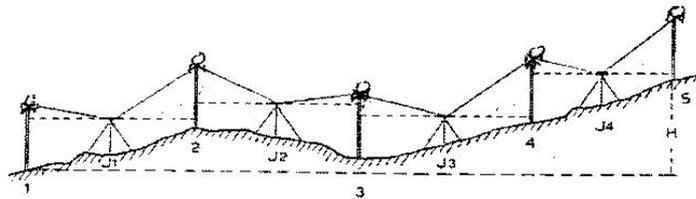


Figure 18 - Le nivellement par cheminement.

Il est utilisé pour rattacher un ensemble de points à un repère éloigné. Par convention, la première lecture d'un point est appelée lecture arrière et la seconde, lecture avant. Il est théoriquement obligatoire de fermer un cheminement sur un point d'altitude connue. On obtient alors une différence entre l'altitude référencée et l'altitude mesurée. Cette différence est appelée fermeture. Si la fermeture est dans la marge d'erreur de la mesure, il convient de compenser cette erreur négligeable sur l'ensemble des points. Si la fermeture est trop importante, les mesures sont à reprendre.

- Le nivellement de profils en travers.

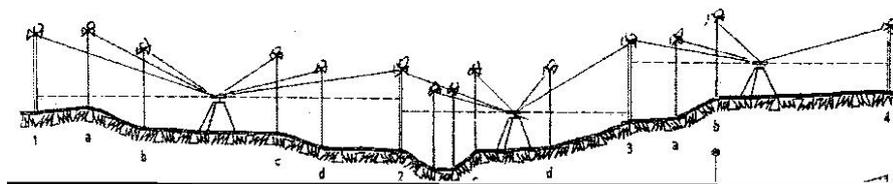


Figure 19 - Le nivellement de profils en travers.

C'est la méthode la plus utilisée. C'est un peu un mélange de toutes les autres. Elle nous permet d'établir les profils « routes » (Figure 20). Ces profils sont des profils terrains qui traversent toute la vallée. Ils permettent de compléter le MNT au niveau des routes et des ponts.

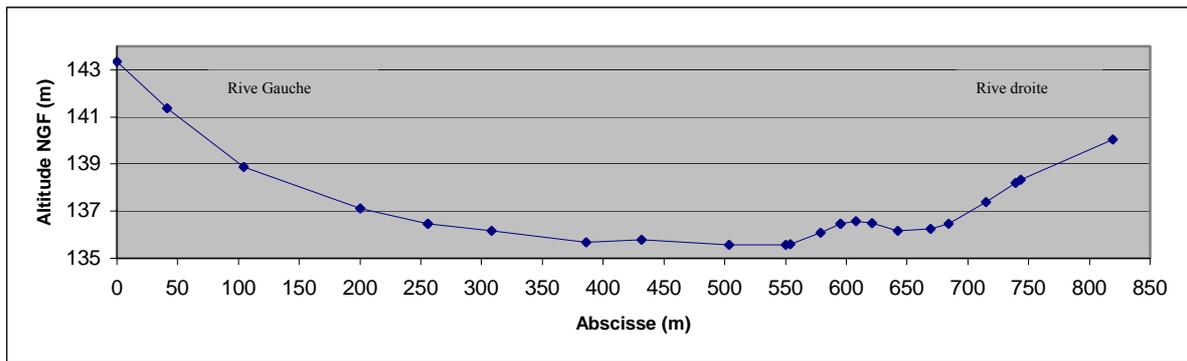


Figure 20 – Exemple de profil route réalisé lors de la campagne de terrain sur l’Aire.

c) Levés Bathymétriques.

Un levé bathymétrique est un levé topographique du lit en eau des rivières. Il se réalise en bateau. Comme la profondeur de l’Aisne et de l’Aire n’excède pas trois mètres, la méthodologie est la même que pour les levés terrestres. Avec un bateau pneumatique, on mesure des profondeurs avec la canne surmontée du prisme grâce au théodolite. Les points de mesure suivent un profil matérialisé en surface par une corde tendue (Photographie 3).



Photographie 3 – Exemple de levé topographique en rivière (bathymétrie).

Les profils ainsi réalisés sont relativement précis et permettent de palier aux défauts du MNT pour le lit mineur (Figure 21).

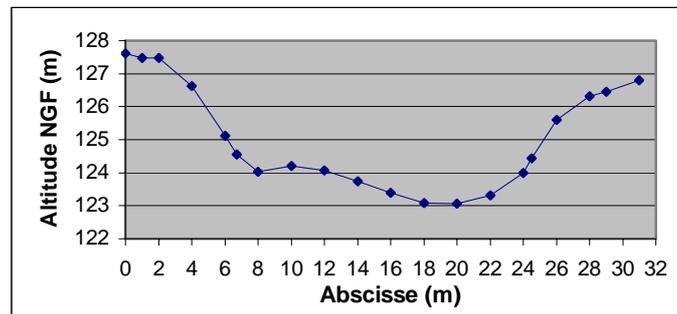


Figure 21 - Exemple de profil rivière : l'Aire à l'usine hydroélectrique de Fléville (08).

d) Ouvrages d'art.

Les ponts, les barrages, les seuils, les ouvrages de décharges et tous les autres aménagements anthropiques ont une action non négligeable sur l'écoulement. Il faut donc obtenir le maximum d'informations à leurs sujets. Souvent, ces ouvrages ont fait l'objet d'un relevé à l'issue de leur exécution (Plan de recollement)(Figure 22).

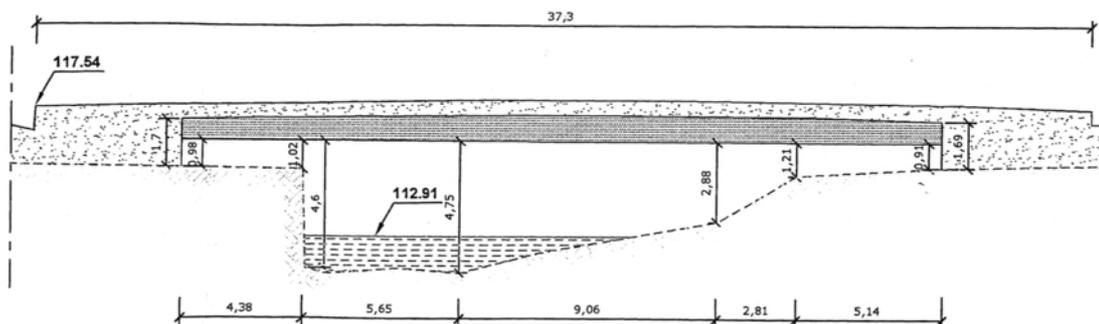


Figure 22 – Plan de pont réalisé par un géomètre (FAUQUEMBERG LEMAIRE, Géomètres Experts).

Parfois l'absence de plans ou des modifications récentes des ouvrages qui les rendent caduques, oblige le relevé de ces ouvrages. Il est nécessaire de prendre tous les paramètres utiles pour la modélisation (largeur et forme des piles, épaisseur des tabliers, point de référence lors du chaînage du pont, largeurs des buses, hauteurs amont et aval des seuils et vanne, dimension des vannes, hauteur de crêtes des seuils et barrages) et de réaliser des photographies des deux rives et des deux faces pour posséder une vue d'ensemble de l'ouvrage.

Pour la modélisation sous Mascaret, les ponts doivent subir un traitement particulier. C'est la réalisation de la fente de Preissmann (Figure 23).

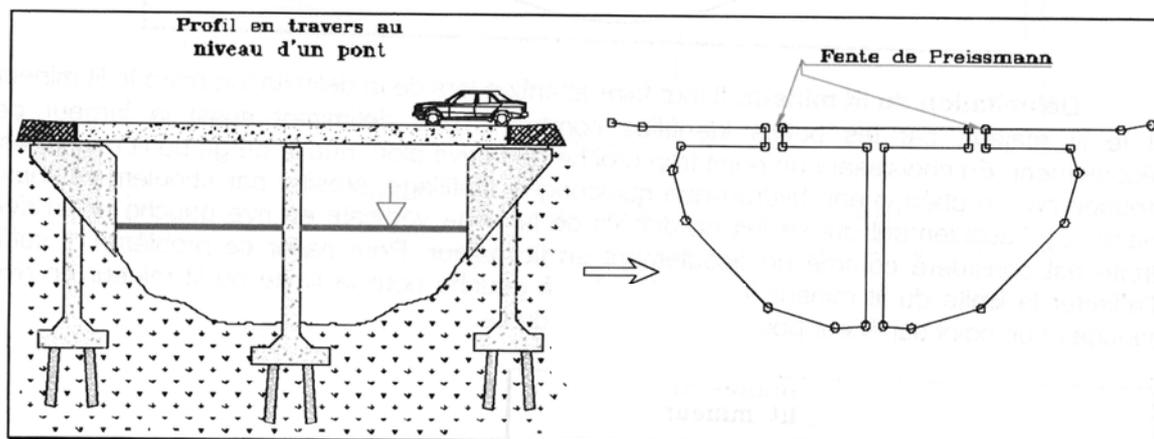


Figure 23 – Représentation d'un pont avec une fente de Preissmann (Guide Méthodologique LIDO 2.0).

La fente de Preissmann est une coupure (de largeur généralement prise égale à 0.01m) au niveau de la clé de voûte de l'ouvrage. Elle permet au calcul de rester dans le cadre de ces hypothèses (surface libre) tout en modélisant les pertes de charge liées à l'ouvrage (contraction de l'écoulement).

4) Collecte des informations sur l'écoulement.

Après avoir pris connaissance de la géométrie du cours d'eau, il faut à présent connaître l'écoulement qui s'y produit. Il est nécessaire de reproduire le plus fidèlement possible le comportement hydraulique de la rivière. Pour cela, l'étude des événements passés est indispensable.

a) Etude hydrologique.

Plusieurs études hydrologiques ont été réalisées dans le bassin versant amont de l'Aisne et de l'Aire. Le paragraphe suivant synthétise les connaissances actuelles. Elles ont pour objectif de définir les débits qui seront pris en compte dans l'étude.

Trois crues sont précisément connues dans le bassin : janvier 1993, décembre 1993 et janvier 1995. Dans les trois cas, les crues surviennent en période hivernale lors de circonstances météorologiques particulières. Ces trois crues ont été provoquées par l'arrivée de trains de perturbations océaniques rapides qui provoquent un important cumul de précipitations. Une forte période de pluviosité entraîne la saturation des sols et la pointe de crue est alors provoquée par un pic de précipitation exceptionnel plus ou moins homogène sur l'ensemble du bassin versant.

Le déroulement des crues présentes aussi quelques similarités. Dans les trois cas, on remarque un temps de réaction rapide du bassin de l'Aire et un rôle non négligeable des affluents. En effet ces derniers semblent conditionner la propagation et l'ampleur de l'onde de crue. Les affluents de l'ouest sont en général synchrones avec l'Aisne, leurs hydrogrammes mettent en évidence des montées de crue assez lentes. En revanche, les affluents à l'est de l'Aisne montrent des montées de crues très rapides et accélèrent la montée des eaux à l'aval de leur confluence avec l'Aisne ou l'Aire.

En étudiant les autres crues, on démontre que lors des inondations, l'Aisne et l'Aire présentent une montée de crue généralisée sur l'ensemble du bassin versant, en réponse à des épisodes de pluies assez homogènes. Ainsi, ce sont les fortes quantités de pluies, intenses sur de courtes périodes ou cumulées sur de longues périodes, qui saturent les sols et favorisent la genèse des crues. La montée des eaux, relativement rapide, est favorisée par la présence de relief et de pentes importantes sur l'amont du bassin. L'occupation du sol, majoritairement rural (prairie), présente peu d'obstacle à l'écoulement.

Suite à cette analyse et grâce aux mesures des stations hydrologiques et à l'ajustement de la loi de Gumbel, on obtient les débits caractéristiques de pointes en fonction des périodes de retour (Tableau 3).

Le traitement statistique des données par un ajustement à une loi de Gumbel permet d'obtenir des débits de crue assez fiables pour des périodes de retour n'excédant pas 2 fois le nombre d'années de mesure. Ainsi dans le cas de l'Aisne amont, on pourra déterminer les débits de crue jusqu'à une période de retour $T = 70$ ans.

Cours d'eau	Station	Période de retour							Q100/Q10
		2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	30 ans	50 ans	100 ans	
Aisne	Passavant	24	36	43	52	57	63	71	1.63
	Mouron	140	205	249	293	320	354	399	1.6
Aire	Varenes	79	110	131	155	169	186	201	1.6
	Chevières	101	137	161	193	211	233	264	1.64

Tableau 3 – Débits de pointe caractéristiques (m³/s)

Pour l'Aisne amont et l'Aire, la crue de décembre 1993 est de référence car c'est l'inondation la plus importante et la plus récente sur le secteur. Il convient donc de se renseigner sur la crue et de réaliser une étude hydrologique pour connaître le comportement de l'écoulement.

De nombreuses stations hydrométriques sont dispersées dans le bassin de l'Aisne amont et de l'Aire. Pour notre étude, seules quatre nous intéressent.

- Varenes (Aire)
- Chevières (Aire)
- Passavant en Argonne (Aisne)
- Mouron (Aisne)

- Crue de Calage : décembre 1993

Nous disposons pour la crue de calage de décembre 1993 des débits journaliers à chaque point de mesure ainsi que du débit maximum instantané qui correspond au maximum de crue (Tableau 4). (Annexe V – Données hydrologiques)

Nom de la Station	Débit (m ³ /s)	Jour de la pointe de crue
Varenes	145	21/12/1993
Chevières	190	21/12/1993
Passavant en Argonne	44.8	20/12/1993
Mouron	297	21/12/1993

Tableau 4 – Débits maximums de la crue et dates correspondantes.

On remarque pour la crue de décembre 1993 une bonne concomitance des maximums de crue entre l'Aisne et l'Aire (Figure 24).

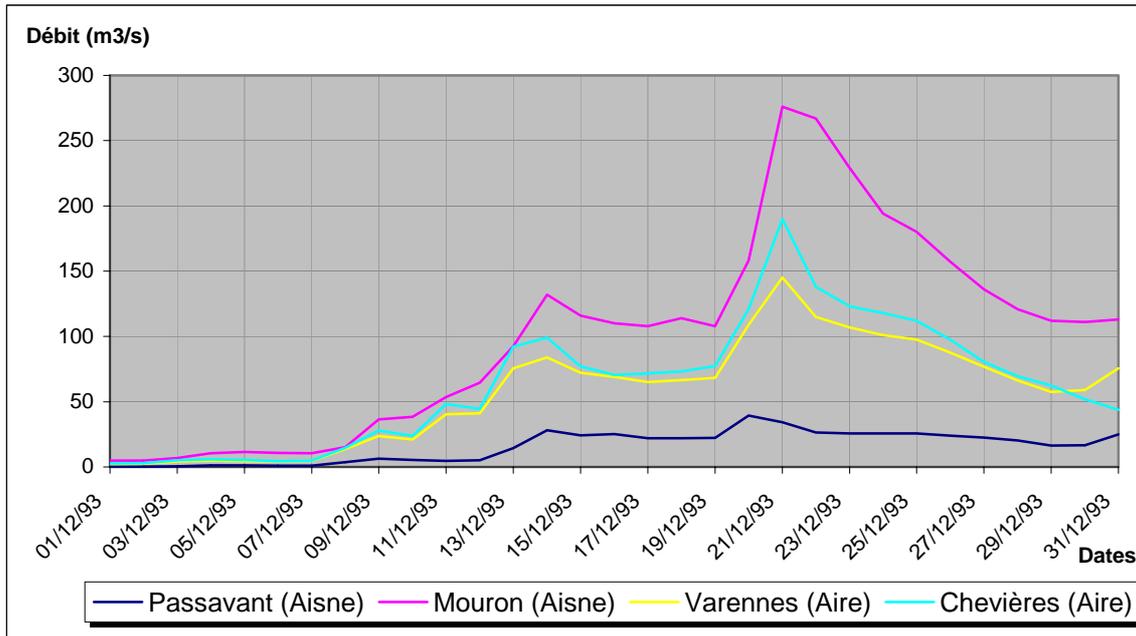


Figure 24 – Hydrogramme de la crue de décembre 1993.

Débit de la crue de décembre 1993 pour l'Aisne.

Le problème qui se pose pour l'Aisne, c'est la distance entre la station hydrométrique et le point amont de notre étude. En effet, il y a entre Passavant-en-Argonne et la ferme d'Yvoy un linéaire de 35 km. De plus l'Aisne conflue dans cette zone avec cinq affluents de débits différents non négligeables. La nuance entre ces affluents et les disparités des caractéristiques du terrain sur le bassin versant nous obligent à partir de l'aval pour obtenir le débit amont de la zone d'étude pour la crue de calage de décembre 1993.

Du fait de la bonne simultanéité des maximums de crue, on estime que le débit de l'Aisne à Mouron est la somme des débits de l'Aire et de l'Aisne à la confluence. Or, il n'y a pas d'apport significatif entre Chevières et Mouron sur l'Aire. Nous pouvons donc en déduire que le débit de l'Aire lors de la crue de décembre 1993 avant la confluence est le même que celui à Chevières soit 190 m³/s. Par déduction, le débit de l'Aisne avant confluence correspond à la différence soit 107 m³/s.

On utilise ensuite la formule de Myer. Cette formule donne le débit à l'exutoire d'un sous bassin versant en fonction de sa surface et des caractéristiques du bassin dont il fait partie.

Formule de Myer :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{S_1}{S_2} \right)^{0.8}$$

- Avec Q1 le débit recherché
- S1 la surface du sous-bassin correspondant
- Q2 le débit à l'exutoire du bassin versant principal
- S2 la surface du bassin versant principal

Bassin Versant	Surface (Km²)
Aisne à Mouron	2280
Aisne avant la confluence	1227
Aire avant la confluence	1043
Aisne à la ferme d'Yvoy	1065
Aisne à Passavant-en-Argonne	223

Tableau 5 – Surface des différents sous-bassins versants de l'Aisne

On obtient après calcul un débit pour l'Aisne à la Ferme d'Yvoy de 95.5 m³/s

Il existe deux affluents qui confluent dans la zone d'étude. La Dormoise en rive gauche et le ruisseau des Bièvres en rive droite. Malgré son plus faible linéaire (10 km contre 17 km), le ruisseau des Bièvres reçoit plus de précipitation et présente un débit de 7 m³/s lors du maximum de crue de décembre 1993 (calculé grâce à la formule de Myer). La Dormoise apporte le débit restant soit 4.5 m³/s.

Débit de la crue de décembre 1993 pour l'Aire.

Contrairement à l'Aisne, l'Aire possède une station hydrométrique quelques kilomètres en amont et une autre station peu avant la confluence. Il existe aussi trois affluents rive droite entre ces deux stations qui font passer le débit de 145 m³/s (Varenes en Argonne) à 190m³/s (Chevières).

Il nous faut donc calculer les débits d'apport de ces trois affluents pour délimiter les trois sections de notre étude :

- d'Apremont (limite départementale) jusqu'à la confluence avec l'Exermont,
- de la confluence avec l'Exermont jusqu'à la confluence avec l'Argon,
- de la confluence avec l'Argon à la confluence avec l'Aisne.

Bassin Versant	Surface (Km²)
Bassin total de l'Aire	1043
Aire à Chevières	1000
Argon	153
Aire après confluence avec l'Exermont	799.6
Aire à Apremont	754.5
Aire à Varenes en Argonne	627

Tableau 6 – Surface des différents sous bassin versant de l'Aire.

Toujours en utilisant la formule de Myer, on calcule le débit d'entrée de la zone d'étude (Apremont) soit 151.7 m³/s puis respectivement les débits d'apport des affluents pour la crue de décembre 1993 (6.7 m³/s pour la Buanthe, 7.2 m³/s pour l'Exermont et 31.1 m³/s pour l'Argon).

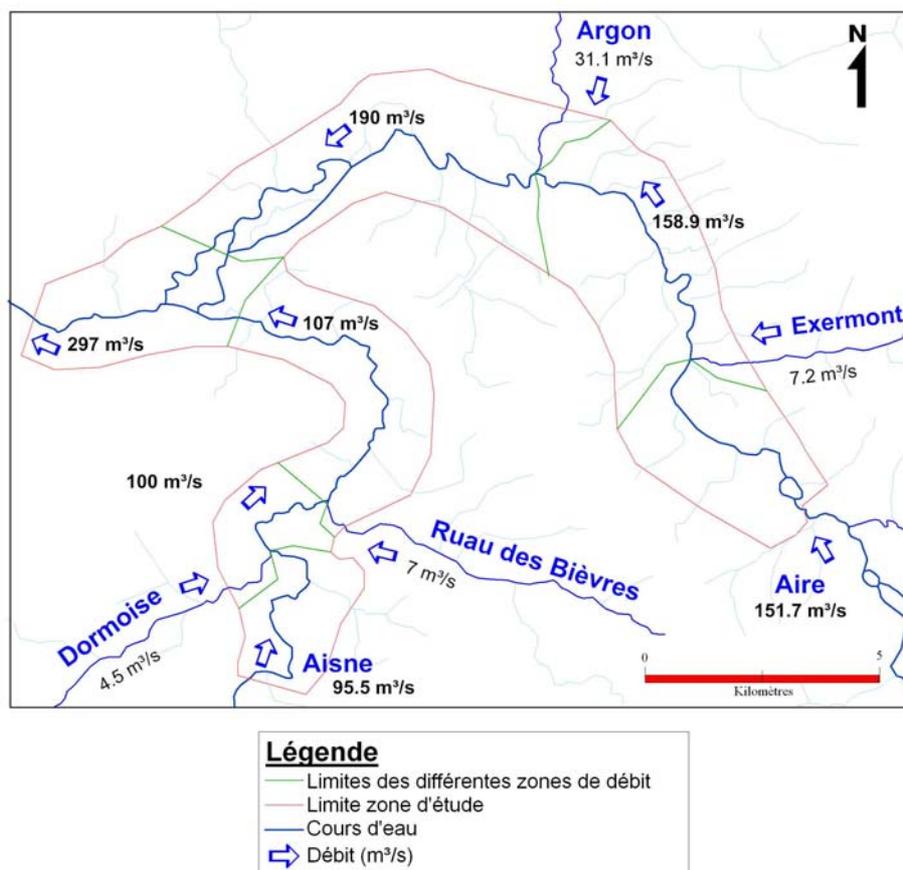


Figure 25 – Les différents débits de la zone d’étude pour la crue de décembre 1993.

- Crue de référence, Q_{100} Statistique.

Comme dit dans la circulaire du 14 janvier 1994, l’événement de référence à retenir pour le zonage doit être la plus forte crue connue seulement si celle-ci est de temps de retour, au plus, plus que centennale (c’est-à-dire que la crue de référence doit posséder une période de retour d’au moins 100 ans). Cependant, comme le précise le tableau 3, le débit de la crue de décembre 1993 correspond à un débit proche du débit caractéristique de période de retour 20 ans (Q_{20}). Ne disposant d’aucune mesure de débit supérieur, on utilisera le débit Q_{100} extrapolé par une loi de Gumbel (tableau 3 et 7).

Nom de la Station	Debit (m^3/s)
Varenes (Aire)	201
Chevières (Aire)	264
Passavant en Argonne (Aisne)	71
Mouron (Aisne)	399

Tableau 7 – Débits caractéristiques de la crue centennale statistique.

On utilise encore la formule de Myer pour calculer les débits centennaux des zones de la figure 24.

On obtient un débit pour l’Aisne à la Ferme d’Yvoy de $120.5 m^3/s$ avec ensuite un apport de $5.7 m^3/s$ par la Dormoise et un apport de $8.8 m^3/s$ pour le ruisseau des Bièvres. Le débit avant la confluence est de $135 m^3/s$.

Pour l'Aire, le calcul donne un débit d'entrée à Apremont de 210.7 m³/s. Les débits d'apport des affluents sont de 10.1 m³/s pour l'Exermont et de 43.2 m³/s pour l'Argon. Avant la confluence, le débit est donc porté à 264 m³/s.

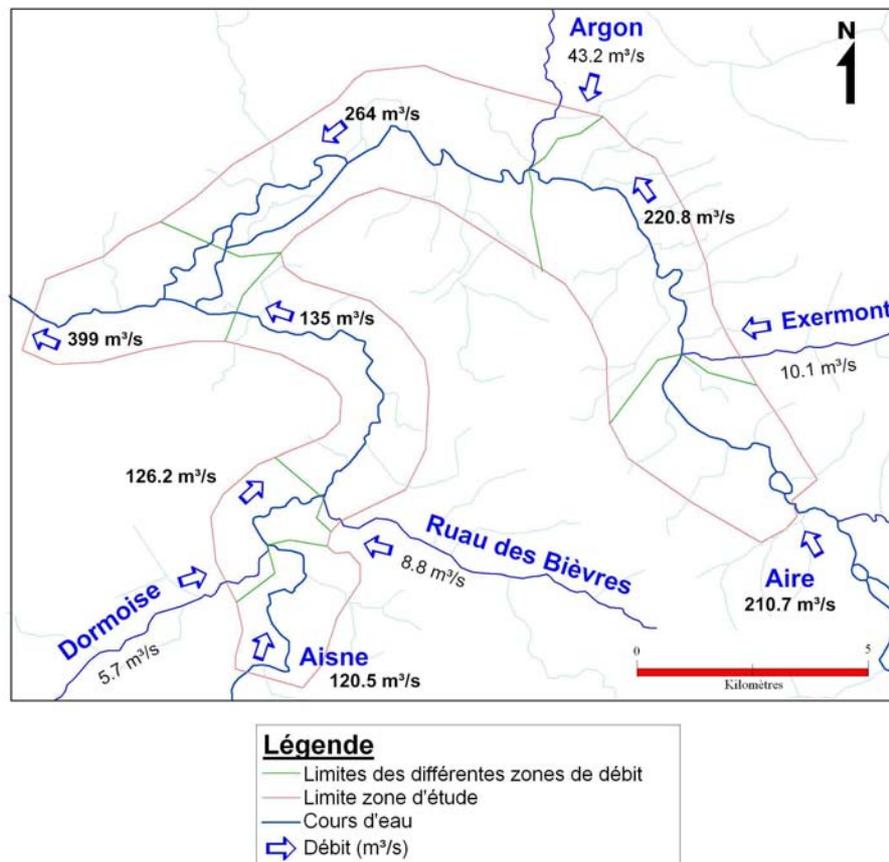


Figure 26 - Les différents débits de la zone d'étude pour la crue de projet Q₁₀₀.

b) Enquête de terrain.

- Détermination des paramètres hydrauliques.

L'écoulement est un mouvement d'un corps fluide (l'eau) sur un corps solide (la vallée). Comme tous mouvements, les écoulements sont soumis à la loi de la gravité universelle et à la friction des corps entre eux. Cette force de frottement est caractérisée en hydraulique par le coefficient de Manning - Strickler (le premier étant l'inverse du second). Le logiciel de modélisation Mascaret utilise le coefficient de Strickler. Ce coefficient caractérise l'occupation du sol, au lieu de l'écoulement, en fonction de sa capacité à le ralentir. Plus le coefficient est élevé plus l'écoulement se réalise « sans difficulté » (Tableau 8).

Lors de la phase de terrain, il est important de bien assimiler l'occupation du sol pour définir les coefficients de frottement dans le lit mineur et dans le lit majeur.

Autre paramètre à prendre en compte, les zones de stockages. Ce sont des zones qui lors de crues seront submergées mais qui ne participeront pas à l'écoulement.

Nature de la surface de l'écoulement	Coefficient de Strickler (K)
<p>Petit cours d'eau de largeur inférieur à 30 m</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>Cours d'eau de Plaine</i> <ul style="list-style-type: none"> Net, droit, niveau d'eau élevé, peu de variation de la section mouillée 30 à 40 Idem, mais pierres et mauvaises herbes plus nombreuses 30 Net, Sinueux avec seuils et mouilles 25 Idem, mais pierres et mauvaises herbes 20 Idem, mais niveau bas 20 Cours paresseux, mauvaises herbes, trous d'eau profonds 15 Nombreuses mauvaises herbes et nombreux trous d'eau 10 Pentes et fond irrégulier, nombreuses souches, arbres et buissons, arbres tombés dans l'eau 5 à 7 • <i>Cours d'eau de montagne</i> (Pas de végétation dans le lit, rives escarpées, arbres et broussailles pour les niveaux élevées) <ul style="list-style-type: none"> Fond en gravier et cailloux, peu de gros galets 25 Fond avec gros graviers 20 	
<p>Plaines d'inondation</p> <ul style="list-style-type: none"> Pâturages sous broussaille 30 à 35 Zones cultivées, absences de récoltes 35 Zones cultivées, récoltes sur pied 25 à 30 Broussailles dispersées et mauvaises herbes ou broussailles et arbres en hiver 20 Quelques arbres et broussailles en été ; broussailles moyennes ou denses en hiver 15 broussailles moyennes ou denses en été 10 souches d'arbres sans rejets 25 souches d'arbres avec rejets durs 16 forêt de hautes futaies, peu de broussailles 10 forêt de hautes futaies, peu de broussailles avec eau atteignant les branches 8 Souches denses 7 	
<p>Grand Cours d'eau (largeur maximale supérieur à 30 m)</p> <ul style="list-style-type: none"> Section régulière sans broussailles 25 à 40 Section irrégulière et rugueuse 10 à 25 	

Tableau 8 – Estimation du coefficient de Strickler (source CEMAGREF).

- Collecte des témoignages de crues

Pour bien connaître le fonctionnement hydraulique de la rivière, la compréhension des phénomènes passés est importante. On connaît beaucoup de choses sur le débit et la morphologie de la rivière mais malgré cela on ne peut être sûr des hauteurs d'eau obtenues lors des crues. Seules des informations obtenues sur place sont capables de répondre à nos questions. Ce sont les témoignages et les laisses de crues.

Les témoignages proviennent de plusieurs sources : photographies, photographies aériennes, archives, témoignages directs des populations (Photographie 4). Tous ces documents renseignent sur l'existence même des crues et sur les niveaux atteints.



Photographie 4 – Exemple de témoignage : Niveau d'eau atteint par l'Aire à Grandpré (08) lors de la crue de 1993

Les laisses de crues sont des marques qui définissent le niveau maximal atteint par l'eau. On peut en définir trois sortes : les plaques posées directement après la crue (Photographie 5), les marques, coup de crayon ou de peinture montrant le maximum de l'inondation et les laisses de crues issues des témoignages.

Ces informations sont capitales. Il faut en récupérer le plus possible car elles sont indispensables au bon déroulement de la modélisation. En effet, les laisses de crues montrent les niveaux réellement atteints. Pour la crue de décembre 1993, les laisses permettent de définir les hauteurs d'eau qui correspondent aux débits mesurés lors de la campagne hydrologique.



Photographie 5 –Plaque indiquant le niveau maximal d'une crue de 1955 sur un pont de l'Aire.

L'approche historique de l'hydrologie du bassin versant est indispensable. Dans un premiers temps, il faut être sûr qu'il n'ai jamais existé sur l'Aisne amont de crue de débit centennal ou plus que centennal. Ensuite, toutes les informations relatives à d'autres inondations peuvent être intéressantes. En effet, on peut être amené à vérifier la modélisation en entrant les caractéristiques d'une autre crue : la ligne d'eau obtenue doit alors être semblable à celle formée par les laisses de cette autre crue. Cependant, cette approche n'a pas été réellement menée sur l'Aisne amont car la recherche des informations historiques sur l'Aisne aval n'a donné que peu de résultats. Partant de ce constat, il n'y a pas de raison pour qu'il existe plus d'informations dans l'Aisne amont.

5) Synthèse des données de l'Aisne amont dans les Ardennes.

Sur le secteur d'étude, le linéaire principal cumulé de l'Aisne et de l'Aire est de 52 kilomètres. Malgré la mise à disposition par la DDE des Ardennes des MNT couvrant les deux vallées, il a fallu trois semaines de terrain pour établir les compléments dans les lits mineurs et aux niveaux des ponts. À trois semaines d'acquisition de données font suite un long temps de traitement et de formatage en vue de la modélisation. C'est pourquoi je me suis concentré sur 20 kilomètres de linéaire pour établir l'atlas sur cette zone.

a) Géométrie et profil.

Le secteur modélisé, lors du stage au LRPC, s'étant de la limite départementale avec la Marne (51) et le village de Sénuc juste avant la confluence avec l'Aire (Secteur limité par la traversée de l'Aisne par la Route Départementale 6). La limite aval est fixée à Sénuc car la confluence est modélisable seulement si les cours d'eau confluent sont modélisés.

Dans cette zone, l'Aisne possède deux affluents : La Dormoise et le ruisseau des Bièvres. La largeur de la vallée est relativement constante et le cours d'eau méandre dans le val suivant une pente faible (0.8 ‰). Il existe quatre ponts et on observe très peu d'habitat dans la vallée.

Nous avons défini 27 profils en travers situés à des endroits stratégiques sur le tracé du cours d'eau. Trois profils pour chaque pont (profil amont, profil pont, profil aval), des profils pour les singularités d'Autry et quelques autres profils pour posséder un rendu homogène de la géométrie de la vallée (Figure 28).

Pour chaque profil, tous les points sont référencés en XY Lambert I Nord, ainsi qu'en Z NGF 69. On trouve deux autres informations : la distance cumulée à partir du 0 du profil et les informations définissant les limites du lit mineur. (Annexe III – table XLS prête à être importée dans Mascaret). Enfin, chaque profil est représenté graphiquement sous un logiciel tableur (Figure 27).

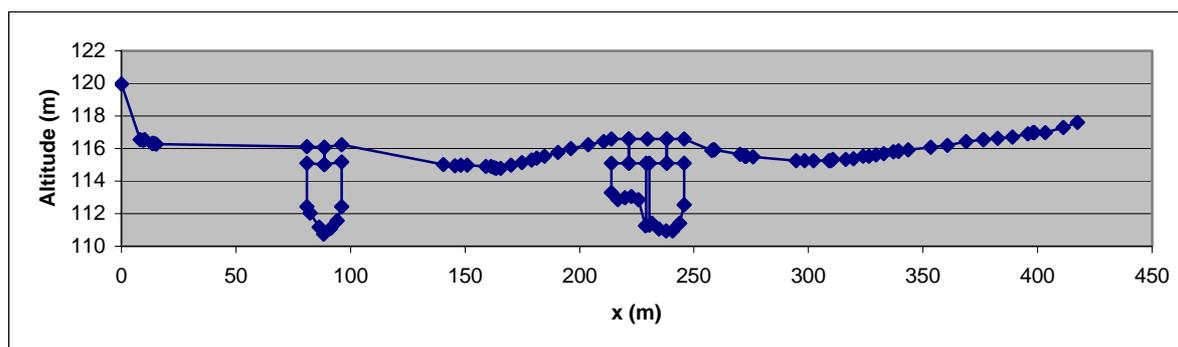


Figure 27 – Exemple de profil fini, prêt à être importé dans Mascaret : RD21 à Autry.

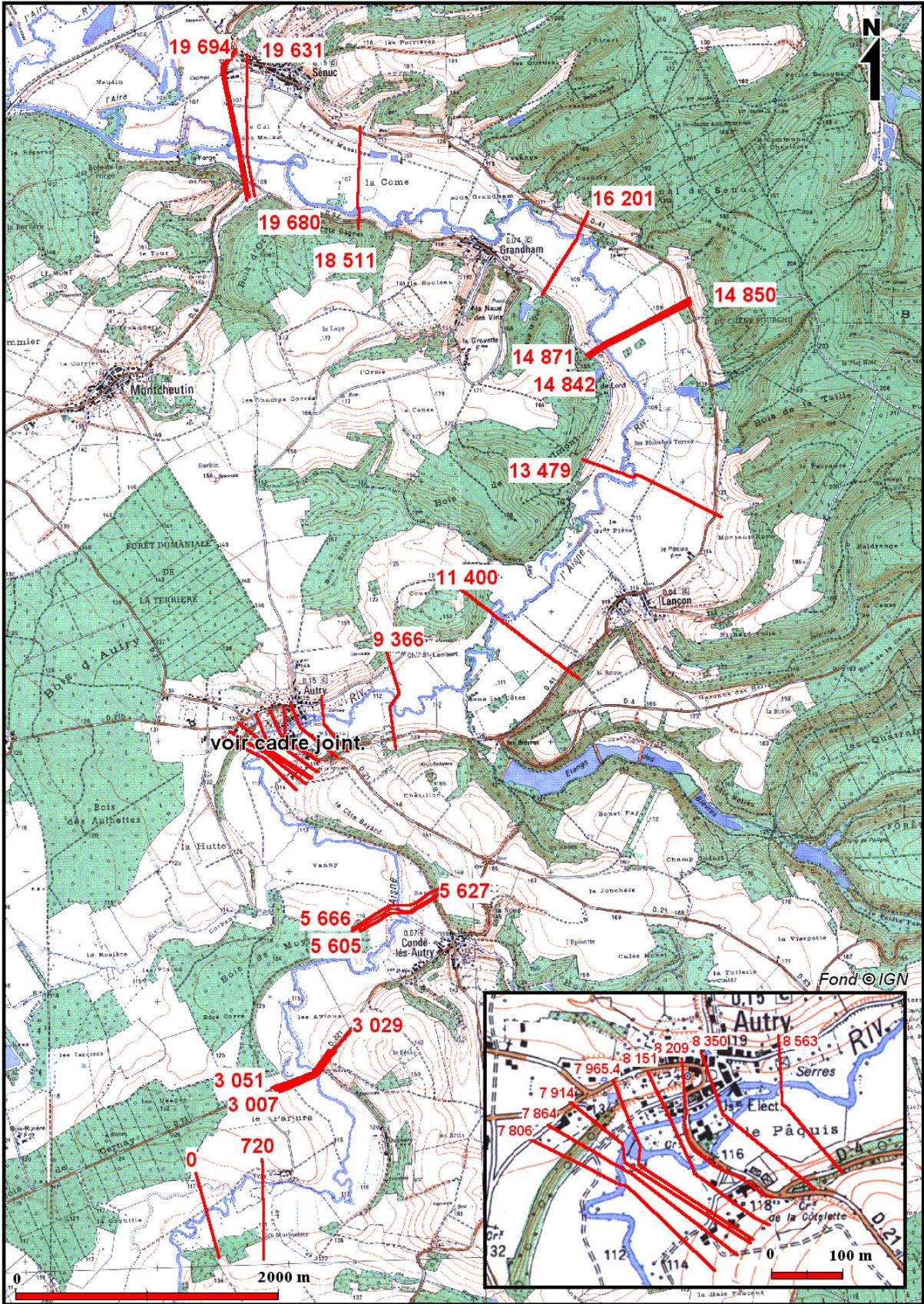


Figure 28 – Position et PK des profils sur l’Aisne amont.

Le passage d'Autry possède la particularité d'avoir deux biefs dont un perché pour alimenter une usine hydroélectrique. Ces deux biefs, séparés par des déversoirs latéraux, traversent le village d'Autry sur 600 mètres et passent sous les ponts de la route départementale 21. Ce genre de configuration est appelé une coupure hydraulique. En effet, à cet endroit, la hauteur d'eau est fixée par les deux déversoirs : il n'y a pas de relation entre les hauteurs amont et aval des ouvrages.

b) Zone de frottement.

Comme vue précédemment, le frottement est défini par les coefficients de Strickler. Ils prennent en compte l'occupation du sol ainsi que tous les obstacles présents dans le lit majeur. En moyenne, dans le lit majeur, ce coefficient est de 15 et pour le lit mineur, il se situe entre 20 et 30 selon les sections.

Il est parfois obligatoire de modifier ces coefficients pour prendre en compte une perte de charge ou une singularité.

c) Laisse de crue.

Pour récolter le plus possible d'information et pour impliquer les communes dans l'étude, nous avons rencontré tous les élus des communes riveraines de l'Aisne et de l'Aire. Ceci dans un but précis, l'information venant des mairies, il sera difficile pour les maires de contredire l'atlas des Zones Inondables.

Nous avons trouvé 11 laisses de crue sur l'Aisne entre la ferme d'Yvoy et Sénuc. Après nivellement et recoupement des témoignages, seul huit ont été retenus (tableau 9).

PK (m)	Altitude (m)	Nom de la Laisse
8209	115.15	Autry Camping
8209	114.993	Autry Piquet
8209	115.08	Autry pont canal
8350	114.52	Autry Usine
13109	111.111	Le Paquis
15971	109.377	Piquet Malassises
15971	109.517	Malassises bateau
19680	108.5	Sénuc

Tableau 9 – Positions et Altitudes des laisses de crue de 1993.

De plus sur ces huit laisses, certaines se situent sur les même profils. Elles donnent alors une fourchette dans laquelle devra passer la ligne d'eau calculée par le modèle. En amont du point kilométrique 8209, il n'existe pas de laisse de crue viable. Seule une photographie du pont de la RD 221 nous permet d'obtenir un niveau approximatif (Photographie 6).

Sur la photographie, en arrière plan, on observe la ligne d'eau proche d'un bois. Au second plan, on observe une bande de terre entre les deux parties en eau. Approximativement, le niveau de l'eau est aux alentours de 117,5 mètres.



Photographie 6 – Crue de l’Aisne de décembre 1993 au niveau du pont de la RD 221 (M. Toulemonde)

6) Modélisation sous Mascaret.

Mascaret est un logiciel de modélisation numérique hydraulique 1D développé conjointement par le CETMEF et EDF. Il a été utilisé pour sa relative facilité d'usage ainsi que pour son interface sobre et francophone. Le nombre d'options et de paramètres est peu élevé contrairement à d'autres logiciels de modélisation mais amplement suffisant pour la modélisation d'une ligne d'eau en vue d'un atlas de Zones Inondables. Il possède aussi un module permettant la production de fichiers résultats au format Ophyca, le logiciel de traitement post-calcul.

La modélisation a été réalisée avec un noyau de calcul de type écoulement permanent. C'est à dire que tous les paramètres définissant l'écoulement restent constants au cours du temps (le débit Q , la cote Z de la surface libre, la vitesse moyenne U à travers une section). L'écoulement se fait aussi en régime graduellement varié. C'est à dire que les caractéristiques de la géométrie de la vallée et du lit mineur varient de façon continue, progressive et lente le long de l'axe de l'écoulement (Annexe IV - hydraulique fluviale).

La modélisation se déroule en deux parties. Une première correspond au calage du modèle et la seconde à l'exploitation proprement dite.

a) Fonctionnement du logiciel.

Mascaret est un logiciel au fonctionnement simple et intuitif. En effet, il a la particularité de proposer une modélisation par étapes. On ne peut pas passer à l'étape suivante si celle en cours n'est pas finie.

Les différentes étapes sont les suivantes :

- Edition du réseau hydrographique.

Cet outil permet d'entrer toute la géométrie du bief, édition des profils et insertions des singularités (perte de charge, barrage, seuil, nœud, apport de débit, déversoir, perte de débit)

- Edition des lois hydrauliques.

Ces lois sont les lois fondamentales de la modélisation : hydrogramme, limnigramme , lois de tarage, lois de seuil. Elles permettent d'établir les conditions initiales du modèle (débit d'entrée, hauteur en sortie, débit d'apport latéral).

- Maillage et Planimétrage.

Le maillage permet de définir des profils intermédiaires entre les profils terrains afin d'affiner le calcul et d'obtenir une ligne d'eau la plus représentative possible.

Le planimétrage consiste en un découpage en tranches horizontales des profils en travers. Plus la maille est faible et le pas de planimétrage petit, plus le calcul sera affiné et les résultats proches de la réalité. Mais à partir d'un certain seuil, le calcul ne pourra se faire en raison de paramètres trop faibles.

- Conditions initiales.

Cette étape consiste à donner une ligne d'eau prédéfinie au modèle. Pour une étude en régime fluvial permanent, on n'a pas besoin d'une ligne d'eau initiale.

- Paramètres temporels.

Cet outil permet de définir les paramètres temporels de la simulation. En écoulement permanent, le temps n'intervient pas. La ligne d'eau sera la même à chaque laps de temps.

- Paramètres généraux.

Cet onglet permet de définir tous les autres paramètres de la modélisation. Les laisses de crue, les zones de frottements et les types de traitements du débordement.

- Paramètres résultats.

C'est l'étape finale avant le calcul. Elle permet de définir les différentes variables voulues pour l'exploitation des résultats.

Lors du calcul, le logiciel définit une hauteur d'eau pour chaque profil (que ce soit des profils terrains ou issues du maillage). Cette information, appelée point de calcul, est le renseignement principal pour le post-traitement de la ligne d'eau.

b) Le calage du modèle.

Cette phase est la plus longue. En effet grâce à la géométrie et à tous les paramètres observés ou calculés, le logiciel calcul une ligne d'eau. C'est ici qu'interviennent les laisses de crue. En effet, ces laisses montrent le niveau atteint par l'eau lors de la crue de calage. Le calage revient à modifier un peu les coefficients de Strickler et les zones de stockage pour que la ligne d'eau du modèle coïncide avec les laisses de crue donc avec la ligne d'eau réelle.

La crue de calage est souvent la plus récente. On possède alors un grand nombre d'informations sur les débits et les niveaux atteints.

Pour un calage de meilleure qualité, nous avons été obligés de couper notre modèle en deux au niveau d'Autry. En effet, comme vue auparavant, Autry constitue une coupure hydraulique. Malgré les tentatives d'exploitations des options avancées de Mascaret, le résultat n'a jamais été satisfaisant.

Cette coupure nous permet d'imposer la hauteur de la ligne d'eau réelle observée lors de la crue de 1993. Sur le profil en long de la rivière, après raccord des deux parties on observe une « chute d'eau » (Figure 29).

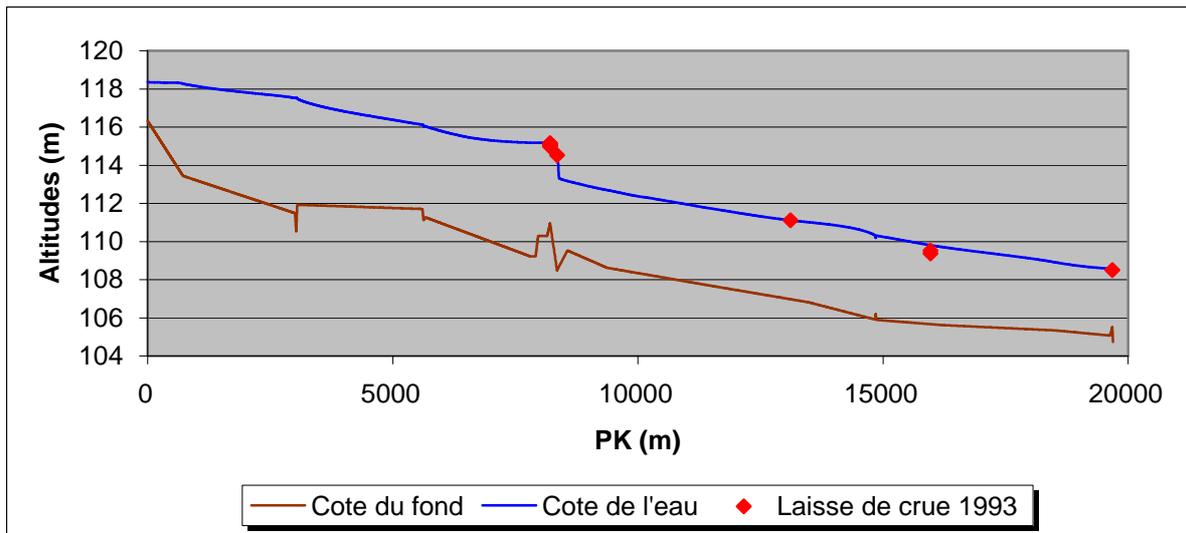


Figure 29 – Profil en long de la crue de 1993 de l’Aisne dans les Ardennes en amont de Sénuc.

Cette chute s’explique de plusieurs façons. Le fond du cours d’eau monte au niveau d’Autry, la vallée se rétrécie, l’implantation urbaine fait obstacle et le bief perché perturbe grandement l’écoulement. Suite à cela, la vallée s’élargie, avec une occupation du sol cent pour cent prairiale et l’altitude du fond de la rivière baisse. La ligne d’eau chute de deux mètres sur quatre cents mètres soit une pente de 0.5 % (figure 30). L’écoulement reste en régime fluvial.

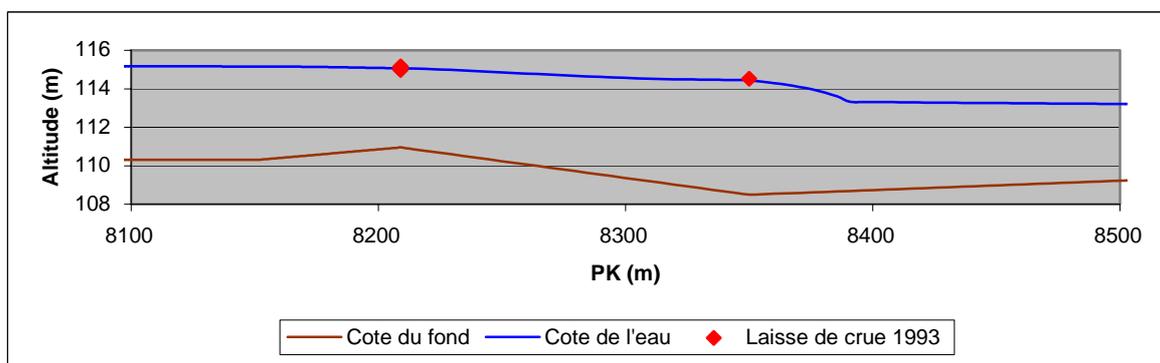


Figure 30 – Détail de la ligne d’eau au niveau d’Autry.

c) Schéma récapitulatif d'une modélisation.

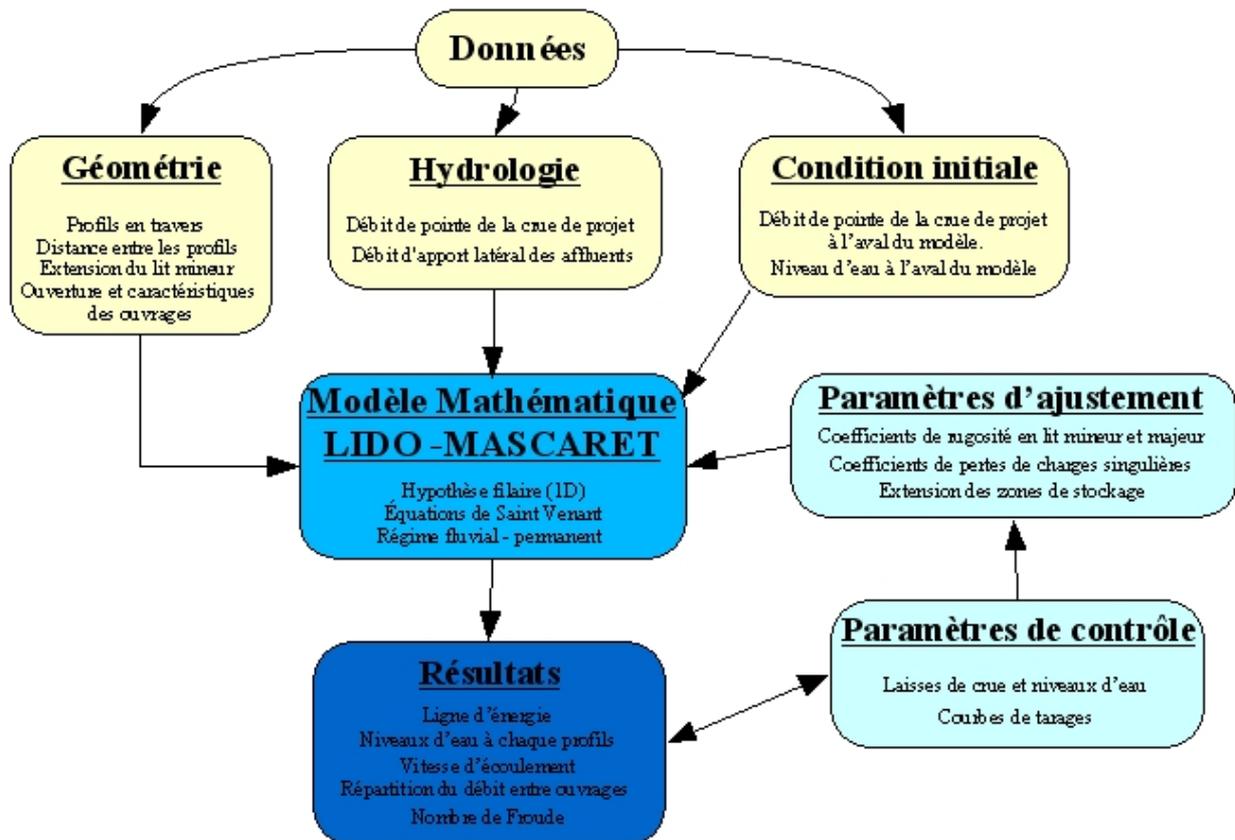


Figure 31 – Schéma récapitulatif du fonctionnement de la modélisation.

7) Traitement numérique de la ligne d'eau.

Ophyca (**O**util de **P**ost-Traitement **H**Ydraulique **C**ARTographique) est un logiciel développé par STRATEGIS à la demande du CETMEF, des DIREN Centre et Lorraine, du Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement et de SOGREAH.

Ce logiciel, utilisant la plate-forme SIG Mapinfo®, permet de réaliser une cartographie de zones inondables à partir de différentes informations comme les laisses de crue ou les résultats de modélisations hydrauliques. L'apport principal de cet outil est de générer une cartographie des zones inondées à partir d'informations ponctuelles, en reconstituant un plan d'eau et en le croisant avec le modèle numérique de terrain.

Dans un premier temps, le logiciel permet de faire une triangulation à partir des points du MNT (Figure 32). Cette triangulation forme le Modèle Numérique de Surface du Terrain Naturel ou MNSTN (Figure 33).

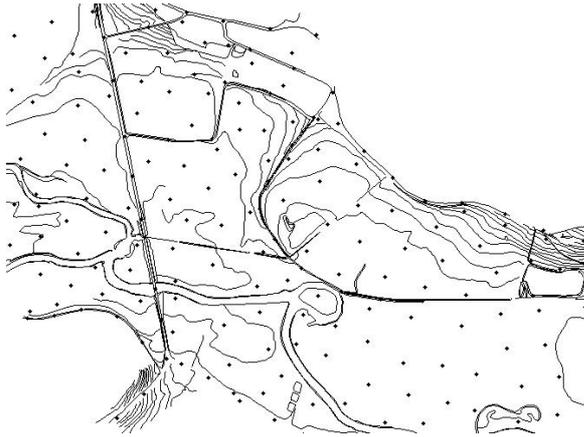


Figure 32 – Rendu du MNT dans Ophyca.

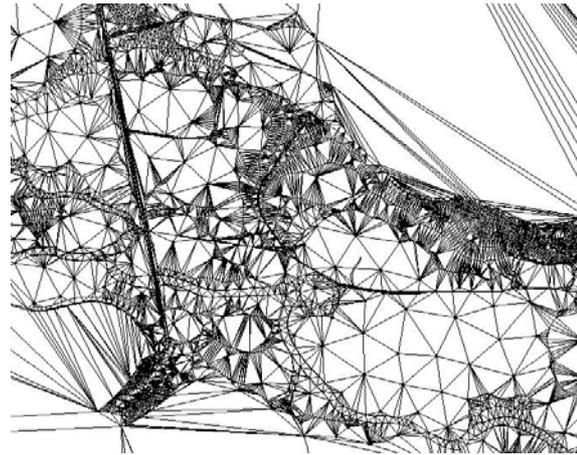


Figure 33 – Rendu du MNSTN dans Ophyca.

Lors de l'importation du fichier issu de Mascaret (le modèle hydraulique), Ophyca retrouve tous les points de calculs des hauteurs. Il est simple ensuite de créer un Modèle Numérique de Surface Libre en Eau ou MNSLE (figure 34). Toutes les lignes tracées sur le MNSLE relient tous les points où l'altitude de l'eau est identique.

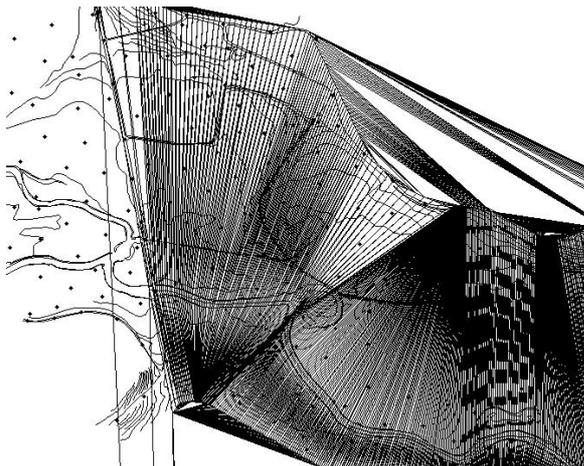


Figure 34 – Rendu de MNSLE dans Ophyca

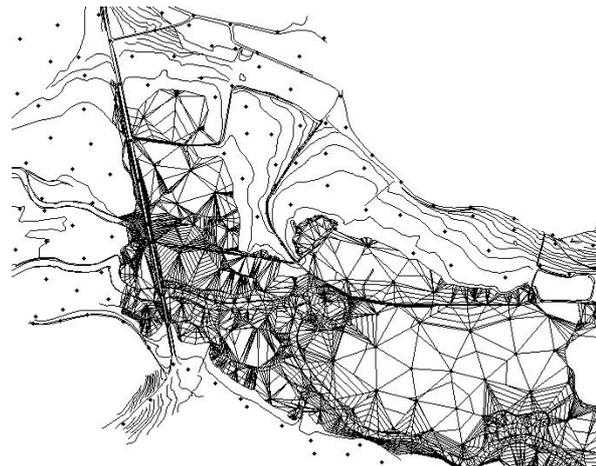


Figure 35 – Rendu du MNZI dans Ophyca

On obtient une surface représentant le terrain naturel (MNSTN) et une surface représentant l'altitude de la ligne d'eau. L'étape suivante est la plus longue du post-traitement. En effet, le logiciel recoupe le MNSTN et le MNSLE pour ne garder que les altitudes d'eau supérieures aux altitudes du terrain naturel. Il calcule aussi la différence entre l'altitude du terrain naturel et la ligne d'eau ; on obtient ainsi une triangulation avec les profondeurs de l'eau. Cette dernière triangulation est appelée MNZI ou Modèle Numérique de Zones Inondables (Figure 35).

8) Rendu Cartographique.

Après exportation du MNZI dans un logiciel de SIG (Système d'information géographique), le traitement cartographique est rapide. Comme l'information des hauteurs d'eau est déjà incluse dans le MNZI, il suffit de réaliser une analyse thématique. En respectant les consignes réglementaires, les classes d'aléas et les couleurs, on obtient une cartographie des zones inondables (Figure 36).

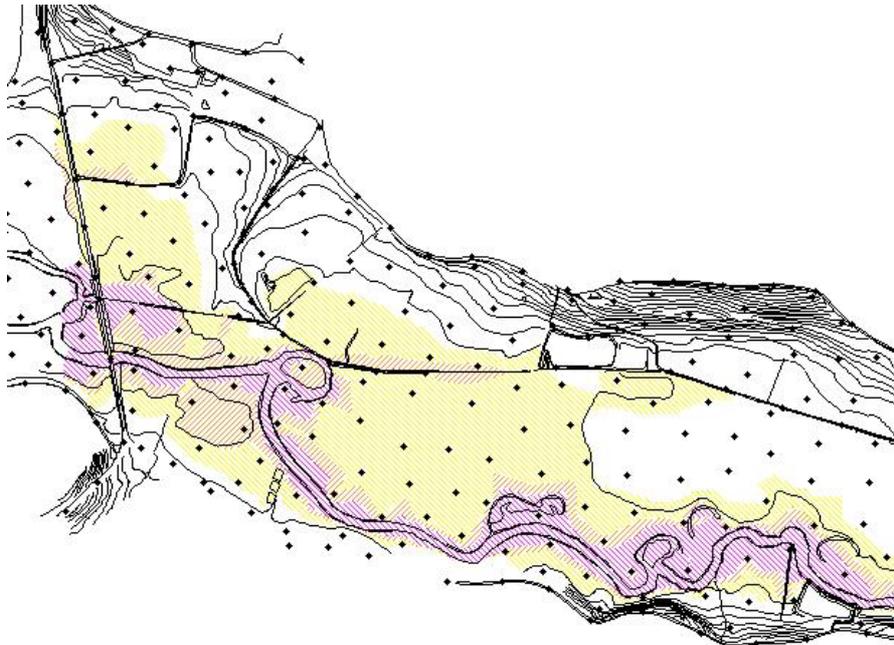


Figure 36 – Rendu de l'atlas des zones inondables avant mise en page.

Pour la partie Aisne en amont de Sénuc, l'Atlas se compose de quatre planches à l'échelle 1/10000^{ème}. Elle sont établies sur le rendu photogramétrique (converti en noir et blanc pour une meilleure lisibilité). La mise en page doit comporter les informations infographiques réglementaires : le titre, l'échelle, l'orientation, une légende qui explique tout sans se reporter vers une annexe, le numéro de la planche, la date d'édition de la planche et les sources (copyright du fond cartographique)

Toutes les cartes de la crue de 1993 sur l'Aisne amont dans les Ardennes entre Sénuc et la Ferme d'Yvoy figurent en annexe ainsi que le tableau d'assemblage. (Annexe VI - Cartes).

Partie III) Les incertitudes et les problèmes de la modélisation.

La modélisation n'est pas forcément une étude simple. En effet, de nombreuses questions se posent quant aux limites du travail en cours. La modélisation laisse une part importante à certaines hypothèses qui restent incertaines. Nous allons reprendre les points d'arrêt qui conditionnent la validité de l'étude.

1) Acquisition des données.

L'acquisition des données topographiques représente un point important dans l'élaboration de ce genre d'étude. De nombreuses erreurs peuvent être commises si le modélisateur ne fait pas attention.

a) Le MNT.

L'incertitude d'un MNT est très faible. C'est une méthode bien au point qui permet d'avoir un rendu de terrain très proche du terrain naturel. De plus la loi impose une tolérance maximale pour un tel rendu de plus ou moins 0.4 mètres en X et Y et de plus ou moins 0.45 mètres en Z pour un MNT d'échelle 1/5000^e.

D'autre part, le MNT demande un post traitement qui permet la suppression des aberrations. Ces incohérences proviennent entre autres des forêts qui sont assimilées à des reliefs lors de la restitution photogramétrique du MNT. Parfois, ce traitement est mal fait, il reste alors de nombreux artefacts donnant ainsi une surface de terrain erronée.

b) Levés terrestres.

Pendant longtemps, la France a possédé l'un des meilleurs réseaux géodésiques du monde (un point de référence tous les trois kilomètres). L'avènement de nouvelles technologies comme le GPS, conjugué à l'inemploi de beaucoup de ces repères, a provoqué la dégradation du réseau. De nombreux repères ont disparus, d'autres ne sont plus référencés et certains ont même été déplacés. Le nombre de repères est tellement important qu'il est impossible pour l'IGN (Institut Géographique National) de maintenir sa base de données à jour. L'exemple rencontré est flagrant.

Suite à la crue de 1993 et à la mort de deux gendarmes lors de l'écroulement d'un pont, le conseil général des Ardennes a pris la décision de rénover tous les ouvrages d'art du département. Les ponts de l'Aire étaient alors majoritairement des ponts temporaires construits suite à la seconde guerre mondiale. Ils ont donc été démontés et laissent place aujourd'hui à de nouveaux ouvrages d'arts. Les repères posés par l'IGN sur les anciens ponts ont été replacés au même niveau par rapport à la chaussée. Mais les ouvriers ont oublié que les ponts ont été construits sur des remblais qui avant n'existait pas. Heureusement, un géomètre local a nivelé les repères, nous permettant ainsi de prendre nos mesures. Mais la base de donnée de l'IGN indique toujours les anciennes altitudes. Lors de travaux récents, il est donc nécessaire de vérifier si le repère n'a pas été déplacé et si le doute reste, de faire un cheminement jusqu'au repère connu le plus proche.

Les levés terrestres peuvent présenter des erreurs mais elles restent minimales. Si elles sont supérieures à l'écart inscrit dans l'arrêté du 21/01/1980 relatif aux incertitudes de mesures, l'opérateur se doit de recommencer ses mesures. Tous les levés d'ouvrages d'arts et les levés topographiques terrestres ou les bathymétries doivent être précis à plus ou moins deux centimètres. Ces erreurs sont compensées tous le long du profil. Cela veut dire que l'erreur est répartie sur l'ensemble des points du profil, la réduisant à quelques millimètres.

c) Les données hydrologiques.

L'hydrologie est principalement destinée à l'analyse des cours d'eau. On observe deux branches dans cette science. L'une consiste à transformer les pluies en débit, en passant par la détermination du volume d'eau qui ne ruisselle pas. La seconde caractérise les valeurs de débits mesurées en leur joignant une probabilité d'occurrence et elle extrapole, par une loi statistique de répartition, les crues supérieures aux crues observées.

A ce stade, un grand nombre d'aspects sont à prendre en compte :

- quantité de pluie tombée lors des épisodes à l'origine de la crue,
- nature des sols et état hydrique de ces sols au début des intempéries,
- estimation des probabilités d'occurrence des crues,
- les stations de mesures doivent être représentatives de la reproductibilité des mesures.

Le bassin versant de l'Aisne amont et de l'Aire présente, comme nous avons pu le voir, une grande diversité de terrain (tant par les différences géologiques que par le relief et l'occupation du sol). De faibles variations de la pluviométrie et des zones de pluies peuvent engendrer un résultat complètement différent. En effet, la crue de calage de 1993 est la plus forte crue connue avec un débit proche du débit de période de retour 20 ans. La crue de débit centennale n'est donc qu'une crue 100 % statistique avec pour hypothèse principale, un fonctionnement identique à celui de la crue de 1993. Or sur les différentes crues répertoriées et étudiées par l'étude hydrologique de la SAFEGE, on observe que certaines crues ont un fonctionnement différent avec entre autres des maximums de crue non concomitants entre l'Aire et l'Aisne.

Les valeurs de débits mesurées permettent de définir les périodes de retours et les fréquences de non-dépassement. On utilise pour le traitement statistique une fonction de répartition adaptée aux valeurs extrêmes. Il existe plusieurs lois dont les plus connues sont la loi Normale, la loi de Gumbel et la loi de Pearson. Ces lois utilisent à leurs tours des paramètres qui caractérisent la fonction de répartition. Ces paramètres sont définis par une fonction estimateur dont les plus classiques sont la loi des moindres carrées, la loi des moments et la loi du maximum de vraisemblance. Grâce à ces lois, les plus utilisées, on peut définir neuf calculs différents. Ces calculs donneront des résultats différents.

L'incertitude sur les couples Débits / Occurrences sont impossibles à déterminer de façon exacte. Outre les manipulations mathématiques (dont l'erreur est quantifiable), l'incertitude est influencée par le choix du modèle de traitement et l'interprétation des résultats.

Toutefois, il existe des ordres de grandeur définis par Annick TEKATLAN dans le rapport d'étude de Sensibilité des modélisations 1D.

Pour les faibles périodes de retours (jusqu'à 50 ans), on possède souvent un assez grand nombre de données sur cette période. Les débits sont obtenus à 10% ou 20% près.

Entre une période de retour de 50 à 100 ans, les débits sont obtenus à 30% près.

Pour les grandes périodes de retours, il n'existe que très peu de données. On part du principe que les débits calculés présentent une grande erreur et une incertitude de 100% car non vérifiables tant que le phénomène abordé n'a pas eu lieu. Il est néanmoins indispensable de partir avec l'hypothèse que la valeur du débit est réaliste, sans quoi la modélisation ne présente aucun intérêt.

Les données fournies ne sont pas souvent celles dont on a besoin. Il faut parfois calculer des données complémentaires, entre autre pour caractériser les apports du bassin versant. Nous avons utilisé pour cela la formule de Myer, qui nous a permis de définir aussi les débits d'entrées de notre secteur d'étude. Cette formule permet de définir le débit à l'exutoire d'un sous bassin en fonction de sa surface et des caractéristiques du bassin versant dont il fait parti. Cependant, cette formule dépend d'une hypothèse : les caractéristiques du sous bassin versant sont identiques au bassin versant qui l'englobe. L'Aisne et l'Aire possèdent des bassins versants très hétérogènes. Cependant les sous bassins versants sont assez homogènes.

d) Les données hydrauliques.

Les données hydrauliques sont des conditions limites fondamentales dans la modélisation numérique. Nous n'aborderons pas les incertitudes exceptionnelles qui résultent de l'altération des instruments de mesures, mais des incertitudes moyennes.

Les hauteurs d'eau sont mesurées en stations limnimétriques (échelles limnimétriques ou capteurs limnimétriques). La position des appareils doit être représentative de l'écoulement.

Les mesures de débits sont effectuées par les stations hydrométriques. C'est une mesure indirecte qui passe par l'évaluation de la hauteur d'eau, de la bathymétrie et de la vitesse d'écoulement puis l'estimation du débit grâce à une courbe de tarage.

Il faut savoir que le débit n'est pas constant dans l'espace. En effet, le débit dépend de la vitesse ($Q=VS$, débit = Vitesse x Surface). La vitesse n'est pas uniforme dans une section en travers (Figure 37). Elle perd de la vélocité à cause des frottements contre le fond du lit. La distribution des vitesses se fait autour d'un axe qui représente le centre de l'écoulement.

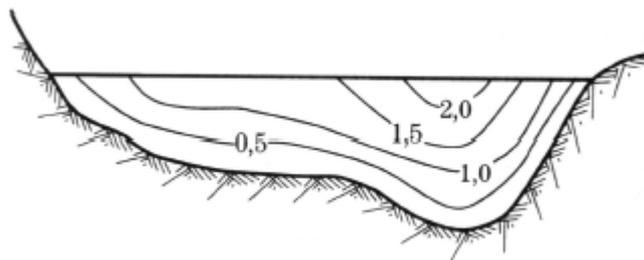


Figure 37 – Distribution axiale des vitesses (Hydraulique générale – A. LENCASTRE).

La position de l'instrument de mesure est alors capitale. L'implantation de la station est en général choisie pour répondre au mieux aux exigences de la mesure. Néanmoins la position est rarement idéale. En effet, la station doit être posée sur une zone stable pour garantir des valeurs comparables tout le temps mais ces zones stables sont rarement les zones les plus

représentatives des écoulements. En prenant en compte toutes les erreurs de lecture, de calage de l'hydromètre, les débits mesurés ont une incertitude de 15%.

e) Les témoignages et les laisses de crues.

Malheureusement, la mémoire humaine n'est pas sûre à 100%. En effet, si certaines laisses de crues sont très fiables (Photographie 5), d'autres laisses et témoignages sont à prendre avec précaution. Il y a la personne qui jurera sur sa vie que l'eau n'a pas atteint sa maison pour ne pas se voir plus tard classée en zone fortement inondable, risquant ainsi de mettre son terrain en zone inconstructible. On trouve heureusement des personnes de très bonne foi. Zigzaguer entre les « on-dit » et autres légendes n'est pas une chose simple. Il n'est pas rare de posséder des témoignages contradictoires. Parfois, le témoin possède une laisse de crue, mais bien souvent celle-ci a une incertitude très grande, entre 30 et 100 cm. De plus, la laisse de crue ne reflète qu'une hauteur atteinte, celle-ci n'est pas forcément le maximum de crue. Cette hauteur maximale est en effet très difficile à appréhender : l'observateur doit se trouver sur le site à l'instant où la crue passe en décrue. Il revient en conséquence au modélisateur d'effectuer une lecture critique des laisses repérées et d'en évaluer la fiabilité.

En plus de la fiabilité des laisses, leur nombre joue un rôle très important. Nous disposons de huit laisses fiables pour vingt kilomètres de cours d'eau. De plus, elles sont majoritairement regroupées sur les mêmes profils. Nous avons calé la ligne d'eau sur les informations que nous disposons, mais une recherche de renseignements plus poussés aurait pu être permise de découvrir d'autres laisses de crues.

2) Calage du Modèle.

La modélisation est une simulation numérique qui est représentative d'une situation unique. C'est une suite de calculs dont les variables sont choisies en fonction du but de l'étude. Pour assurer la fiabilité du modèle, elle doit coller le plus possible au site. C'est l'ajustement des paramètres physiques qui permet ce calage. Or, ces paramètres (les coefficients de rugosité et les pertes de charges singulières) sont parfois difficiles à apprécier.

a) Les pertes de charges singulières et la rugosité.

La rugosité, représentée le plus souvent par le coefficient de Strickler, est un paramètre difficile à évaluer et pourtant il est de grande influence sur le calcul. Quand le coefficient augmente, la rugosité diminue et la ligne d'eau baisse.

Comme on peut le voir sur le tableau 8, les coefficients de Strickler disposent pour un seul type de surface d'une gamme de valeur. Certaines valeurs se recoupent, d'autres ne renvoient pas à une nature de surface d'écoulement.

D'autre part, les coefficients sont évalués sur le terrain, lors des campagnes de prise d'informations. Rien ne dit que l'occupation du sol actuel reflète l'occupation du sol lors de la crue. Dans notre cas, douze ans se sont écoulés depuis l'inondation. Heureusement aucun changement majeur n'a été observé depuis dans la vallée. Ce n'est pas toujours le cas : parfois les cours d'eau ont subi une modification profonde entre la crue de calage et la période de prospection. Chenalisation, curage, construction ou destruction de seuil et barrage, ajout

d'ouvrage d'art, de nombreux aménagements récents peuvent provoquer une modification de la ligne d'eau lors d'un évènement identique à la crue de calage.

Il est donc capital de s'assurer que le choix des coefficients est fiable. Pour cela, on ajuste les coefficients de rugosité à une valeur qui reflète la réalité pour obtenir une ligne d'eau identique à celle matérialisée par les laisses de crue.

Selon Mme Annick TEKATLIAN², la pratique montre que les variations relatives du coefficient de Strickler sont de 15% à 20% selon l'observateur sur le terrain et le calage de la simulation.

b) Les pertes de charges singulières.

Les pertes de charges singulières sont à l'origine d'une dissipation locale de l'énergie. De ce fait, elles peuvent influencer la ligne d'eau au voisinage de ces singularités. Les singularités sont de plusieurs types, obstacle partiel à l'écoulement (pont, pile de pont), changement brusque de pente, changement brusque de largeur, ouvrages divers (seuils, barrages). Il existe de nombreuses lois pour calculer ces pertes de charges, c'est au modélisateur de choisir la loi appropriée. Parfois, cette loi est intégrée directement dans le calcul du logiciel. Par exemple le logiciel Mascaret calcul la perte de charge liée à la contraction de l'écoulement au niveau des ponts. Il faut toutefois calculer les pertes de charges liées à la forme des piles de ces ponts. On a utilisé pour cela la méthode de Bradley avec une abaque qui détermine le coefficient de perte de charge en fonction des caractéristiques du pont et de la forme des piles (Figure 38).

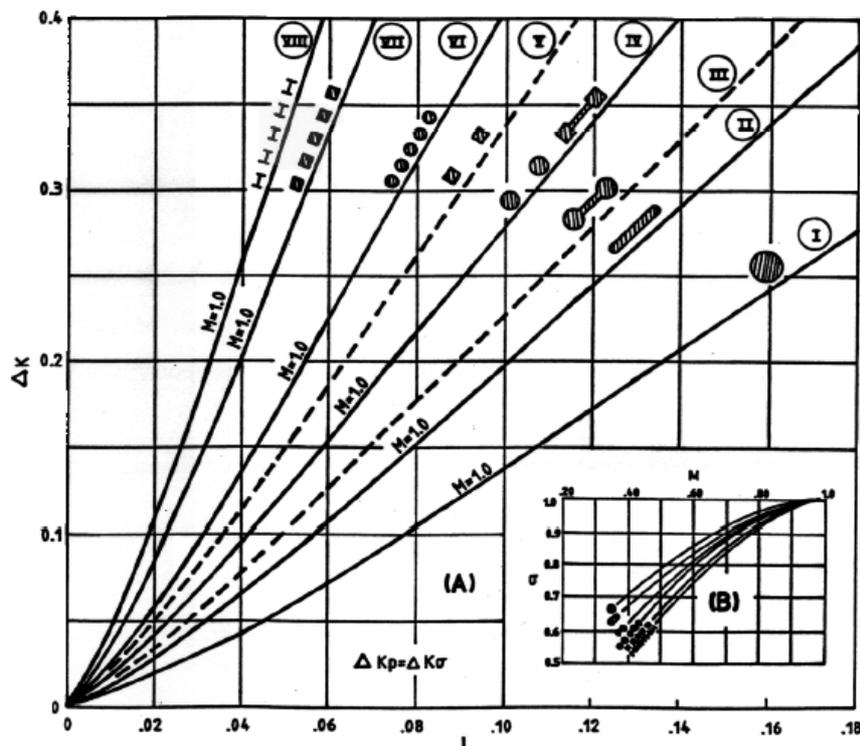


Figure 38 – Abaque de Bradley sur la perte de charge singulière dû aux piles.³

Avec J le rapport entre la largeur cumulée des piles et la largeur entre les culées du pont.

² TEKATLIAN, A. 2001. *Etude de sensibilité des modélisations 1D*. CETE, 67pp.

³ GOUTX, D. 2001. *Hydraulique des cours d'eau*. CETMEF. 61pp.

Les valeurs données par l'abaque sont fiables. Toutefois, il peut être nécessaire de s'assurer de l'exactitude des calculs pour limiter les approximations.

c) Calage sur les laisses de crue.

La modélisation veut que l'on cale la ligne d'eau théorique calculée à la ligne d'eau réelle en s'aidant des laisses de crue. Ce calage doit se faire au plus près possibles. En effet pour qu'un atlas de Zones Inondables soit valide il faut que l'espace entre les deux lignes d'eau soit nul ou dans la majorité des cas, inférieur à quelques centimètres. Il est parfois difficile d'obtenir cet écart. Il faut alors modifier un peu les coefficients de rugosité pour faire monter ou descendre la ligne d'eau. Ce changement modifie parfois fortement les valeurs. Si l'on s'écarte des valeurs théoriques, c'est pour chercher à reproduire les pertes de charges réelles à l'origine de la ligne d'eau.

d) Le logiciel de modélisation.

Le choix du logiciel importe peu dans le rendu final, car leurs méthodes de travail sont proches. L'écoulement est fortement simplifié. En effet, la modélisation 1D prend en compte de nombreuses hypothèses :

- La pression est hydrostatique.

C'est à dire que pour un débit donné, la hauteur ne variera pas car on considère que la pression ne varie pas. Du point de vue thermodynamique, le volume d'un corps se modifie quand la pression se modifie. Or, lors d'épisodes pluvieux, la pression varie. On considère que ces variations ont une action négligeable sur la ligne d'eau.

- La hauteur d'eau est identique en tous points d'une section.

Un écoulement naturel n'est jamais rectiligne, dans un canal de géométrie constante. Toutes les vallées présentent des coudes, des variations de section. Quand la rivière tourne, l'eau subit une force centrifuge qui fait varier la hauteur d'eau entre le centre de courbure et la périphérie. D'autres parts, certains obstacles peuvent faire monter localement la ligne d'eau.

- L'écoulement a une direction privilégiée.

Si l'écoulement principal suit le sens de la pente, il existe de nombreux champs de vitesses dans des directions différentes, parfois contraire à l'écoulement. Ces champs sont engendrés par des obstacles, par les débordements dans le lit majeur : toutes les singularités provoquent une dispersion et une modification des vitesses.

- Débit unique.

Le débit est unique pour une section donnée. Ce n'est pas réellement le cas. Comme la figure 37 le montre, les vitesses ont une distribution axiale. Or, $Q=V*S$: le débit a donc une répartition identique et proportionnelle à la vitesse. Lors d'une crue, l'écoulement dans le lit majeur a un débit plus faible que l'écoulement en lit mineur.

- La pente de l'eau doit être inférieure à 10%.

La majorité des cours d'eau répond à cette hypothèse. Seul à certains endroits de l'écoulement, la pente peut dépasser les 10%, mais ces courts passages sont négligeables face à la longueur totale du cours d'eau.

3) Conclusion.

La modélisation est un travail de grande patience. En effet tout au long de l'étude, de nombreuses hypothèses sont mises en avant. Si les incertitudes dues aux appareils sont négligeables car déjà prises en compte dans les mesures, certaines hypothèses doivent être rigoureusement contrôlées pour éviter l'altération des données et la divagation du modèle.

Pour le calage, on modifie les coefficients de Strickler pour caler une ligne d'eau au centimètre sur une laisse qui est juste à une dizaine de centimètres. Si le calage de la crue de référence est relativement proche de la réalité grâce aux différents témoignages retenus, on peut considérer toutefois que la ligne d'eau obtenue a une marge d'erreur d'une dizaine de centimètres.

La modélisation de la crue centennale à plus que centennale, est encore sujette à la discussion. Si elle est récente et bâtie sur de nombreuses informations, la marge d'erreur est semblable à celle de la crue de calage, une dizaine de centimètres.

Dans le cas contraire, quand la crue centennale est statistique, le débit est extrapolé à partir des débits réels mesurés par les stations hydrologiques. Les hypothèses sont nombreuses : la crue centennale a-t-elle un fonctionnement identique et proportionnel à la crue de référence ? Il faut pour cela que l'épisode pluvieux à l'origine de la crue soit similaire, seule l'intensité varie et fournit le surplus de débit. Il faut aussi que l'état hydrique des sols présente les mêmes conditions que celle existant début décembre 1993. On considère alors que l'incertitude de cette modélisation est de 100% tant que l'événement en question n'a pas eu lieu.

Dans tous les cas, la modélisation doit être validée par le modélisateur. Il doit vérifier la fiabilité de toutes les données, faire des recherches complémentaires et surtout, il doit pouvoir expliquer le choix et la validité des hypothèses.

Partie IV) Les cartes de dangers en Confédération Helvétique.

1) Contexte de la Suisse.

La Suisse est un pays d'Europe bordé par l'Allemagne, la France, l'Italie, l'Autriche et le Liechtenstein. Le pays a une longue tradition de neutralité politique et militaire, et abrite de nombreuses organisations internationales. La confédération Helvétique ne fait pas partie de la Communauté Européenne et vient de faire son entrée à l'ONU en 2002. La Suisse est un état fédéral qui regroupe 26 cantons et 2 873 communes.

a) Contexte Politique.

Les cantons suisses sont plus ou moins autonomes constitutionnellement (chaque canton a sa propre constitution), ainsi que du point de vue législatif, judiciaire, fiscal et administratif. Un certain nombre de domaines est ainsi géré uniquement au niveau cantonal. On y trouve par exemple l'éducation, la gestion des hôpitaux (sauf les hôpitaux communaux et privés), la construction et l'entretien de la majorité des routes (sauf les autoroutes et routes nationales), la police (contrairement à l'armée) et les charges sociales ou encore le contrôle de la fiscalité. Ils ont tous leurs propres parlements et leurs gouvernements.

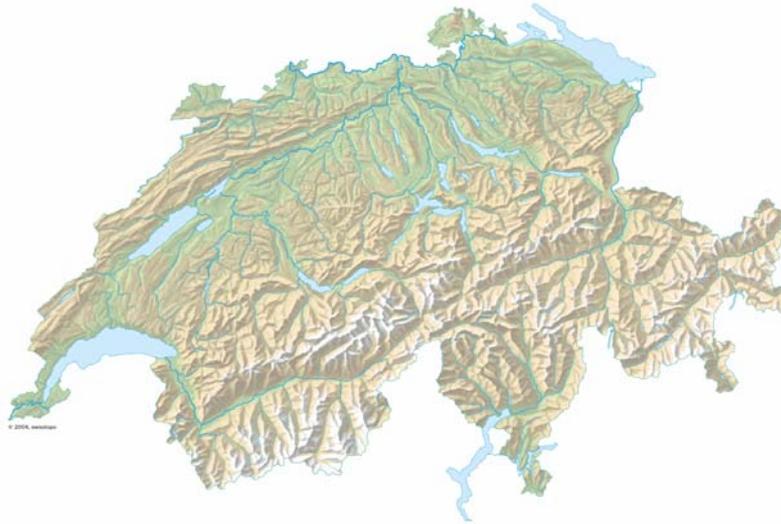
Une particularité de la démocratie suisse est que le peuple garde en permanence un contrôle sur ses élus, car la Suisse est une démocratie que l'on peut qualifier de semi-directe, dans le sens où elle a des éléments d'une démocratie représentative (le peuple suisse élit les membres de tous les parlements ainsi que ceux des exécutifs cantonaux) et d'une démocratie directe. En effet, en Suisse, le corps électoral dispose de deux instruments qui lui permettent d'agir sur un acte décidé par une autre autorité de l'État ; il s'agit du référendum et de l'initiative populaire, qui consiste en le droit d'une fraction du corps électoral de déclencher la procédure permettant l'adoption, la révision ou l'abrogation d'une disposition constitutionnelle.

Le pouvoir législatif est exercé par l'Assemblée fédérale, qui est formée de deux chambres : le Conseil National, formé des représentants du peuple et le Conseil des États, qui représente les cantons. Chaque canton possède 2 sièges aux Conseils des États et d'un nombre de sièges proportionnel à sa population au Conseil National.

Le pouvoir exécutif est exercé par le Conseil fédéral, formé de 7 membres, et de l'administration fédérale, qui lui est subordonnée. Ils sont élus pour 4 ans par l'Assemblée fédérale, qui, en règle générale, reconduit les candidats sortants si ces derniers désirent continuer d'exercer leurs fonctions.

Un président de la Confédération est élu parmi les conseillers fédéraux. Il est élu pour une année par l'Assemblée fédérale. Son rôle est principalement symbolique et médiatique. Traditionnellement, les conseillers fédéraux sont élus président chacun à leur tour, en fonction de leur ancienneté.

b) Contexte géographique.



Superficie : 41.284 km²
 dont 3.7% en eau
 Distance nord-sud : 220 km
 Distance est-ouest : 348 km
 Point le plus haut : 4634 m,
 Pointe Dufour en Valais
 Point le plus bas : 193 m,
 lac Majeur au Tessin

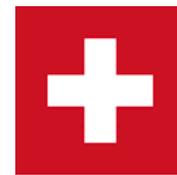


Figure 39 - Carte de la Suisse (<http://fr.wikipedia.org/>).

La Suisse comprend trois grandes régions naturelles :

- Les Alpes occupent la plus grande partie du territoire ;
- Le Jura forme la partie occidentale ;
- Ces deux chaînes de montagnes sont séparées par le plateau de la Suisse centrale.

70% de la population vit sur le plateau de Suisse centrale qui représente 30% de la superficie du pays et seulement 11% vit dans la région Alpine (60% de la surface de la Suisse).

C'est du massif alpin que partent deux des plus puissants fleuves d'Europe de l'Ouest, le Rhône et le Rhin. Chacun d'eux traversent un grand lac frontalier : le Léman pour le Rhône et lac de Constance pour le Rhin.

Sur la Figure 37, on voit l'importance du réseau hydrographique suisse. Avec le Rhin et le Rhône, la Suisse possède treize fleuves et rivières de grande importance (Tableau 10).

Nom	Longueur (Km)	Surface drainée (Km ²)
Rhin	357	36 494
Aar	295	17 779
Rhône	264	10 403
Reuss	158	3 425
Linth	140	2 416
Sarine	128	1 892
Thur	125	1 724
Inn	104	2 150
Tessin	91	1 616
Hinterrhein	57,3	1 693
Vorderrhein	67,5	1 514
Doubs	74	1 310
Kander	44	1 126

Tableau 10 – les treize fleuves est rivières importantes de Suisse.

L'importance du réseau hydrographique a amené les géographes à surnommer la Suisse le « château d'eau » de l'Europe (la Suisse possède 6% des réserves européennes d'eau douce). Les vallées suisses sont parcourues de nombreux cours d'eau qui fournissent plus de 56% de l'énergie (d'origine hydroélectrique). La Suisse jouit d'un climat tempéré, de type montagnard avec des influences continentales. La moyenne thermique annuelle est de 7 °C (soit 20 °C en été, 4 °C en hiver), les températures diminuant en altitude d'environ 1,7 °C tous les 300 m. Les précipitations varient en fonction de l'altitude : sur le Plateau suisse, la moyenne annuelle est d'environ 915 mm de pluie, les zones plus élevées recevant généralement beaucoup plus d'eau (jusqu'à 2000 mm par an dans certaines parties des Alpes).

c) Les inondations en Suisse.

Du fait de l'importance du réseau hydrographique, la Suisse est sujette régulièrement à des épisodes de crues. Les Suisses distinguent deux types d'inondations, les inondations statiques et les inondations dynamiques.

- Les inondations statiques :

Lors d'une inondation statique, l'écoulement est faible voir inexistant. La submersion est lente. Ce genre de crue se produit dans les plaines et au bord des lacs. Elle est définie principalement par la hauteur d'eau atteinte et la durée de la crue.

- Les inondations dynamiques :

Cette inondation est caractérisée par une vitesse d'écoulement élevée. Elle survient sur un terrain incliné dans les zones de relief important. L'eau s'écoule rapidement et la crue n'excède généralement pas une durée de quelques heures.

Depuis plusieurs siècles, les Suisses possèdent un savoir-faire dans l'ingénierie hydraulique reconnue dans le monde entier. Dès le début du XIX^e siècle, de grands travaux d'aménagement ont eu lieu. La majorité des cours d'eau a été canalisée, déviée et aménagée pour se protéger contre les crues et fournir de l'énergie (*Histoire de la protection contre les crues en Suisse* de Daniel L. Vischer). La majorité du temps, ces aménagements n'ont fait que déplacer les problèmes.

Régulièrement la Suisse subit des inondations. Les plus récentes début Août 2005 ont causé la mort de 10 personnes et provoqué plus de 150 millions de francs Suisse de dégâts (99 millions d'euros).

En plus des crues proprement dites, les Suisses regroupent d'autres risques liés à l'eau dans le risque inondation : les laves torrentielles et l'érosion de berge.

Les laves torrentielles sont des ruissellements d'eau importants qui transportent une forte charge solide. Ce processus est régulièrement assimilé à des coulées de boues. Les caractéristiques propres à ces phénomènes sont leur grande densité (débit solide entre 30 et 70%) et une vitesse d'écoulement élevée (40 à 60 km/h). En plus de cela, elles ont un pouvoir érosif très important, arrachant la végétation et déstabilisant les berges. Après leurs passages, elles laissent sur place un dépôt important de blocs et d'alluvions désigné sous le terme de Übermürung (Photographie 7).



Photographie 7 – Exemple d’un Übermürung.⁴

L'érosion de berge est un type de danger qui cause beaucoup de dégâts dans les zones urbanisées. Elle peut couper les voies de communication parallèles aux cours d'eau et provoquer l'effondrement de maisons et de ponts.

2) Les cartes de dangers.

a) Contexte législatif.

Dés 1877, avec la loi fédérale sur la police de l'eau, la fédération souhaite contrôler les aménagements. Tous les aménagements sur des cours d'eau, suite à cette date, sont soumis à autorisation du conseil fédéral qui donne alors des mesures que les cantons doivent faire appliquer. Cette loi n'est modifiée qu'en 1991 par la Loi fédérale sur l'Aménagement des Cours d'Eau (LACE). Cette loi ajoute la notion de protection des personnes et des biens matériels importants contre l'action dommageable des eaux. Avant cette date, il n'existait aucune planification globale de protection contre les crues.

La LACE donne la compétence de la protection contre les crues aux cantons. Ces derniers doivent prendre trois mesures :

- les cantons assurent la protection contre les crues en priorité par des mesures d'entretien et de planification,
- si cela ne suffit pas, ils prennent les autres mesures qui s'imposent telles que corrections, endiguements, réalisation de dépotoirs à alluvions et de bassins de rétention des crues ainsi que toutes les autres mesures propres à empêcher les mouvements de terrain,
- les mesures doivent être appréciées compte tenu de celles qui sont prises dans d'autres domaines, globalement et dans leur interaction.

Pour la mise en place de ces mesures, ils doivent aussi respecter plusieurs exigences.

- les cours d'eau, les rives et les ouvrages de protection contre les crues doivent être entretenus de façon à maintenir la protection contre les crues à un niveau constant, en particulier en ce qui concerne la capacité d'écoulement,

⁴ **Office fédéral des eaux et de la géologie**, 2002. *La protection contre les crues au fil du temps*. OFEG. 14pp

- lors d'interventions dans les cours d'eau, leur tracé naturel doit être autant que possible respecté ou, à défaut, reconstitué. Les eaux et les rives doivent être aménagées de façon à ce que:
 - elles puissent accueillir une faune et une flore diversifiées,
 - les interactions entre eaux superficielles et eaux souterraines soient maintenues autant que possible,
 - une végétation adaptée à la station puisse croître sur les rives.

Le terme de Carte de dangers apparaît en 1992 dans l'Ordonnance sur les Forêts (OFo), pour la protection des exploitations forestières contre les catastrophes naturelles.

Les cartes de dangers sont un instrument essentiel de l'aménagement du territoire. La loi sur l'aménagement des cours d'eau et la loi sur les forêts font obligation aux cantons d'établir de telles cartes. Les autorités fédérales subventionnent jusqu'à 70% de l'élaboration des cartes de dangers.

b) Méthodologie.

Le danger correspond aux aléas. Il exprime la probabilité d'occurrence d'un événement susceptible d'occasionner des dommages suivant sa violence (intensité), sur un périmètre donné. L'appréciation du danger d'un événement consiste à déterminer son intensité et sa fréquence. La Suisse reconnaît trois niveaux d'intensité (faible, moyenne et forte) définis suivant les phénomènes (Tableau 11). L'intensité est déterminée à partir de l'observation et de la modélisation des phénomènes en causes.

Phénomène	Intensité faible	Intensité moyenne	Intensité forte
Lave torrentielle		$E_p < 1\text{m}$ $V < 1\text{ m/s}$	$E_p > 1\text{m}$ $V > 1\text{ m/s}$
Inondation Statique	$h < 0.5\text{ m}$	$0.5 < h < 2\text{ m}$	$h > 2\text{ m}$
Inondation dynamique	$q < 0.5\text{ m}^2/\text{s}$	$0.5 < q < 2\text{ m}^2/\text{s}$	$q > 2\text{ m}^2/\text{s}$
Erosion des berges	$t < 0.5\text{ m}$	$0.5 < t < 2\text{ m}$	$t > 2\text{ m}$

Tableau 11 – Classes d'intensités des phénomènes (d'après R. Laot 2004).
h : hauteur d'eau, E_p : épaisseur, V : vitesse, t : taux d'érosion, q : ($q = v * h$)

La probabilité d'occurrence est aussi définie par trois niveaux suivant les périodes de retours. Forte probabilité pour une période de retour comprise entre 1 et 30 ans, moyenne probabilité pour une période de retour comprise entre 30 et 100 ans et faible probabilité pour une période de retour comprise entre 100 et 300 ans. Parfois se trouve ajouté une probabilité très faible pour les périodes de retour supérieures à 300 ans.

Les degrés de danger sont ensuite déterminés par le recoupement des probabilités et des niveaux d'intensités (Figure 40). Dans la pratique, c'est comme s'il existait une cartographie de l'intensité du danger et une cartographie de la probabilité. Le rapport de ces deux zonages donne le degré de danger.

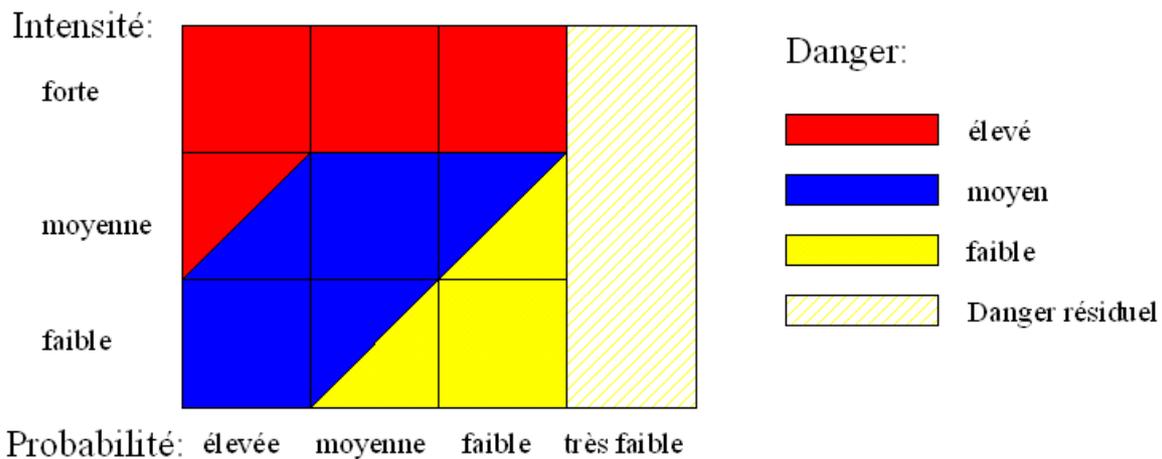


Figure 40 - Diagramme des degrés de danger en fonction de la probabilité et de l'intensité.⁵

La Suisse prend en compte quatre classes de danger. Danger élevé (Rouge), moyen (bleu), faible (jaune) et très faible (hachuré jaune et blanc). La classification des zones à des conséquences directes sur l'occupation du sol.

Zone rouge : danger élevé.

- les personnes sont en danger aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur des bâtiments,
- il faut s'attendre à une destruction soudaine des bâtiments.

Ou :

- les événements se manifestent avec une intensité moyenne, mais avec une probabilité élevée. Dans ce cas, les personnes sont surtout menacées à l'extérieur et les bâtiments deviennent inhabitables.

La zone désignée en rouge correspond essentiellement à une zone d'interdiction (périmètre où le développement est interdit).

Zone bleu : danger moyen.

- les personnes sont en danger à l'extérieur des bâtiments, mais peu ou pas à l'intérieur,
- il faut s'attendre à des dégâts importants sur les bâtiments.

La zone bleue est essentiellement une zone de réglementation restrictive.

Zone jaune : danger faible.

- peu ou pas de danger pour les personnes,
- faibles dégâts sur les bâtiments.

La zone jaune est une zone de sensibilisation (périmètre où les personnes sont informées des dangers potentiels).

⁵ LOAT, R., ZIMMERMANN, M., 2004. "La gestion des risques en Suisse". In *Risque naturel et aménagement en Europe*. Armand Colin, Paris. pp 108-120.

c) Prise en compte des aménagements.

La principale particularité de la méthode suisse est la prise en compte des aménagements pour la réduction du risque. En effet, les Suisses considèrent les ouvrages de protection comme un facteur capital dans l'établissement des zones de dangers.

Les aménagements existants sont majoritairement calibrés pour résister à une crue centennale quels que soient les enjeux. La zone protégée se trouve déclassée car elle présente un danger inférieur. Parfois l'effet des ouvrages de protection est tel que le danger disparaît.

Seul les ouvrages relativement récents sont pris en compte pour la réduction du risque. Les ouvrages anciens sont considérés comme transparent à partir d'un débit de temps de retour 100 ans. La réduction du risque se fait donc au cas par cas.

Dans tous les cas, les aménagements doivent être rigoureusement entretenus. Si les cantons ont la charge de la protection contre les crues, l'entretien des aménagements est répartie à tous les niveaux, suivant la propriété de ceux-ci (fédération, canton ou commune).

Une fois la carte de dangers établie, une planification de mesure de protection est mise en place. La première priorité est l'entretien des ouvrages de protection existants et la planification de l'affectation du sol (application des contraintes du zonage). Dans un second temps, la planification prévoit la construction de protection en vue de réduire le danger dans les zones urbanisées.

La mise en place de ces nouveaux ouvrages de protection doit respecter les objectifs de protection définie par la matrice de sécurité différenciée (Figure 41).

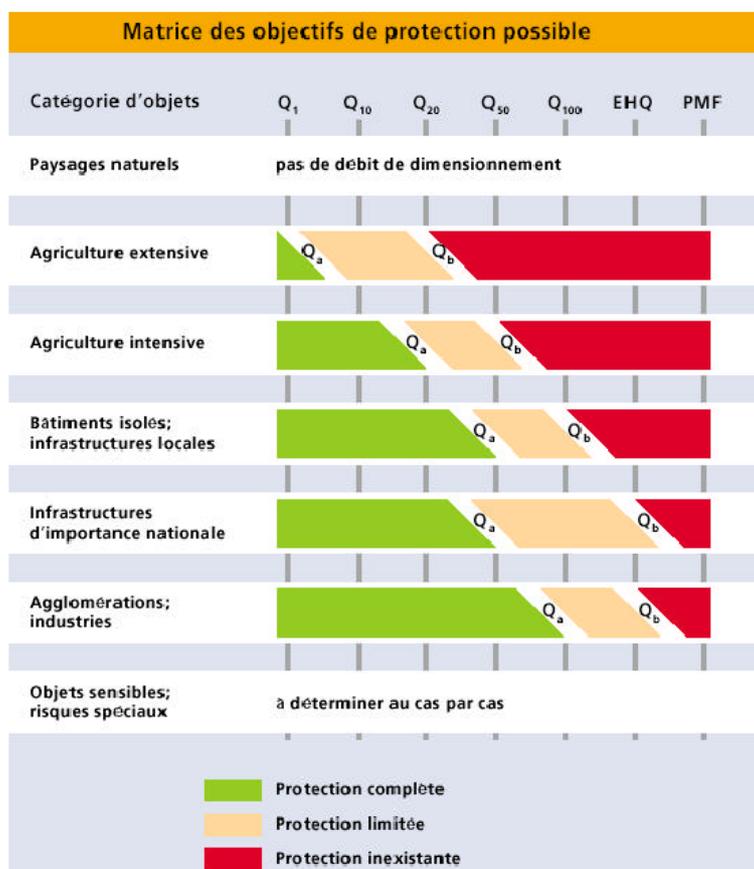


Figure 41 – Concept de sécurité différenciée.
 EHQ : Débit extrême. PMF : Probabilité maximale.

Suivant la catégorie de l'objet à protéger, l'aménagement doit être dimensionné pour permettre une protection jusqu'à la probabilité d'occurrence définissant la classe de protection limitée. Un ouvrage de protection d'une agglomération doit permettre une protection complète contre une crue centennale. La mise en place de nouveaux ouvrages de protection impose la mise à jour de la carte de dangers. La maîtrise d'œuvre et l'entretien de ces aménagements dépendent de l'importance de l'objet. Si l'objet est d'importance fédérale (voirie fédérale, chemin de fer, réseaux de communication et d'électricité) et c'est entièrement à la charge de la fédération.

d) Mise à jour des cartes de dangers.

La carte de dangers est le document de base pour la prise en compte des dangers naturels dans l'organisation du territoire. Les plans directeurs d'aménagements des cantons n'échappent pas à la règle. L'article 9 de la loi fédérale sur l'aménagement du territoire oblige une réévaluation et une mise à jour des plans directeurs au minimum tous les dix ans. Cependant, il est préférable de faire une mise à jour des cartes de dangers plus régulière. Logiquement, la carte de dangers devrait être remise à jour à chaque fois que sa validité est mise en doute par l'apparition de nouveaux facteurs (Aménagement, modification de l'écoulements, etc.). Une mise à jour intervient lors de la planification des mesures de protection (Figure 42).

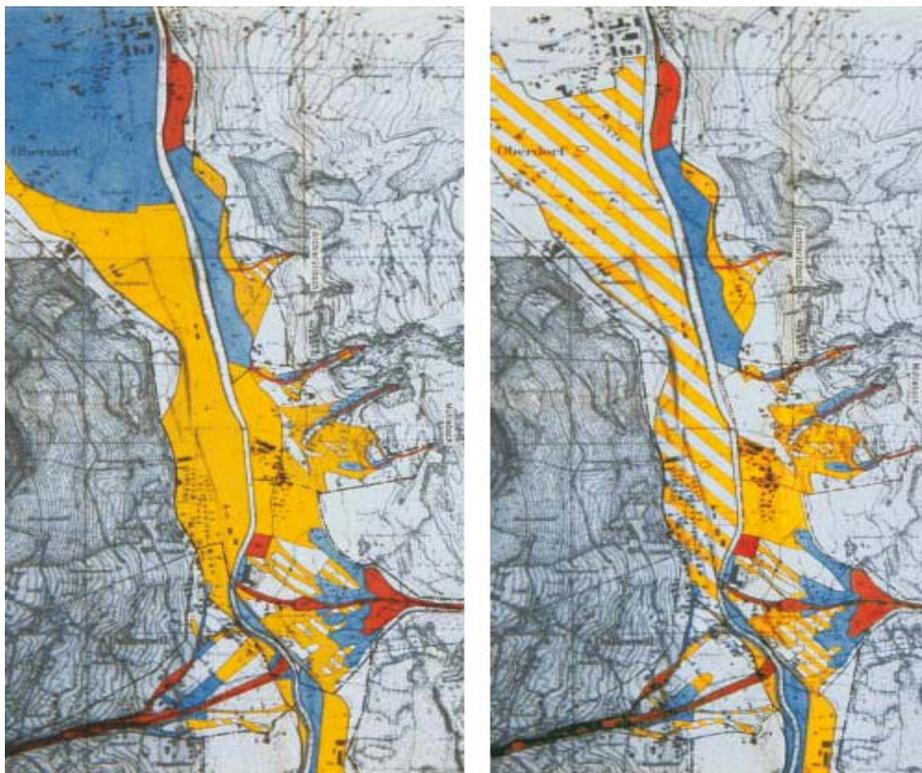


Figure 42 – Carte de dangers à l'état initial (à gauche) et après réalisation des mesures de protection contre les crues : commune de Engelterger, canton de Nidwald.⁶

⁶ Office fédéral de l'économie des eaux, Office fédéral de l'aménagement du territoire, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 1997. Recommandations 1997 – Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire. OFEE, OFAT, OFEFP. 32pp.

3) Comparaison des deux systèmes.

Contrairement à la carte de dangers, l'atlas des zones inondables reste un document informatif tant qu'il n'est pas inclus dans un PPRI ou un document d'urbanisme. La carte de dangers a une valeur réglementaire dès sa mise en œuvre. Le zonage doit être appliqué dans les documents d'urbanisme. Si une commune ne prend pas en compte la cartes de dangers, elle est tenue comme entièrement responsable des dommages subis lors d'une crue.

Les atlas de zones inondables français sont des documents « statiques ». Ils ne sont révisables qu'en cas d'erreurs avérées ou après une modification majeure du terrain. Pour la méthodologie française, les ouvrages sont tous considérés comme transparents à l'inondation. Le guide méthodologique des PPRI notifie a ce sujet : « les terrains protégés par des ouvrages sont considérés comme potentiellement exposés aux inondations de la même façon que les terrains non protégés dans la mesure où il n'est pas possible de garantir totalement et définitivement l'efficacité des ouvrages ». Le risque est donc majoré.

Les cartes de dangers suisses prennent en compte ces aménagements. On peut penser qu'elles montrent une situation plus réelle. L'eau est stoppée ou déviée par les ouvrages. Ils ont donc une action non négligeable sur l'écoulement.

Les deux méthodologies mettent en avant le même problème : l'entretien des ouvrages de protection contre les crues. Dans les deux législations, l'entretien des cours d'eau et des aménagements de protection est obligatoire.

En France, les propriétaires doivent assumer la charge des ouvrages de protection et de l'entretien des cours d'eau. Etat ou propriétaires riverains, c'est une obligation d'entretien. Mais l'observation a montré que cet entretien est loin d'être parfaitement réalisé. De plus, majoritairement, les ouvrages de protection en France ont été réalisés au XIX siècles : leur structure ne répond pas forcément aux normes actuelles de protection et la stabilité de l'ouvrage est incertaine pour une crue exceptionnelle. L'Etat préfère donc jouer la sécurité et cartographier un état où les digues et autres ouvrages ne joueraient plus de rôle dans l'écoulement.

En Suisse, la logique est différente. Les ouvrages de protection sont majoritairement publics. C'est donc aux institutions de réaliser l'entretien. Si encore aujourd'hui, on constate un manque d'entretien des digues, la mise en place d'une carte de dangers s'appuie sur les ouvrages de protection. Conscient de ce problème, la fédération impose en priorité un examen des ouvrages existants et une réparation en cas de dommages pour qu'ils puissent remplir pleinement leur fonction de protection. Ces ouvrages ne font pas disparaître le risque, ils sont dimensionnés pour un certain risque maximum qui dépend de l'intérêt de la zone protégée.

Les atlas des zones inondables ne représentent qu'un seul risque, celui des inondations débordantes et plutôt lentes. Alors que le document suisse fournit un renseignement plus complet sur tous les risques liés à l'eau : crue statique, crue dynamique, ruissellement et érosion des berges.

En France, les Plans de Protection contre le Risque Ruissellement sont en cours de développement. De même, pour la prise en compte de l'érosion des berges. Il n'existe pas d'outil pour caractériser la probabilité de l'érosion. La méthode française actuelle tend à redonner au cours d'eau un espace dans lequel la rivière pourra éroder : c'est l'espace de liberté des cours d'eau. Si cet outil permet de favoriser des zones d'érosions préférentielles, il ne permet pas de définir le risque dans les zones d'enjeux importants. Ces zones d'enjeux sont souvent surveillées et renforcées pour limiter ce risque. Cependant, rien ne permet de définir le taux d'érosion dû à une seule crue.

Cette comparaison met en avant un certain retard dans la protection contre les inondations en France. Les atlas de zones inondables ne prennent en compte que les inondations par débordement et l'Etat se décharge de la protection sur les riverains. En effet, l'Etat et les collectivités locales ne sont pas obligés de mettre en place des protections pour protéger la population. C'est aux propriétaires de mettre en place cette protection. De plus, ne pas tenir compte des ouvrages de protection peut paraître solution de facilité pour l'administration. Le document est statique et ne nécessite pas de mise à jour. Et surtout, cela ne brusque pas les collectivités pour l'entretien des digues et autres ouvrages de protection. Quant aux autres risques liés à l'eau, le retard devrait se combler quand les collectivités prendront conscience du risque que peut présenter le ruissellement et l'érosion de berges.

Même si l'atlas n'est pas un document réglementaire en soit, il fait peur aux élus. Il est souvent amalgamé avec le Plan de Prévention des Risques Inondations. Or, lui seul impose aux zones de dangers des contraintes similaires au zonage suisse. Zone rouge : interdiction, zone bleue : autorisation et zone jaune : information. Pour les élus et les particuliers, ce zonage est un frein à l'urbanisme et au développement local. Avec entre autre la perte de valeur du terrain.

La méthode suisse réduit cet effet. Les zones protégées par des ouvrages voient leur risque diminué. Ce qui présente un compromis entre le développement et la protection. De plus la mise en place de la carte de dangers impose une remise en état des protections existantes. Le zonage et la protection sont obligatoires. Toutes personnes ou collectivités négligeant ou entravant sa mise en place sont tenues pour responsables lors de futures inondations. A Travers cette intégration des ouvrages de protection dans les cartes de dangers, il y a une responsabilisation les acteurs en vu d'assurer leur pérennité.

Dans un second temps, la carte de dangers permet de définir un plan de protection qui prévoit la construction de protections calibrées selon le concept de sécurité différenciée. Elle anticipe aussi la mise en place d'un plan d'évacuation si l'occurrence du phénomène est supérieure à l'occurrence maximum utilisée pour le calibrage de l'ouvrage de protection. En un sens, c'est une gestion intégrée du risque inondation qui permet de limiter les risques et de protéger au maximum la population et ses biens. Pour la fédération, « Guérir coûte plus cher que prévenir⁷ ».

Cependant, on peut parler d'une prise de conscience des Français sur la nécessité de calibrer les ouvrages en tenant compte des enjeux. Ce gestion différenciée est systématique dans la réalisation des réseaux d'assainissements urbains et routiers.

Il existe pour le moment en France peu de chantier de construction de nouveaux ouvrages de protection contre les inondations. Les acteurs de la protection contre les inondations réfléchissent sur l'entretien et le recalibrage du patrimoine de protection existant pour permettre leur fonctionnement optimal lors d'un phénomène de crue. Il n'y a pas actuellement en France de calibrage différencié des ouvrages dépendant de l'occupation du sol à protéger.

⁷ In **Office fédéral des eaux et de la géologie**, 2002. *La protection contre les crues au fil du temps*. OFEG. P8.

Conclusion.

Les inondations sont le risque naturel le plus présent dans le monde. Nul besoin de rappeler les inondations qui se sont déroulés durant la rédaction de ce rapport : Côte historique atteinte en Suisse, inondation de lave torrentielle près de Grenoble, crues de début septembre dans le sud-est de la France et en Belgique, mousson spectaculaire en Inde, inondation de la Nouvelle-Orléans, pour ne parler que des plus médiatiques.

L'établissement de l'atlas de l'Aire et de l'Aisne dans le département des Ardennes est nécessaire pour pouvoir organiser la protection contre les inondations. Même si les enjeux sont faibles, une gestion globale du risque passe par la définition de toutes les zones inondables.

Cependant, il faut relativiser quant aux limites de tels documents. Leurs établissements, relativement identiques entre les deux pays, prennent en compte de nombreuses hypothèses et incertitudes qui font des atlas de Zones Inondables et des cartes de dangers des documents délicats. En effet, ces documents présentent une incertitude de quelques dizaines de centimètres. Si cette incertitude est négligeable pour l'établissement des cartes, dix à vingt centimètres d'eau en plus ou en moins sont loin d'être dérisoires pour des sinistrés.

La France paraît en retard dans la cartographie par rapport à la Suisse. L'élargissement du risque inondation au risque ruissellement et à l'érosion des berges de rivière semble être un renforcement indispensable pour permettre cette gestion globale des risques naturels. La question de la prise en compte des ouvrages de protection peut aussi se poser. Cette prise en compte engendrerait un travail colossal. Elle induirait indubitablement un recensement de tous les ouvrages de protection et une obligation pour les propriétaires de remettre ou maintenir les ouvrages en état. Ce qui n'est pas forcément le but des institutions françaises. Car si les atlas ne prennent pas en compte les ouvrages de protection, le risque est maximisé. En effet, les acteurs de la protection en France partent du principe qu'il existera toujours une crue capable de détruire les protections. Il faut donc simplement, pour limiter les dégâts, restreindre et réglementer l'installation humaine dans les lits majeurs des cours d'eau, champ d'expansion naturelle des inondations.

Bibliographie.

France :

AMOROS, C., Petts, G., 1993. *Hydrosystèmes fluviaux*. Masson (Paris). 300pp.

BRAVARD, J-P., PETIT, F., 2000. *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial*. Armand Colin (Paris)

FAURE, J.B., 2004. *Choix de la modélisation dans le cadre des études hydrauliques*. CEMAGREF, Club Cours d'Eau. 41pp.

GOUTX, D., 2001. *Hydraulique des cours d'eau*. CETMEF, 61pp.

GOUTX, D., LADREYT, S., 2000. *LIDO 2.0 : Guide méthodologique*. CETMEF. 51pp.

HEC, M., 2005. *Etude hydrologique de l'Aisne amont*. Projet individuel IMACOF. 57pp.

Institut Géographique National, 2004. *Systèmes géodésiques*.

JOUANNEAU, J.C., 2002. *Modélisation Hydraulique*. LRPC de Blois

LEBOSSE, A., LADREYT, S., 2000. *LIDO 2.0 : Notice théorique*. CETMEF. 50pp.

LENCASTRE, A., 1991. *Hydraulique générale*. Eyrolles, Paris. 3è édition 2002. 633pp.

Ministère de l'équipement, 1998. *PPRI : guide méthodologique*. La documentation française.

Ministère de l'environnement et du développement durable, 2003. *Circulaire du 04/11/2003 relative à la politique de l'Etat en matière d'établissement des atlas des zones inondables*. MEDD.

PELLA, H., WASSON, Y., SOUCHON, Y., *Caractérisation des vallées alluviales*. CEMAGREF, IFEN, 56pp.

SAFEGE, 2003. *Etude de faisabilité d'aménagements hydrauliques dans les hautes vallées de l'Aisne, de l'Aire et de leurs principaux affluents – volet Hydrologie*. SAFEGE. 70pp.

SALOMON, P., 2000. *Fiabilité des données topographiques et bathymétriques pour les calculs d'hydraulique*. CETMEF, LRPC de Blois. 73pp.

SALOMON, P., 2005. *Protocole d'acquisitions de données pour la réalisation d'études hydrauliques*.

TEKATLIAN, A., 2001. *Etude de sensibilité des modélisations 1D : recensement et quantification des sources d'incertitude externes*. CETE, CETMEF, 67pp.

TEKATLIAN, A., 2004. *Représentation cartographique dans le cadre des études hydrauliques*. CETE méditerranée, Club Cours d'Eau. 56pp.

TEKATLIAN, A., 2001. *Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques*. CETE méditerranée, CETMEF. 74pp.

VIDAL, JP., 2005. *Assistance au calage de modèles numériques en hydraulique fluviale ; apport de l'intelligence artificielle*. Rapport de thèse CEMAGREF, Ecole de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. 310pp.

Sites Internet :

Ministère chargé de l'environnement : www.environnement.gouv.fr

Ministère chargé de l'équipement : www.equipement.gouv.fr

Institut Géographique National : www.ign.fr

Club Cours d'Eau et Environnement :

<http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/bandeau.html>

Banque HYDRO : <http://hydro.rnde.tm.fr/accueil.html>

Suisse :

LÜTHI, R., 2004. *Cadre juridique des cartes de dangers*. PLANAT. 48pp

Office fédéral de l'économie des eaux, Office fédéral de l'aménagement du territoire, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, 1997. *Recommandations 1997 – Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire*. OFEE, OFAT, OFEFP. 32pp.

Office fédéral des eaux et de la géologie, Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication, 2001. *Exigences posées à la protection contre les crues*. OFEG. 5pp

Office fédéral des eaux et de la géologie, 2002. *La protection contre les crues au fil du temps*. OFEG. 14pp

Office fédéral des eaux et de la géologie, 2002. *Plus d'espace pour les cours d'eau*, OFEG. Aquaterra. 14pp

LOAT, R., ZIMMERMANN, M., 2004. "La gestion des risques en Suisse". In *Risque naturel et aménagement en Europe*. Armand Colin, Paris. pp 108-120.

LACE, 1991. *loi fédérale du 21 juin 1991 sur l'aménagement des cours d'eau (LACE)*. RS 721.100, OFCL, Berne, Suisse (www.admin.ch/ch/f/rs/c721_100.html).

Sites Internet :

Swissworld, portail de découverte de la Suisse : <http://www.swissworld.org/>

Législation fédérale : <http://www.admin.ch/ch/f/rs/rs.html>

Office fédéral des eaux et de la géologie : <http://www.bwg.admin.ch/f/>

Plate-forme nationale « Danger Naturel » (PLANAT) : <http://www.planat.ch/index.php?&IID=2>

Table des Matières.

Sommaire.	1
Résumé – Abstract.	2
Introduction.	3
Partie I) Présentation du bassin versant d'étude.	5
1) Situation Géographique.	5
a) L'Aisne.	5
b) L'Aire.	5
c) Le secteur d'étude.	6
2) Géologie.	8
3) Climatologie.	10
4) Hydrologie.	11
5) Hydromorphologie.	13
6) Occupation du sol.	16
partie II) La mise en place d'un Atlas de zones inondables.	17
1) Définition.	18
2) Choix de la modélisation.	19
3) Géométrie du cours d'eau.	20
a) La Photogrammétrie ou modèle numérique de terrain (MNT)	21
b) Levés terrestres.	22
c) Levés Bathymétriques.	26
d) Ouvrages d'art.	27
4) Collecte des informations sur l'écoulement.	28
a) Etude hydrologique.	28
b) Enquête de terrain.	33
5) Synthèse des données de l'Aisne amont dans les Ardennes.	36
a) Géométrie et profil.	36
b) Zone de frottement.	38
c) Laisse de crue.	38
6) Modélisation sous Mascaret.	39
a) Fonctionnement du logiciel.	39
b) Le calage du modèle.	40
c) Schéma récapitulatif d'une modélisation.	42
7) Traitement numérique de la ligne d'eau.	42
8) Rendu Cartographique.	44
Partie III) Les incertitudes et les problèmes de la modélisation.	45
1) Acquisition des données.	45
a) Le MNT.	45
b) Levés terrestres.	45

c) Les données hydrologiques. _____	46
d) Les données hydrauliques. _____	47
e) Les témoignages et les laisses de crues. _____	48
2) Calage du Modèle. _____	48
a) Les pertes de charges singulières et la rugosité. _____	48
b) Les pertes de charges singulières. _____	49
c) Calage sur les laisses de crue. _____	50
d) Le logiciel de modélisation. _____	50
3) Conclusion. _____	51
<i>Partie IV) Les cartes de dangers en Confédération Helvétique. _____</i>	<i>52</i>
1) Contexte de la Suisse. _____	52
a) Contexte Politique. _____	52
b) Contexte géographique. _____	53
c) Les inondations en Suisse. _____	54
2) Les cartes de dangers. _____	55
a) Contexte législatif. _____	55
b) Méthodologie. _____	56
c) Prise en compte des aménagements. _____	58
d) Mise à jour des cartes de dangers. _____	59
3) Comparaison des deux systèmes. _____	60
<i>Conclusion. _____</i>	<i>62</i>
<i>Bibliographie. _____</i>	<i>63</i>
<i>Table des Matières. _____</i>	<i>65</i>
<i>Liste des Figures. _____</i>	<i>67</i>
<i>Liste des Tableaux. _____</i>	<i>68</i>
<i>Liste des Photographies. _____</i>	<i>68</i>
<i>Annexes. _____</i>	<i>69</i>
<i>Annexe I – Les différents espaces d’un cours d’eau de plaine. _____</i>	<i>70</i>
<i>Annexe II - Présentation CETE – LRPC. _____</i>	<i>71</i>
<i>Annexe III – Topographie. _____</i>	<i>74</i>
<i>Annexe IV - Hydraulique fluviale. _____</i>	<i>78</i>
<i>Annexe V - Données hydrologiques. _____</i>	<i>81</i>
<i>Annexe VI - Cartes. _____</i>	<i>86</i>

Liste des Figures.

Figure 1 – Principales étapes des études du risque d'inondation.	4
Figure 2 – Bassin Versant de l'Oise, de l'Aisne et de l'aire (d'après Entente Oise-Aisne).	5
Figure 3 – Limite du site d'étude.	6
Figure 4 – Altitude du bassin versant de l'Aisne amont et de l'Aire (SAFREG, 2003).	7
Figure 5 – Carte géologique simplifiée des bassins versants de l'Aisne amont et de l'Aire.	9
Figure 6 – Cartographie des pluies moyennes annuelles (en mm) sur le bassin de l'Aisne	10
Figure 7 – Réseau hydrographique	12
Figure 8 – Relation entre le coefficient de Gravelius et le débit à l'exutoire (d'après Knapp, 1979)	13
Figure 9 – Les différents rangs de l'ordination de Strahler dans le bassin versant.	14
Figure 10 – Répartition des rangs.	15
Figure 11 – Photo satellite de la zone d'étude, occupation du sol. ©Google earth	16
Figure 12 - Principe de localisation des profils en travers en rivière.	21
Figure 13 – Rendu cartographique d'un Modèle Numérique de Terrain.	22
Figure 14 – les différentes données mesurées par un théodolite.	23
Figure 15 – Théodolite placé sur un des points.	24
Figure 16 – Théodolite placé entre les deux points.	24
Figure 17 –Théodolite placé derrière les points.	25
Figure 18 - Le nivellement par cheminement.	25
Figure 19 - Le nivellement de profils en travers.	25
Figure 20 – Exemple de profil route réalisé lors de la campagne de terrain sur l'Aire.	26
Figure 21 - Exemple de profil rivière : l'Aire à l'usine hydroélectrique de Fléville (08).	27
Figure 22 – Plan de pont réalisé par un géomètre (FAUQUEMBERG LEMAIRE, Géomètres Experts).	27
Figure 23 – Représentation d'un pont avec une fente de Preissmann (Guide Méthodologique LIDO 2.0).	28
Figure 24 – Hydrogramme de la crue de décembre 1993.	30
Figure 25 – Les différents débits de la zone d'étude pour la crue de décembre 1993.	32
Figure 26 - Les différents débits de la zone d'étude pour la crue de projet Q_{100} .	33
Figure 27 – Exemple de profil fini, prêt à être importer dans Mascaret : RD21 à Autry.	36
Figure 28 – Position et PK des profils sur l'Aisne amont.	37
Figure 29 – Profil en long de la crue de 1993 de l'Aisne dans les Ardennes en amont de Sénuc.	41
Figure 30 – Détail de la ligne d'eau au niveau d'Autry.	41
Figure 31 – Schéma récapitulatif du fonctionnement de la modélisation.	42
Figure 32 – Rendu du MNT dans Ophyca.	43
Figure 33 – Rendu du MNSTN dans Ophyca.	43
Figure 34 – Rendu de MNSLE dans Ophyca	43
Figure 35 – Rendu du MNZI dans Ophyca	43
Figure 36 – Rendu de l'atlas des zones inondables avant mise en page.	44
Figure 37 – Distribution axiale des vitesses (Hydraulique générale – A. LENCASTRE).	47
Figure 38 – Abaque de Bradley sur la perte de charge singulière dû aux piles.	49
Figure 39 - Carte de la Suisse (http://fr.wikipedia.org/).	53
Figure 40 - Diagramme des degrés de danger en fonction de la probabilité et de l'intensité.	57
Figure 41 – Concept de sécurité différenciée.	58
Figure 42 – Carte de dangers à l'état initial (à gauche) et après réalisation des mesures de protection contre les crues : commune de Engelberger, canton de Nidwald.	59
Figure 43 : Morphologie d'un fleuve.	70

<i>Figure 44 - Les 8 CETE, leurs zones de compétences, les implantations des Laboratoires régionaux et des Centres spécialisés</i>	71
<i>Figure 45 – Les différents paramètres pris en compte en hydraulique fluviale.</i>	78
<i>Figure 46 – Les paramètres de la charge hydraulique.</i>	79
<i>Figure 47 – Interaction entre la charge hydraulique, la hauteur d'eau et le nombre de Froude.</i>	80
<i>Figure 48 – Propagation de l'onde de choc suivant le régime d'écoulement.</i>	80

Liste des Tableaux.

<i>Tableau 1 – Hauteur des classes de zones inondables.</i>	19
<i>Tableau 2 – Qualification des aléas en fonction de la hauteur et de la vitesse.</i>	19
<i>Tableau 3 – Débits de pointe caractéristiques (m³/s)</i>	29
<i>Tableau 4 – Débits maximums de la crue et dates correspondantes.</i>	29
<i>Tableau 5 – Surface des différents sous-bassins versants de l'Aisne</i>	31
<i>Tableau 6 – Surface des différents sous bassin versant de l'Aire.</i>	31
<i>Tableau 7 – Débits caractéristiques de la crue centennale statistique.</i>	32
<i>Tableau 8 – Estimation du coefficient de Strickler (source CEMAGREF).</i>	34
<i>Tableau 9 – Positions et Altitudes des laisses de crue de 1993.</i>	38
<i>Tableau 10 – les treize fleuves est rivières importantes de Suisse.</i>	53
<i>Tableau 11 – Classes d'intensités des phénomènes (d'après R. Laot 2004).</i>	56
<i>Tableau 12 – les quatre départements du LRPC de Blois et leurs activités.</i>	73

Liste des Photographies.

<i>Photographie 1 – Exemple d'utilisation d'un théodolite.</i>	23
<i>Photographie 2 - Repère de Nivellement de l'IGN.</i>	24
<i>Photographie 3 – Exemple de levé topographique en rivière (bathymétrie).</i>	26
<i>Photographie 4 – Exemple de témoignage : Niveau d'eau atteint par l'Aire à Grandpré (08) lors de la crue de 1993</i>	35
<i>Photographie 5 –Plaques indiquant le niveau maximal d'une crue de 1955 sur un pont de l'Aire.</i>	35
<i>Photographie 6 – Crue de l'Aisne de décembre 1993 au niveau du pont de la RD 221 (M. Toulemonde)</i>	39
<i>Photographie 7 – Exemple d'un Übermuring.</i>	55

Annexes.

<i>Annexe I – Les différents espaces d’un cours d’eau de plaine.</i>	70
<i>Annexe II - Présentation CETE – LRPC.</i>	71
<i>Annexe III – Topographie.</i>	74
<i>Annexe IV - Hydraulique fluviale.</i>	78
<i>Annexe V - Données hydrologiques.</i>	81
<i>Annexe VI - Cartes.</i>	86

Annexe I – Les différents espaces d'un cours d'eau de plaine.

L'étude se porte sur un fleuve ainsi que sur tous les espaces qui y sont liés. Il est donc nécessaire de redéfinir certains termes pour faciliter la compréhension du présent rapport.

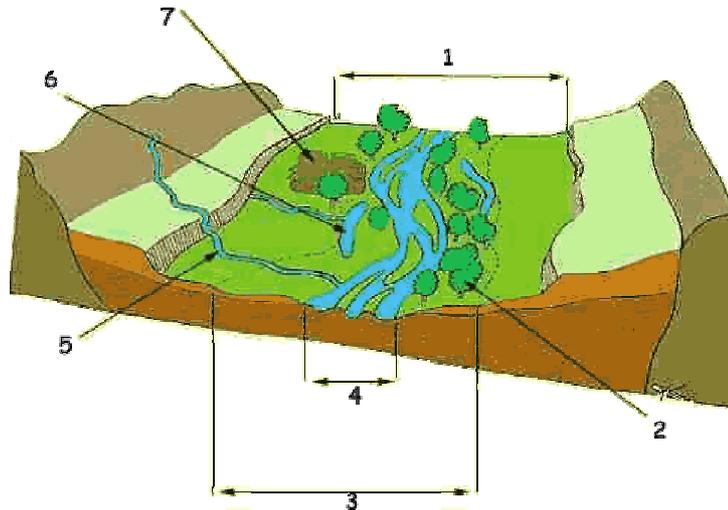


Figure 43 : Morphologie d'un fleuve.

1 : Lit majeur – 2 : Ripisylve – 3 : Espace de liberté – 4 : Lit mineur – 5 : Affluent – 6 : Bras mort – 7 : Marais

- **Le lit mineur** : espace où le fleuve coule en permanence. On peut y définir deux zones : le **bras principal** où coule la majorité du volume d'eau et les **bras secondaires**.
- **Le lit majeur** ou **plaine alluviale** : C'est la zone d'extension des crues. Elle est constituée d'alluvions apportées par la rivière. On trouve habituellement dans les plaines alluviales une végétation hygrophile.
- **Le bras mort** ou **boire** : ancien chenal comblé isolé du fleuve pendant l'étiage.
- **Le franc-bord** : espace du bord des cours d'eau situés entre le chenal et la digue.
- **La ripisylve** : forêt riveraine d'un cours d'eau. Par extension on appelle ripisylve toutes sortes de végétation rivulaire.
- **Espace de liberté** : espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres.

Annexe II - Présentation CETE – LRPC.

Le Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC) de Blois est une division du Centre d'Etude Technique de l'Équipement (CETE) Normandie Centre. Les CETE sont des services déconcentrés du Ministère de l'Équipement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer (METATTM).

Il existe 8 Centres d'Études Techniques de l'Équipement répartis sur l'ensemble de la France (CETE méditerranée, Sud-Ouest, Nord-Picardie, Lyon, Normandie-Centre, Est, Ouest et la DREIF, Direction Régionale de l'Équipement d'Ile de France). Ils ont, en leur sein, 17 Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées et 4 centres spécialisés (Figure 44).

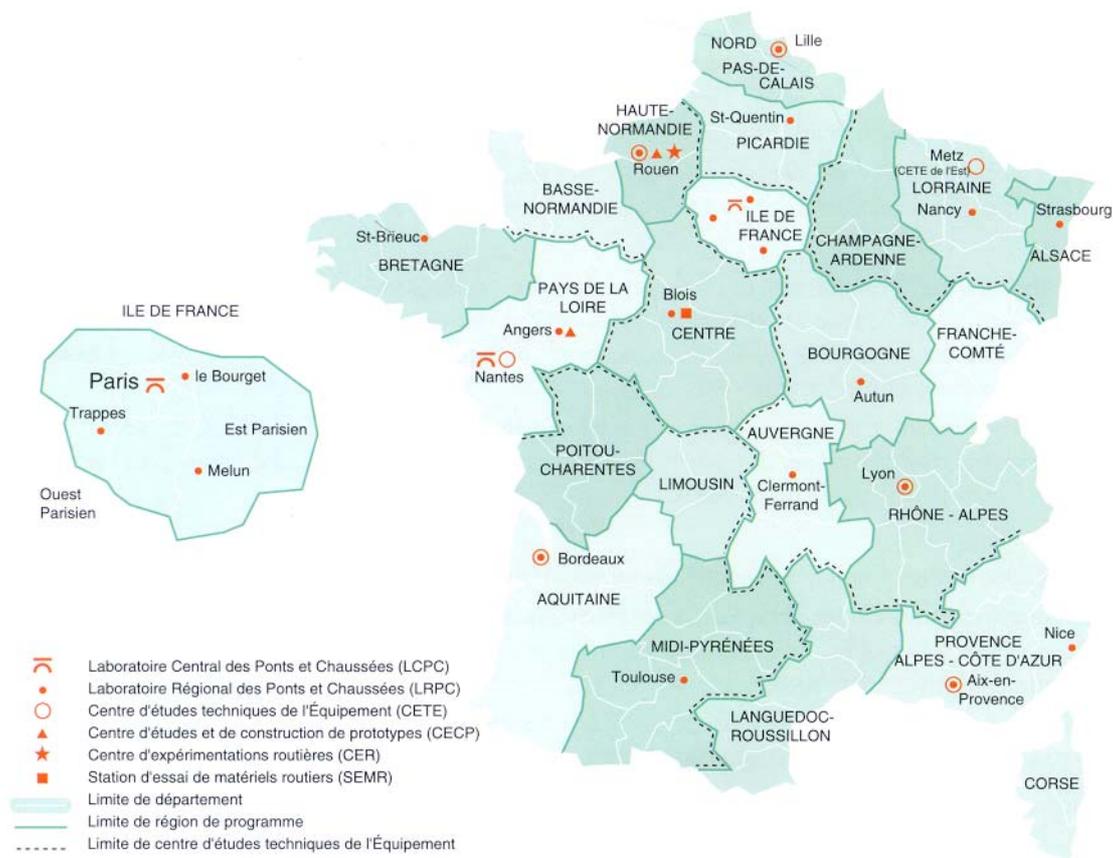


Figure 44 - Les 8 CETE, leurs zones de compétences, les implantations des Laboratoires régionaux et des Centres spécialisés⁸

Les CETE correspondent à des bureaux d'études et d'ingénierie publique au service de tous les acteurs de l'aménagement :

- collectivités territoriales,
- organismes para-publics ou privés,
- services de l'Etat.

⁸ <http://www.lcpc.fr/fr/presentation/collaboration/index2.dml>

Ils interviennent dans de nombreux domaines :

- aménagement du Territoire et renouvellement Urbain,
- habitats et constructions,
- transport et déplacement,
- sécurité Routière,
- environnement et risques naturels,
- développement durable,
- conception, gestion et entretien d'infrastructures, d'ouvrages d'art (Génie Civil),
- informatique,
- recherche et Développement.

Les CETE sont des divisions spécifiques du ministère. En effet, ils ne reçoivent aucune subventions de l'état. Ils subviennent à leurs besoins en vendant leurs prestations aux collectivités locales et aux privés.

Le CETE Normandie Centre, créé en 1971, est constitué de plusieurs divisions localisées à Rouen et à Blois. Il emploie sur les deux sites plus de 531 personnes (2004).

Rouen :

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

Blois :

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

Le Laboratoire des Ponts et Chaussées de Blois, créé en 1959, est rattaché au CETE depuis sa création en 1971. Il est divisé en quatre départements selon leurs activités (Tableau 12) : Géotechnique, Chaussées, Ouvrages d'Art et Environnement.

Le Département Environnement est composé de cinq unités : Acoustique Recherche (AR), Acoustique Opérationnelle (AO), Hydraulique Sédimentologie Recherche (HSR), Hydraulique Risques d'inondation Bathymétrie (HRB), Hydraulique-Risques d'inondation Ruissellement (HRR).

L'unité HRR, dirigée par Mr Stéphane PINEY, m'a accueilli pour la durée de mon stage.

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

Tableau 12 – les quatre départements du LRPC de Blois et leurs activités.

Annexe III – Topographie.

Feuille d'acquisitions des données pour le T2.

In SALOMON, P., 2005. *Protocole d'acquisitions de données pour la réalisation d'études hydrauliques.*

LEVE AU 210		CHANTIER		AISNE		INTERVENANTS		LH/PS	DATE
N° STATION / PROFIL		BERNEUIL aval		H.I.				PAGE	
Point n°	Nature	H	AR	V	AV	Di	HP	Altitude définitive	Croquis
	repère église A		298.7436	300.276		100.954	0.03	46.327	Une lecture d'angle vertical < 300 indique une visée plongeante
	A		300.6258			126.905	1.635	47.26	Une lecture d'angle vertical > 300 indique une visée ascendante
	repère 1		300.6651	320.3327		114.698	1.635	47.26	Lorsque la lecture arrière est < 300 le plan de visée horizontal est au dessus du prisme
	repère 1		301.376	298.621		147.314	1.635	46.93	Lorsque la lecture arrière est > 300 le plan de visée horizontal est au dessous du prisme
	B			299.8285		32.086	1.635	46.93	Ex : $Zpv1 = 46.327 + 0.03 + 100.954 \times \sin(300.298.7436)$
	B			299.7742		197.427	1.635	42.32	Et : $ZA = Zpv + 126.905 \times \sin(300.276.300) - 1.635 = 47.26$
	C			304.2214		70.618	1.635	42.32	$Zpv2 = 47.26 + 1.635 \times 114.698 \times \sin(300.6258.300)$
	C					301.521	1.635	39.98	$Zrep1 = Zpv2 + 147.314 \times \sin(320.3327.300) - 1.635 = 46.93$
	repère					220.693	1.635	39.98	et ainsi de suite pour chaque point du cheminement
	axe chemin					89.585	1.635	44.52	Pour ces points rayonnés il convient de conserver l'altitude du plan de visée déterminé à partir de l'altitude du point C
	axe chemin					107.042	1.635	43.86	
	dalle					124.332	1.635	43.86	
						30.486	1.635	34.07	

Exemple de fiche IGN



Nivellement Général de la France - Réseau Français de Nivellement de Précision

Service Géodésie Nivellement
Repère de nivellement

Matricule :

H.E.Q3 - 7 BIS

Système d'altitude :
NGF - IGN1969 - Altitude normale

109,396 m

Profil : AISNE (L')

Type : M REPERE CYLINDRIQUE DU NIVELLEMENT GENERAL

Année de détermination : 1966

Coordonnées du repère

Système RGF93 - Ellipsoïde : IAG GRS80 - Méridien origine : Greenwich

Longitude :

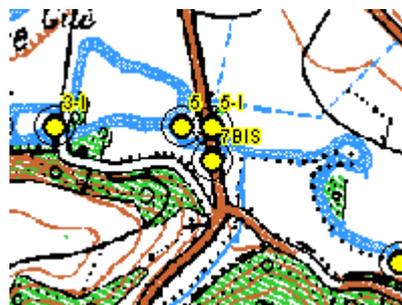
Latitude :

Système RGF93 - Projection LAMBERT - 93

E (km) : **833,50** N(km) : **6 913,40**

Système NTF - Projection LAMBERT - 1

E(km) : **781,60** N(km) : **181,40**



Département : **ARDENNES**

Commune : **SENUC**

Numéro INSEE : **08412**

Feuille : **MONTHOIS**

Numéro : **3012**

Quart : **Nord-Ouest**

Voie suivie : **AISNE (L')**

de BRECY-BRIERES à GRANDHAM

Côté : **Droit**

Distance :

PK : **19,76 km**

Localisation :

Support : **PONT DE LA D.6**

PLINTHE SUR MUR EN RETOUR AMONT , RIVE GAUCHE

Repèrément : **A L'AXE**

A L'AXE

Remarques :

- Repère vu en place en 1966.

Pas de photo

le repère est au centre de la photo

©IGN 2003

Institut géographique national
136bis, rue de Grenelle
75700 PARIS 07 SP

Reproduction autorisée avec mention
©IGN 2003 dans le cadre de la
cartographie réglementaire.

Avertissement

Compte-tenu des risques de destruction ou de déplacement des bornes ou repères, il est indispensable de procéder avant usage à un contrôle de stabilité avec les repères voisins. La responsabilité de l'IGN ne saurait être engagée en l'absence d'un tel contrôle.

Toute remarque concernant la disparition ou le mauvais état des repères doit être signalée au Service de la géodésie : sgn@ign.fr

Exemple de table XLS prête à être importer dans Mascaret

Intitulé du profil	04
Abscisse du profil	3029
indice Zone Stock. gau.	1
indice berge gauche	34
indice berge droite	54
indice Zone Stock. dr.	114
Abscisses	Cotes
0	123.9689245
39.34534915	122.64098
39.95077803	122.6226361
41.76144731	122.6017015
...	...
299.9104338	119.1079844
313.628789	119.3719924
317.6139155	119.5102481
317.6998394	119.5131031
326.2164438	119.9563978
330.9000561	120.0936408
338.5986038	119.832
356.5985591	120.083
356.5985591	118.463
338.5986038	118.212
338.5986038	117.712
341.5985964	116.212
344.5985889	115.012
347.5985815	114.662
350.598574	113.462
353.5985666	112.292
356.5985591	111.662
359.5985517	112.062
362.5985443	112.962
365.5985368	113.362
368.5985294	114.512
371.5985219	115.762
374.5985145	118.162
374.5985145	118.721
356.6085591	118.463
356.6085591	120.083
374.5985145	120.341
391.2187041	121.9919546
417.8648754	123.6148895
436.1399382	125.0890349
436.7820606	124.8866684
...	...
725.5140634	134.4981578
744.2707839	134.6927349
754.8256059	134.5397081
754.9207177	134.53719

Annexe IV - Hydraulique fluviale.

L'hydraulique fluviale est un domaine qui permet, via des calculs mathématiques de comprendre le fonctionnement d'une rivière. Pour cela il faut caractériser les différents paramètres d'une rivière (Figure 45).

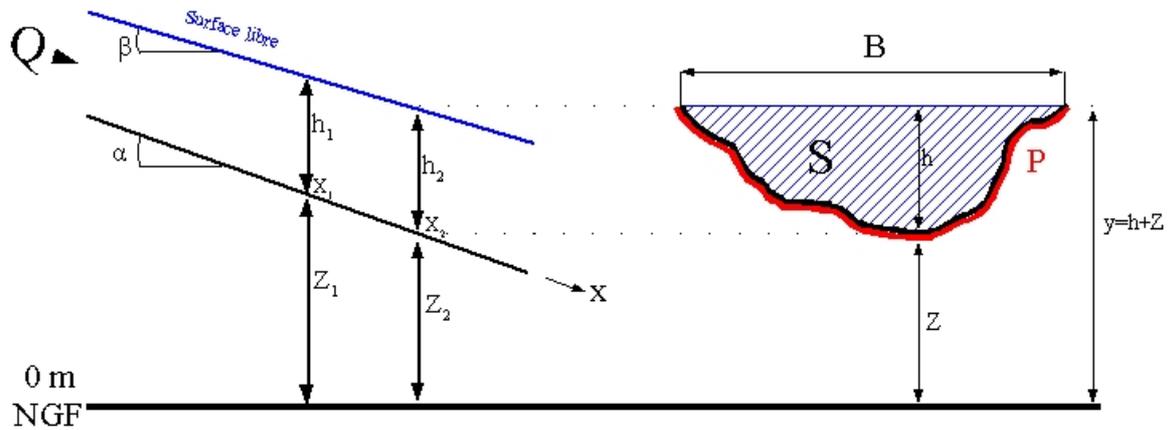


Figure 45 – Les différents paramètres pris en compte en hydraulique fluviale.

Q : Débit (m³/s)

S : Section mouillée (m²)

h : Profondeur (m)

P : Périmètre mouillé (m)

B : Largeur au miroir (m)

Z : Altitude du fond (m)

y : Altitude de la ligne d'eau (m)

Rh : Rayon hydraulique

$$Rh = \frac{S}{P}$$

Dh : Profondeur Hydraulique, profondeur d'un rectangle de surface S et de largeur B.

$$Dh = \frac{S}{B}$$

Pente du fond du cours d'eau : (m/m)

$$J = \sin \alpha = \frac{Z_1 - Z_2}{x_1 - x_2}$$

Pente de la surface libre : (m/m)

$$J_w = \sin \beta = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}$$

q : Débit spécifique (m²/s)

$$q = \frac{Q}{B}$$

La hauteur d'eau, pour une section, dépend de la charge totale (Figure 46). Cette charge hydraulique est définie par le théorème de Bernoulli qui illustre le principe de conservation de l'énergie.

$$H = Z + h + \frac{V^2}{2g}$$

V : Vitesse de l'eau dans la section (m/s)

$$V = \frac{Q}{S}$$

g : accélération de la pesanteur. $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

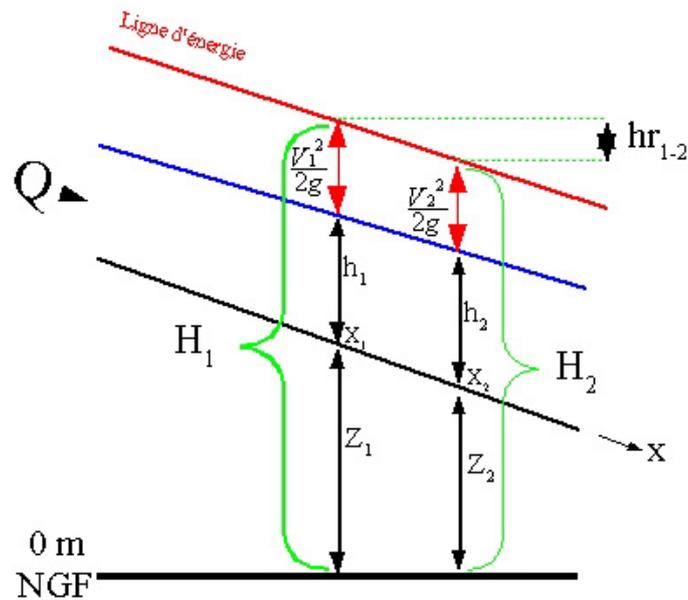


Figure 46 – Les paramètres de la charge hydraulique.

Pente de la ligne d'énergie : $J_e = \frac{H_1 - H_2}{x_1 - x_2}$

Perte de Charge : $hr_{1-2} = H_1 - H_2$

Pour la modélisation, on considère que l'écoulement se fait en mode permanent. Pour tous temps, on considère qu'il n'y a aucune variation de débit, de vitesse et de hauteur d'eau ($Q, V, h = \text{Constante}$).

La géométrie du cours d'eau varie tout le long du linéaire de façon progressive. L'écoulement est alors graduellement varié.

Dans la nature, il existe deux types d'écoulements. Le régime torrentiel et le régime fluvial. Chaque mode d'écoulement possède un résonnement hydraulique propre. En règle générale, les cours d'eau de plaine, comme l'Aisne et l'Aire, ont un écoulement de type fluvial. Ce qui n'exclue pas des passages en torrentiel au niveau des singularités. La limite entre les deux types d'écoulement est caractérisée par le nombre de Froude (Fr) et par le rapport graphique de la charge et de la hauteur d'eau (Figure 47).

Nombre de Froude : $Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$

Quand le nombre de Froude est inférieur à 1, l'écoulement est torrentiel. La hauteur d'eau faible et les vitesses importantes.

Quand le nombre de Froude est supérieur à 1, l'écoulement est fluvial. La hauteur d'eau est élevée et les vitesses faibles.

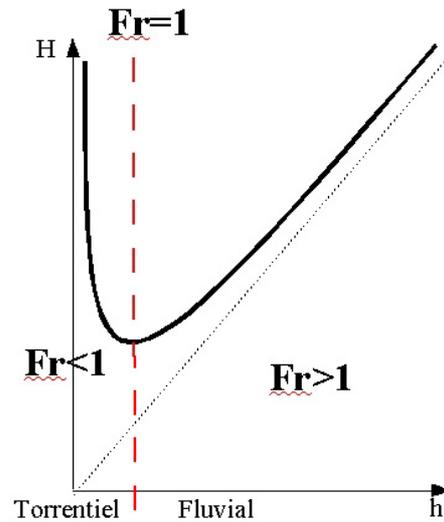


Figure 47 – Interaction entre la charge hydraulique, la hauteur d'eau et le nombre de Froude.

On caractérise la différence d'écoulement par l'action de jeter un caillou dans une rivière. Quand il n'y a pas de courant, des cercles concentriques se forment autour de la zone d'impact. Quand il y a un écoulement, la conséquence de la chute de la pierre est différente suivant la nature de l'écoulement (Figure 48).

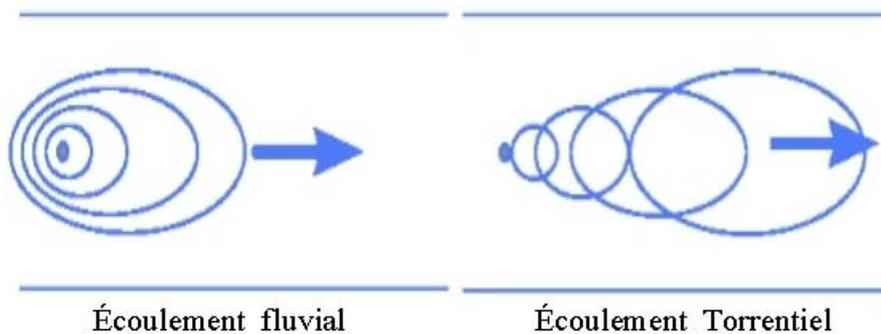


Figure 48 – Propagation de l'onde de choc suivant le régime d'écoulement.⁹

Quand le régime est fluvial, une action en aval remonte le courant vers l'amont. C'est pourquoi on parle de contrôle aval. La hauteur d'eau amont est déterminée par la hauteur d'eau aval.

Quand le régime est torrentiel, on parle de contrôle amont. La hauteur d'eau aval est déterminée par la hauteur d'eau amont.

⁹ GOUTX, D., 2001. *Hydraulique des cours d'eau*. CETMEF, 61pp.

Annexe V - Données hydrologiques.

Données de la banque HYDRO



<http://hydro.rnde.tm.fr/accueil.html>

L' AISNE A PASSAVANT-EN-ARGONNE

code station :
H6021010

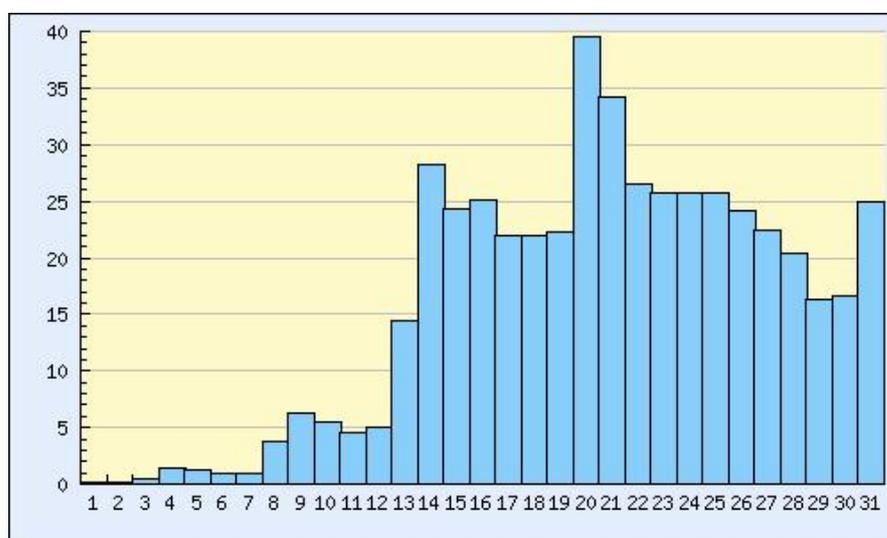
bassin versant :
223 km²

producteur : DIREN
Champagne-Ardenne

décembre 1993

Débits journaliers en m³/s

1	0.189	11	4.550	21	34.20
2	0.187	12	5.020	22	26.50
3	0.430	13	14.40	23	25.80
4	1.340	14	28.20	24	25.70
5	1.290	15	24.30	25	25.80
6	0.906	16	25.10	26	24.10
7	0.918	17	22.00	27	22.40
8	3.690	18	22.00	28	20.40
9	6.280	19	22.30	29	16.30
10	5.450	20	39.50	30	16.60
		31	24.90		



Écoulement mensuel	15.80 m ³ /s	71.00 l/s/km ²	190.0 mm	Écoulement naturel reconstitué	15.80 m ³ /s	71.00 l/s/km ²	190.0 mm
--------------------	-------------------------	---------------------------	----------	--------------------------------	-------------------------	---------------------------	----------

Maximum instantané	44.80 m ³ /s	Le 21/12/1993 à 01:29	310.0 cm	Le 21/12/1993 à 01:29
--------------------	-------------------------	-----------------------	----------	-----------------------

L' AISNE A MOURON

code station :
H6201010

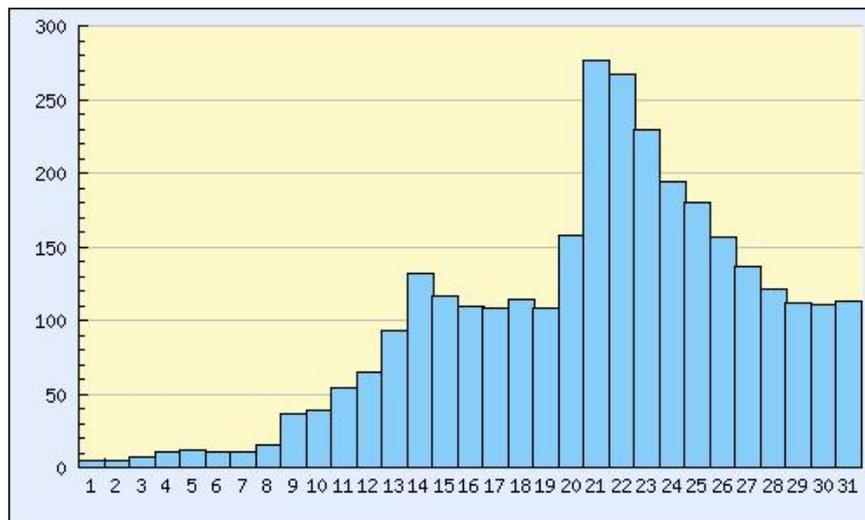
bassin versant :
2280 km²

producteur : DIREN
Champagne-Ardenne

décembre 1993

Débits journaliers en m³/s

1	4.920	11	53.70	21	276.0	#
2	4.890	12	64.50	22	267.0	#
3	6.870	13	92.50	23	229.0	#
4	10.60	14	132.0	24	194.0	
5	11.50	15	116.0	25	180.0	
6	10.80	16	110.0	26	157.0	
7	10.50	17	108.0	27	136.0	
8	15.20	18	114.0	28	121.0	
9	36.40	19	108.0	29	112.0	
10	38.40	20	158.0	30	111.0	
				31	113.0	



Écoulement mensuel # 100.0 m³/s 43.90 l/s/km² 118.0 mm

Écoulement naturel reconstitué # 100.0 m³/s 43.90 l/s/km² 118.0 mm

Maximum instantané 296.0 m³/s # Le 21/12/1993 à 09:47 393.0 cm Le 21/12/1993 à 09:47

L'AIRE A VARENNES-EN-ARGONNE

code station :
H6122010

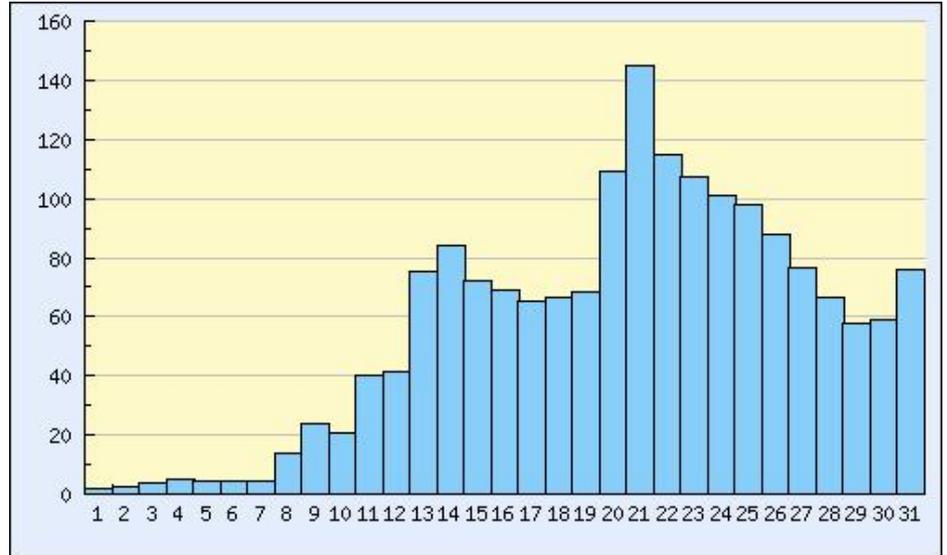
bassin versant :
627 km²

producteur : DIREN
Champagne-Ardenne

décembre 1993

Débits journaliers en m³/s

1	2.180	11	40.30	21	145.0 #
2	2.380	12	41.20	22	115.0 #
3	4.060	13	75.60	23	107.0 #
4	4.940	14	83.90	24	101.0
5	4.400	15	72.10	25	97.70
6	4.200	16	68.90	26	87.70
7	4.590	17	65.20	27	76.80
8	13.60	18	66.50	28	66.40
9	23.70	19	68.30	29	57.60
10	21.00	20	109.0 #	30	59.00
				31	75.70



Écoulement mensuel # 56.90 m³/s 90.80 l/s/km² 243.0 mm

Écoulement naturel reconstitué # 56.90 m³/s 90.80 l/s/km² 243.0 mm

Maximum instantané 158.0 m³/s # Le 21/12/1993 à 05:34 376.0 cm Le 21/12/1993 à 05:34

L'AIRE A CHEVIERES

code station :
H6162010

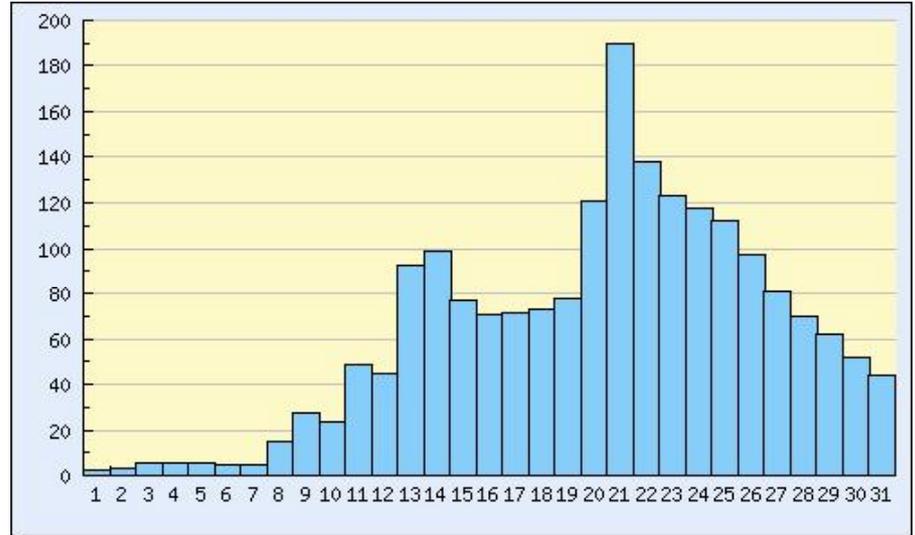
bassin versant :
1000 km²

producteur : DIREN
Champagne-Ardenne

décembre 1993

Débits journaliers en m³/s

1	2.690	11	48.30	21	190.0
2	2.890	12	44.60	22	138.0
3	5.130	13	92.30	23	123.0 #
4	5.860	14	99.00	24	118.0 #
5	5.490	15	77.00	25	112.0 #
6	4.420	16	70.50	26	97.40
7	4.870	17	71.60	27	80.50
8	14.80	18	73.20	28	69.60
9	27.80	19	77.30	29	62.30
10	23.70	20	121.0	30	51.80
		31	43.90		



Écoulement mensuel	#	63.20 m ³ /s	63.20 l/s/km ²	169.0 mm	Écoulement naturel reconstitué	#	63.20 m ³ /s	63.20 l/s/km ²	169.0 mm
Maximum instantané		209.0 m ³ /s		Le 01/12/1993 à 00:00	341.0 cm			Le 21/12/1993 à 07:53	

Exemple de fiche de laisses de crue

Repère de crue

Localisation :

Département : Ardennes
Rivière : Aisne
Commune : Autry
Adresse - Lieu dit : D21

Situation LAMBERT :

X : ≈ 781977.837
Y : ≈ 177082.020

Altitude NGF IGN69 :

Décembre 1993 : 114.993 m

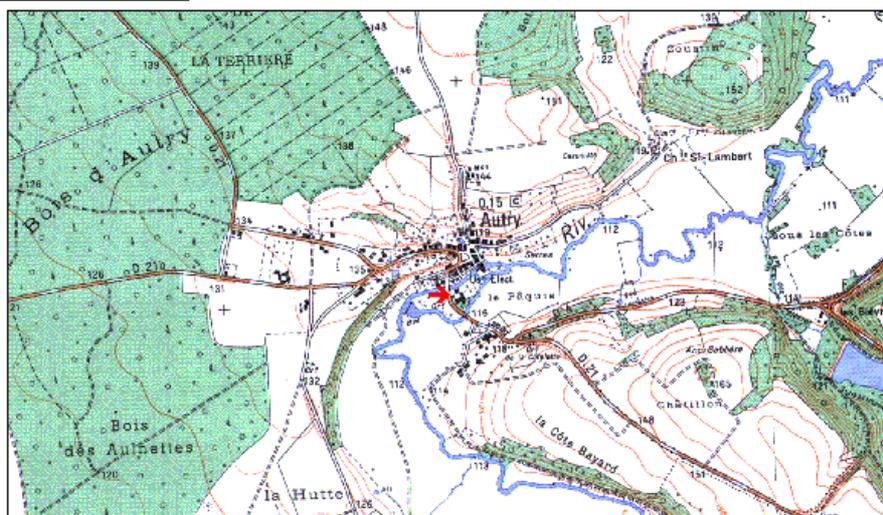
Observation :

Arrivé aux piquets de cloture.
Témoignage du fermier.

Photographie du repère :



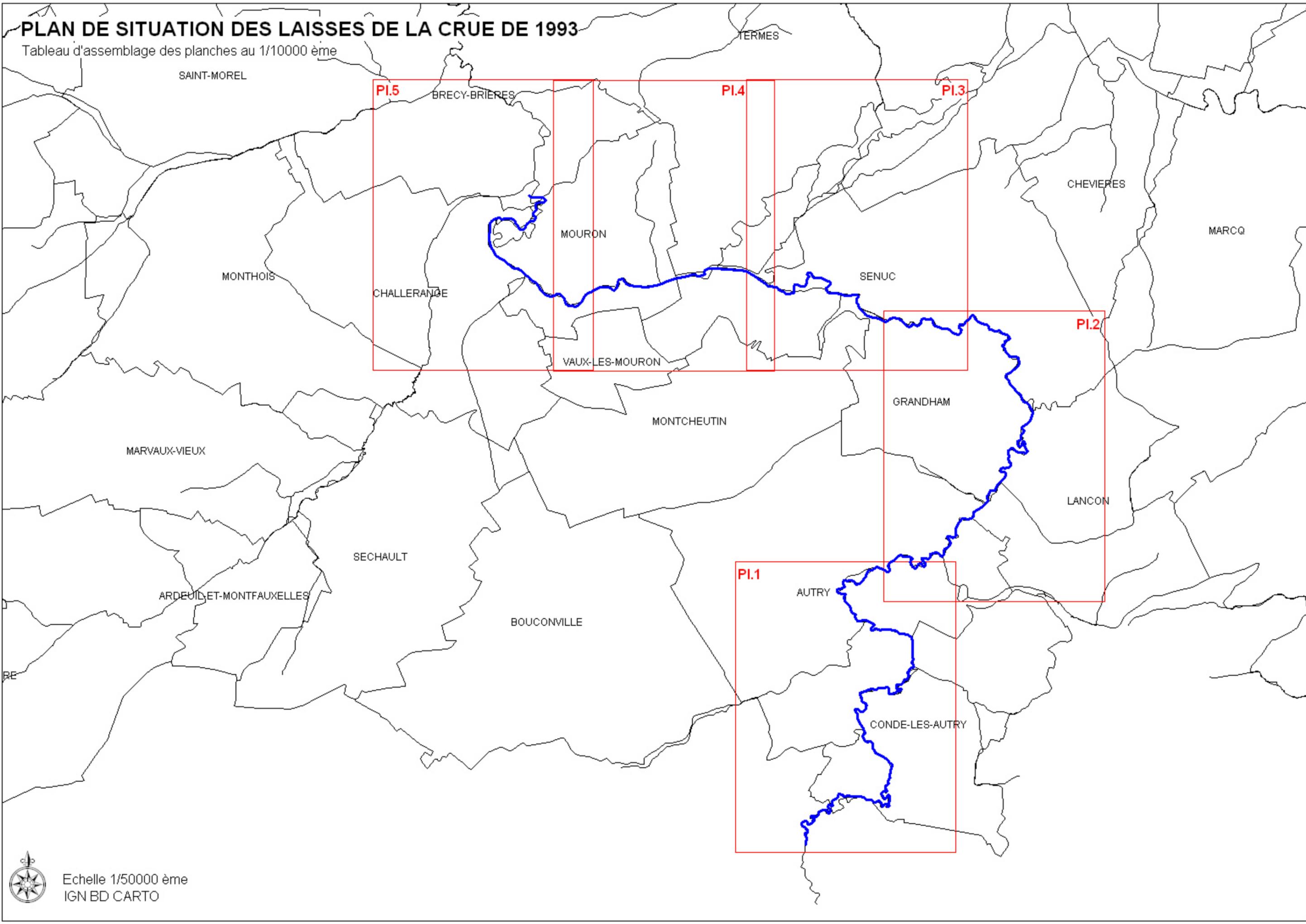
Plan de situation au 1/25000 :



Annexe VI - Cartes.

PLAN DE SITUATION DES LAISSES DE LA CRUE DE 1993

Tableau d'assemblage des planches au 1/10000 ème



Echelle 1/50000 ème
IGN BD CARTO

ATLAS DES ZONES INONDABLES DE L' AISNE DANS LE DEPARTEMENT DES ARDENNES

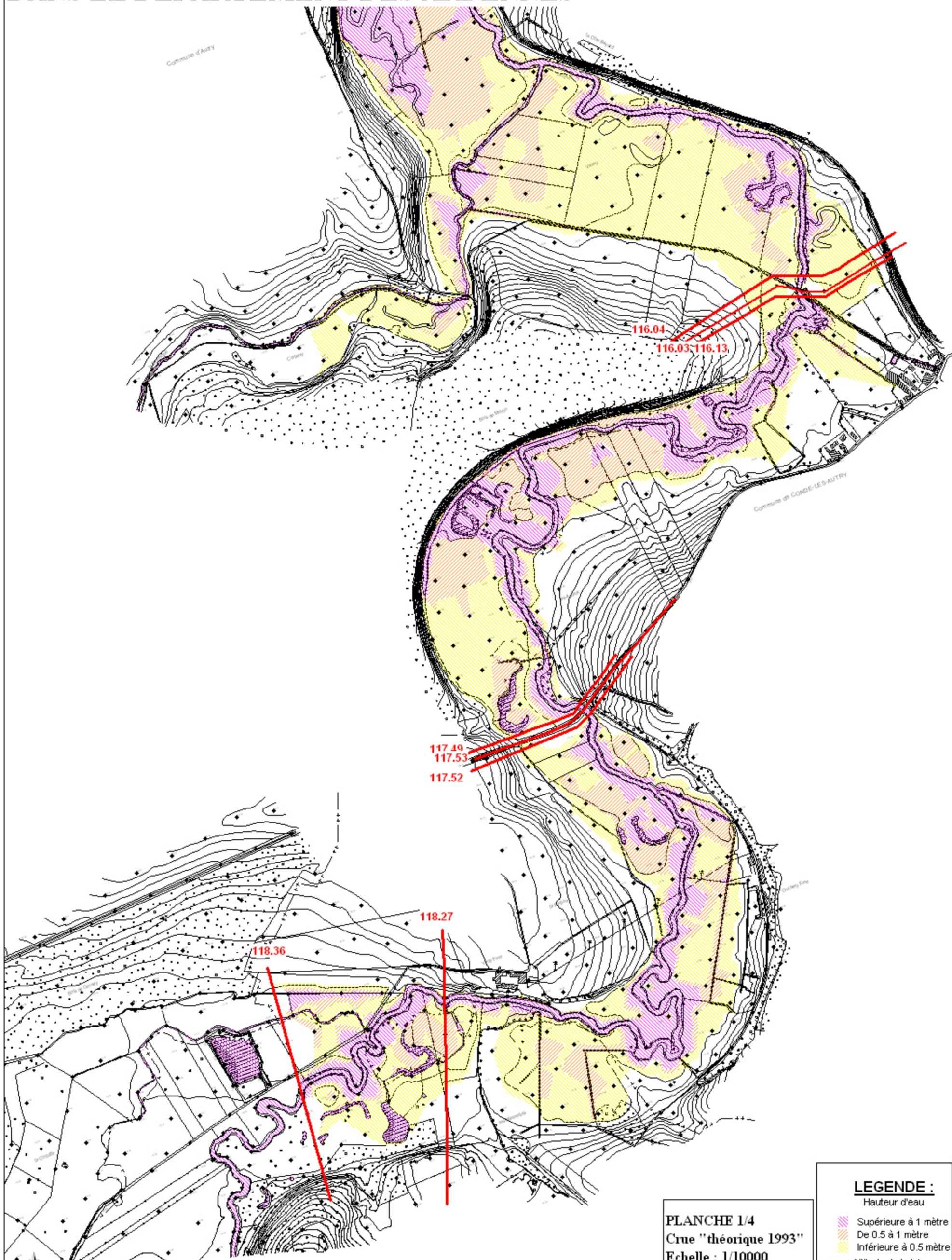


PLANCHE 1/4
Cruve "théorique 1993"
Echelle : 1/10000

LEGENDE :
Hauteur d'eau

- Supérieure à 1 mètre
- De 0.5 à 1 mètre
- Inférieure à 0.5 mètre

108.52 Altitude de la laisse de la crue de 1993 (NGF IGN69)

Septembre 2005

ATLAS DES ZONES INONDABLES DE L' AISNE DANS LE DEPARTEMENT DES ARDENNES

Commune de GRANDHAM

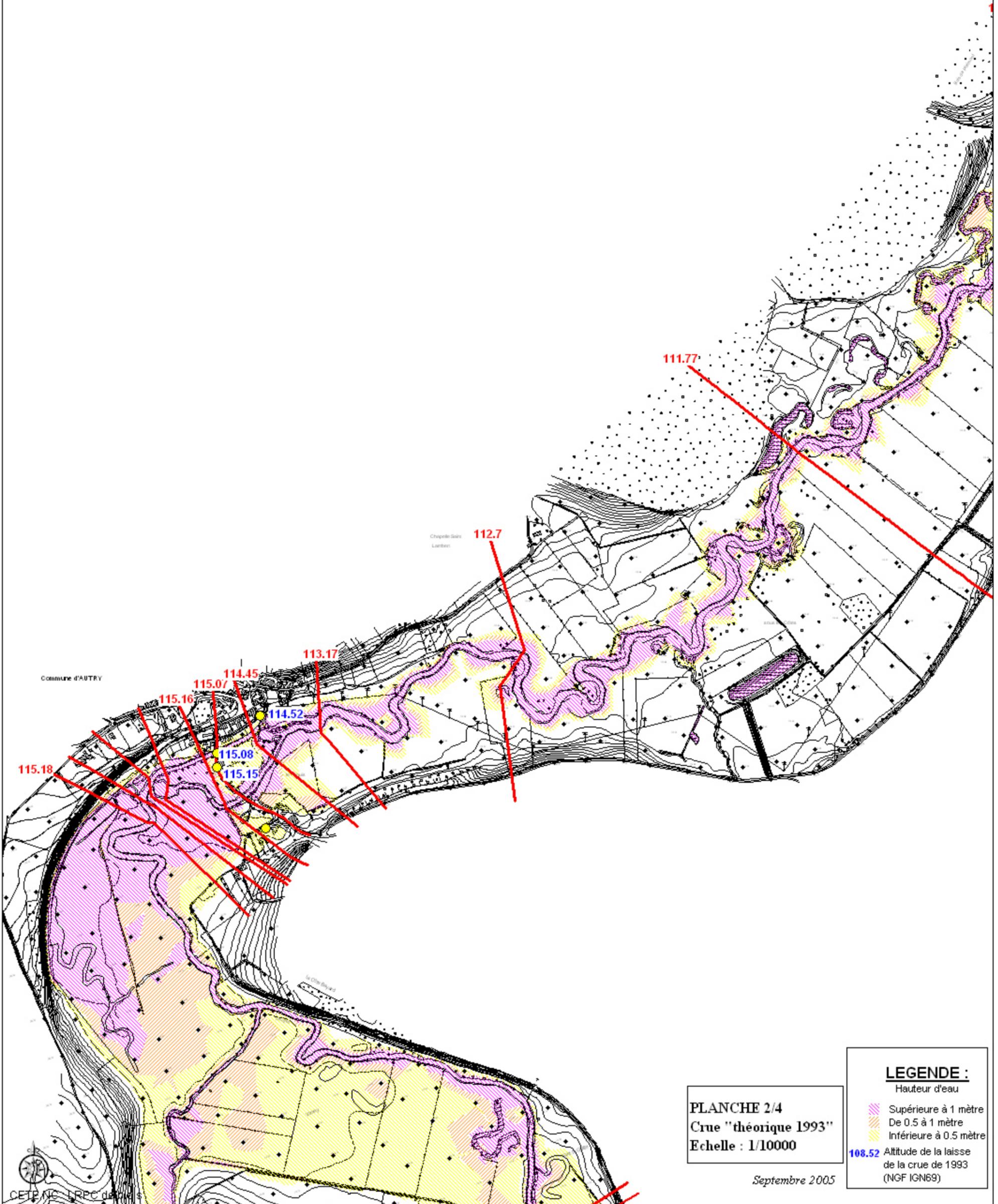


PLANCHE 2/4
Crue "théorique 1993"
Echelle : 1/10000

LEGENDE :
Hauteur d'eau

- Supérieure à 1 mètre
- De 0.5 à 1 mètre
- Inférieure à 0.5 mètre

108.52 Altitude de la laisse de la crue de 1993 (NGF IGN69)

Septembre 2005

ATLAS DES ZONES INONDABLES DE L' AISNE DANS LE DEPARTEMENT DES ARDENNES

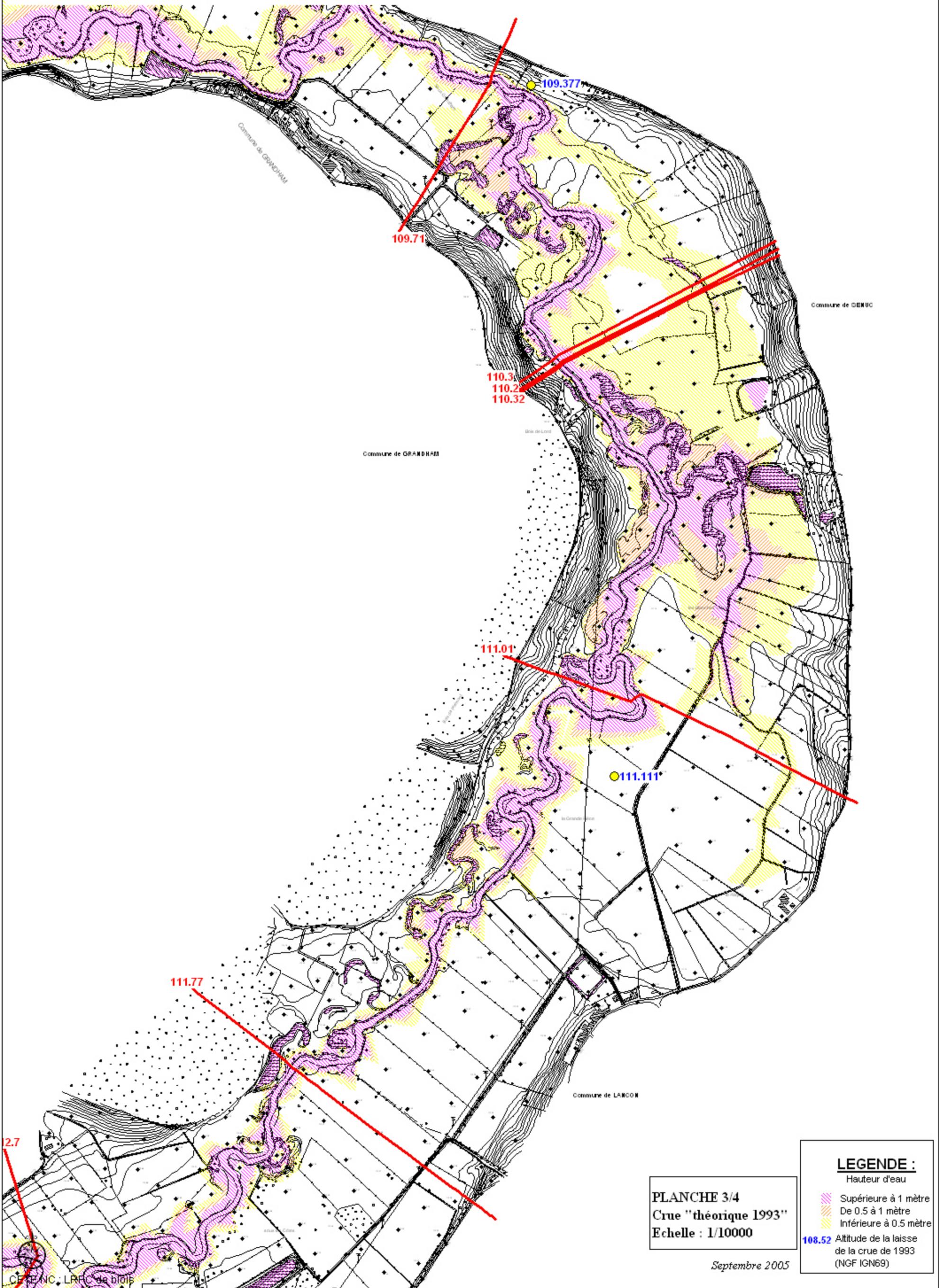


PLANCHE 3/4
Cruve "théorique 1993"
Echelle : 1/10000

LEGENDE :
Hauteur d'eau

- Supérieure à 1 mètre
- De 0.5 à 1 mètre
- Inférieure à 0.5 mètre

108.52 Altitude de la laisse de la crue de 1993 (NGF IGN69)

Septembre 2005

ATLAS DES ZONES INONDABLES DE L' AISNE DANS LE DEPARTEMENT DES ARDENNES

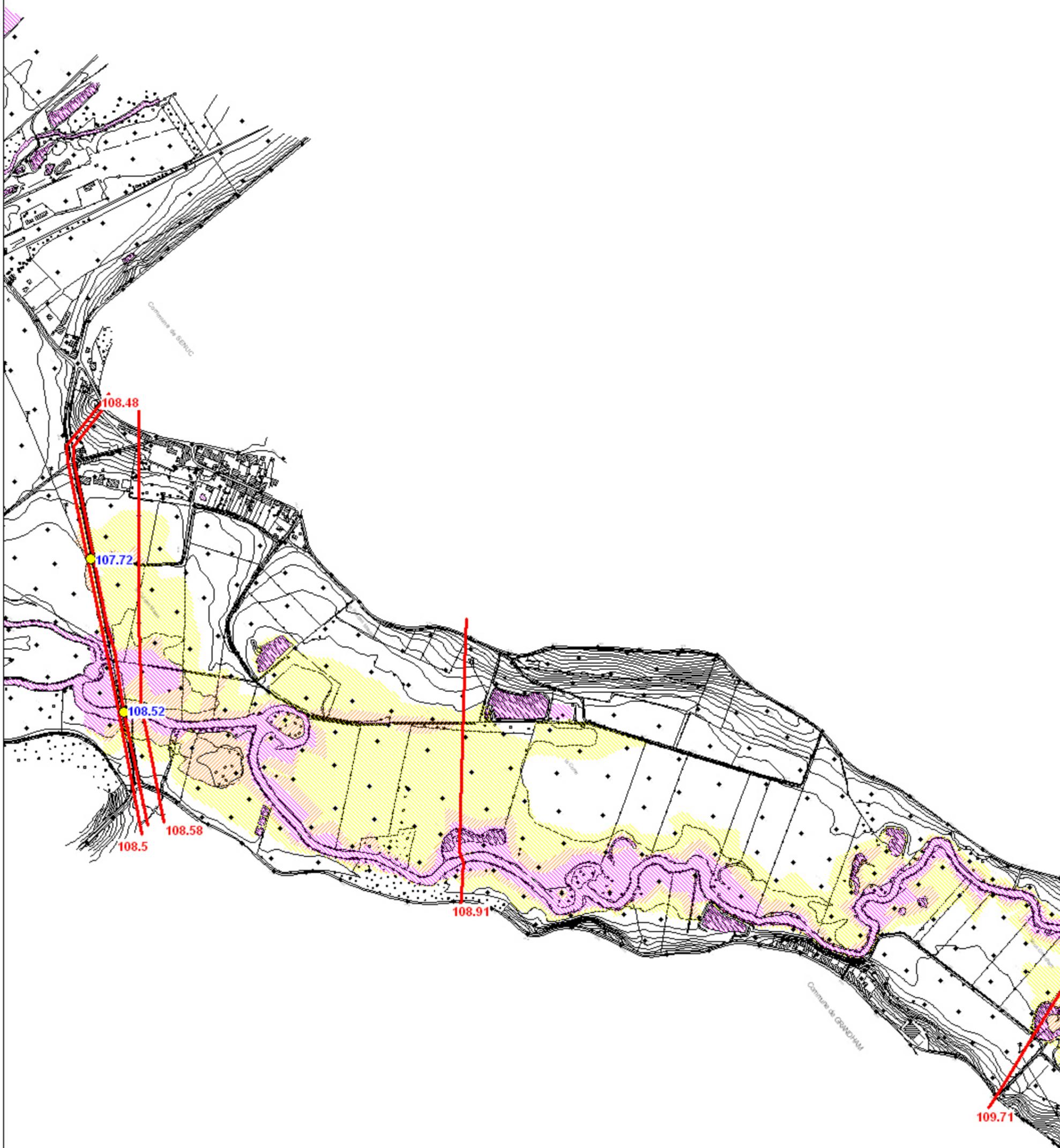


PLANCHE 4/4
Crue "théorique 1993"
Echelle : 1/10000

LEGENDE :
Hauteur d'eau

- Supérieure à 1 mètre
- De 0.5 à 1 mètre
- Inférieure à 0.5 mètre

108.52 Altitude de la laisse de la crue de 1993 (NGF IGN69)