

direction générale
de l'urbanisme,
de l'habitat et de
la construction

Les rapports

Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques

Document principal

septembre 2007



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE,
DU DÉVELOPPEMENT
ET DE L'AMÉNAGEMENT
DURABLES

PREFACE

La Loi sur l'Eau de 1992 et plus récemment la nouvelle Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques de 2006 ont bouleversé les rapports des Services de l'Etat à l'aménagement des cours d'eau, qu'il s'agisse de projets pour le compte de l'Etat, ou de contrôle de projets à l'initiative de collectivités territoriales ou de personnes privées.

Les aspects hydrauliques des études d'impact, ou notices d'incidence nécessaires lors de la réalisation de projets d'aménagements de cours d'eau, la définition des zones de submersion en vue de l'établissement de documents réglementaires de prévention des risques d'inondations, ont, depuis ces dernières années, largement mobilisé les bureaux d'études spécialisés mettant en œuvre, entre autres outils, les techniques et méthodes innovantes de modélisation numérique des écoulements de cours d'eau.

Les services déconcentrés se trouvent souvent dans la position de commander, d'aider à définir, de réceptionner ou de juger des études hydrauliques, notamment sur modèle numérique. Ils ne disposent pas toujours des connaissances et compétences nécessaires pour critiquer efficacement les nombreux aspects techniques de ces prestations intellectuelles spécialisées. Pour des raisons diverses, ils n'ont bien souvent peu ou pas d'expérience de pratique des études hydrauliques en particulier de modélisations, et ils manquent de recul vis à vis des argumentaires techniques, parfois peu clairs des prestataires responsables de l'étude.

C'est ce constat qui a conduit la DGUHC, avec l'appui du CETMEF et du CEMAGREF, à lancer un projet visant à apporter une assistance technique aux Services Déconcentrés à partir de 2000. Aujourd'hui le travail réalisé par le CETMEF, avec l'appui de nombreux autres contributeurs, dont les CETE du Réseau Scientifique et Technique du Ministère de l'Equipement, a abouti à la réalisation du présent guide intitulé « Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques ».

Plus récemment un avis délibéré du CGPC, du CGAAER et de l'IGE, constate aujourd'hui une importance croissante des enjeux relatifs à l'eau, en raison notamment de l'aggravation des problèmes posés, estime que les pouvoirs publics doivent mieux répondre aux attentes de la société, soulignant au passage de sérieuses lacunes de la part de nombreux acteurs dont les services de l'Etat face à des événements survenus au cours des dernières années, constate que l'Etat continue d'avoir une responsabilité majeure dans la protection et la gestion des eaux et des ouvrages hydrauliques et dans la prévention des risques d'inondation nonobstant la poursuite de la décentralisation, et estime que, pour assumer ses responsabilités et sans préjuger des besoins des collectivités et des établissements publics, l'Etat doit disposer de compétences techniques fortes et reconnues dans le domaine de l'hydraulique et de l'hydrologie.

Le présent guide, réalisé et diffusé en parallèle du « guide méthodologique pour l'estimation de la crue centennale dans le cadre des plans de prévention des risques d'inondations » de la DPPR, ne prétend pas remplacer les compétences techniques nécessaires aux services de l'Etat, mais il peut apporter une contribution et une aide aux agents en charge de commander, piloter et évaluer une étude hydraulique, en complément des formations techniques spécialisées et de l'expérience acquise sur le terrain.

Ce guide ne saurait d'ailleurs se suffire à lui-même et sera plutôt perçu comme un support accompagnant des formations au pilotage des études hydrauliques qui seront dispensées dans le réseau des organismes de formation du ministère.

Ce guide a comme destinataires principaux les services déconcentrés de l'Etat, qu'il s'agisse des DDE, DDEA, DDAF, DIREN, SN, dans le cadre de leurs missions d'ingénierie publique, de services instructeurs de Plans de Prévention des Risques ou de Police de l'Eau, mais aussi les collectivités locales dont les services techniques ont à piloter des études hydrauliques souvent complexes.

Le guide a été validé par un comité de relecture, présidé par le Conseil Général des Ponts et Chaussées, avec l'appui du Conseil Général de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Espaces Ruraux et de l'Inspection Générale de l'Environnement. Ce comité de relecture a assuré la validation conjointe de ce guide sur le pilotage des études hydrauliques et du guide méthodologique d'estimation de la crue centennale dans le cadre des plans de prévention des risques, guide rédigé par le CEMAGREF sous maîtrise d'ouvrage de la DPPR. Composés d'experts et d'utilisateurs potentiels de ces deux ouvrages, ce comité a analysé en détail le contenu de ceux-ci et a œuvré à une simplification, une amélioration de la compréhension et de la précision de leur contenu, et a permis d'assurer leur cohérence et leur complémentarité.

REMERCIEMENTS

Le guide méthodologique sur le pilotage des études hydrauliques a été réalisé à l'initiative du Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer (Direction Générale de l'Urbanisme, de l'Habitat et de la Construction), du Centre d'Études Techniques Maritime et Fluviale (CETMEF) et du CEMAGREF, et plus particulièrement des personnes suivantes :

- Dominique CHADOURNE pour la DGUHC
- David GOUTX pour le CETMEF
- Jean-Baptiste FAURE pour le CEMAGREF

Ce guide a nécessité le portage de ce projet afin de mobiliser les experts du réseau scientifique et technique du ministère, mais aussi du CEMAGREF et des bureaux d'études privés. Ce portage du projet a été essentiellement assuré par les personnes suivantes :

- Jean ABELE pour le CETMEF
- Jean-Michel CORNET pour le CETMEF
- David GOUTX pour le CETMEF
- Jean-Baptiste FAURE pour le CEMAGREF
- Jean GABER pour la DPPR
- Lionel MOULIN pour la DRAST

Il a mobilisé dans un premier de nombreux contributeurs qui ont participé à des groupes de travail thématiques et qui ont apporté la matière utile à la rédaction du guide. Les personnes suivantes ont apporté leur contribution :

- | | |
|-------------------------|----------------------------|
| • Philippe BELLEUDY | SOGREAH |
| • Daniel BOILET | SNS |
| • François BROUQUISSE | CETE Sud-Ouest |
| • Patrick CHASSE | CETMEF |
| • Gilles CHEVASSON | DDE63 |
| • Jean-Michel CORNET | Entente Oise-Aisne |
| • Elisabeth DAUTREY | DDE973 |
| • José-Luis DELGADO | CETE Méditerranée |
| • Isabelle DESCATOIRE | CETMEF |
| • Jean-Baptiste FAURE | CEMAGREF |
| • Patrick FOURMIGUE | CETE Méditerranée |
| • Maxime GHIO | |
| • David GOUTX | DIREN Ile-de-France |
| • Jean-Claude GUILLIN | CETE Lyon |
| • Jean-Claude JOUANNEAU | CETE Normandie-Centre |
| • Vanessa LABORIE | CETMEF |
| • Alain POURPLANCHE | CETMEF |
| • Pierre SALOMON | CETE Normandie-Centre |
| • Annick TEKATLIAN | DIREN Languedoc-Roussillon |
| • Pierre-Yves VALANTIN | DRE Languedoc-Roussillon |

La rédaction de la version initiale du guide a été assurée par les personnes suivantes

- François BROUQUISSE CETE Sud-Ouest
- Jean-Michel CORNET Entente Oise-Aisne
- Isabelle DESCATOIRE CETMEF
- Jean-Baptiste FAURE CEMAGREF
- David GOUTX DIREN Ile-de-France
- Annick TEKATLIAN DIREN Languedoc-Roussillon

Ce guide a enfin été analysé, amendé et validé par un comité de validation placé sous la présidence de Daniel Burette et composé d'experts en hydraulique ou en hydrologie, ainsi que d'utilisateurs potentiels de celui-ci

- Daniel BURETTE CGPC, président du comité de validation
- Jacky ASTIER BRL Ingénierie Nîmes
- Philippe BOIS INPG/LTHE Grenoble
- Yannick CADET DIREN Franche-Comté
- Patrick CHASSE CETMEF
- Dominique CHATILLON DDAF du Haut-Rhin
- Philippe DAYET DDE de la Drôme
- Isabelle DESCATOIRE CETMEF
- Patrick FOURMIGUE CETE Méditerranée
- Rémy GARCON EDF/DTG Grenoble
- Michel LANG CEMAGREF
- Alain LIMANDAT INGEROP
- René MARCAUD SILENE
- Xavier MARTIN IGE
- François NAU CGPC
- Xavier PIN CGAAER
- Stéphane PINEY CETE Normandie-Centre
- Michel RAVIER MTETM/DGUHC
- Marie RENNE MEDD/DPPR
- Patrick SIMON MEDD/DPPR
- Hichem TACHRIFT CETE Lyon

Que toutes les personnes ci-dessus qui ont contribué à un moment ou un autre à la production de ce guide en soient ici remerciées.

Document principal

Les fondamentaux d'une étude hydraulique

Table des matières

0. Préambule	9
1. Préparation de l'étude.....	10
1.1. Les objectifs.....	10
1.1.1. Décrire la problématique et ses aspects connexes.....	10
1.1.2. Analyse fonctionnelle et configurations de projet.....	10
1.1.3. Objectifs de la maîtrise d'ouvrage.....	10
1.1.4. Fixer des indicateurs d'évaluation de l'étude en vue de choisir et valider un objectif.....	11
1.2. Inventaire critique des données disponibles.....	13
1.2.1. Collecte des données : bibliographie, archives.....	13
1.2.2. Évaluation des données hydrologiques et hydrauliques	14
1.2.2.1. Données hydrologiques.....	14
1.2.2.2. Données hydrauliques.....	15
1.2.3. Évaluation des données topographiques.....	16
1.2.3.1. Données utiles aux calculs hydrauliques.....	16
1.2.3.2. Données cartographiques.....	17
1.3. Expertise préalable à la rédaction du cahier des charges.....	17
1.3.1. Analyse qualitative.....	17
1.3.1.1. Topologie hydraulique : hydrographie, orographie et géomorphologie...	18
1.3.1.2. Analyse quantitative des paramètres hydrauliques.....	18
1.3.1.3. Complexité de l'étude.....	19
1.3.2. Adéquation données / outils / complexité.....	19
1.3.2.1. Variables à étudier.....	20
1.3.2.2. Phénomènes à représenter.....	20
2. Rédaction du cahier des charges et jugement des offres.....	22
2.1 Rédaction du cahier des charges.....	22
2.1.1 Le préambule.....	22
2.1.2 Contexte et hypothèses de travail.....	23
2.1.3 Objectifs.....	23
2.1.3.1 Cas d'une étude de risque.....	24
2.1.3.2 Cas d'une étude d'aménagement.....	24
2.1.4 Les Moyens, la démarche.....	25
2.1.4.1 La collecte de données.....	25
2.1.4.2 Enquête de terrain.....	26
2.1.4.3 L'étude hydrologique.....	28
2.1.4.4 Données topographiques.....	29
2.1.4.5 Modélisation numérique.....	30
2.1.4.6 Hydrogéomorphologie.....	32
2.1.5 Rapports et communication.....	33

2.1.5.1 Les rendus écrits.....	33
2.1.5.2 Les rendus oraux.....	34
2.1.5.3 Les rendus informatiques.....	34
2.2 Jugement des offres.....	35
2.2.1 La démarche.....	35
2.2.1.1 La note technique.....	35
2.2.1.2 Les compétences techniques et les références du bureau d'étude.....	36
2.2.1.3 Les capacités du bureau d'études et de ses techniciens.....	36
2.2.2 Le prix de la prestation.....	36
3. Suivi de l'étude et gestion de ses produits.....	37
3.1. Déroulement général d'une étude.....	37
3.1.1. Réunion de lancement de l'étude	37
3.1.2. Collecte et analyse des données.....	38
3.1.3. Construction, calage et validation de l'outil d'analyse.....	38
3.1.4. Fonctionnement actuel du secteur d'étude.....	39
3.1.5. Conception de l'état projeté.....	39
3.1.6. Livraison du résultat final.....	40
3.2. Les critères de validation de l'étude.....	40
3.2.1. Comptes-rendus des observations de terrain.....	40
3.2.2. Synthèse bibliographique.....	41
3.2.3. Fonctionnement hydrologique.....	42
3.2.4. Choix de l'outil d'analyse.....	43
3.2.5. Pertinence du calage de l'outil d'analyse.....	44
3.2.6. Cohérence des résultats	45
3.2.7. Vérification des hypothèses de calculs	45
3.3. Sensibilité des calculs et gestion des incertitudes.....	46
3.3.1. De l'incertitude en hydraulique.....	46
3.3.2. Les sources de l'incertitude.....	46
3.3.2.1- Les incertitudes liées aux mesures de données.....	47
3.3.2.2- Les incertitudes liées à la représentativité de l'information.....	47
3.3.2.3- Les incertitudes liées aux données reconstituées.....	48
3.3.2.4- Les incertitudes liées aux hypothèses de modélisation.....	48
3.3.2.5- Incertitudes spécifiques liées au régime transitoire.....	48
3.3.2.6- L'évolutivité des données significatives.....	49
3.3.3. Description des tests de sensibilité.....	50
3.3.3.1- Etape n°1a : les tests de sensibilité portant sur les valeurs imposées.....	51
3.3.3.2- Etape n°1b : les tests de sensibilité portant sur les paramètres de calage.....	52
3.3.3.3- Etape n°2 : analyser le faisceau des lignes d'eau.....	52
3.3.4. Spécifier les tests de sensibilité.....	53
3.4. Archivage, propriété et droits d'usages des produits de l'étude.....	53
3.4.1. Archivage des produits de l'étude.....	54
3.4.1.1. Le rapport.....	54
3.4.1.2. Les fichiers de calcul.....	54
3.4.2. Propriété et droits d'usage des données produites à l'occasion de l'étude.....	55
3.4.2.1 Définition des données publiques	55
3.4.2.2 Protection des données publiques	55
3.4.3. Propriété et droits d'usage des œuvres produites.....	56
3.4.3.1 Définition des œuvres	56
3.4.3.2 Protection juridique des œuvres	56
3.4.3.3 Des bonnes manières en matière d'œuvres	57
3.4.3.4 Cahier des Clauses Administratives Générales - prestations intellectuelles (C.C.A.G. - P.I.).....	58
3.4.4. Cas particulier des logiciels de modélisation numérique.....	58

0. Préambule

Dès lors qu'une question se pose sur l'état des écoulements d'un cours d'eau ou sur leur perturbation potentielle par un élément interagissant avec son lit majeur, une étude hydraulique permet d'obtenir la réponse attendue.

Nombre de publications présentent le format typique d'une étude hydraulique classique. Seule la complexité des interactions entre les disciplines techniques mobilisables peut varier d'une publication à l'autre, en fonction notamment des affinités des auteurs pour l'une ou l'autre méthode d'analyse.

Au stade actuel de l'évolution de ces disciplines techniques, il est possible de proposer le format typique suivant, qui structure, dans le présent guide, la déclinaison en thèmes spécialisés venant renforcer les Fondamentaux.

- a) Identification des objectifs recherchés et des analyses nécessaires et afférentes, y compris le choix des scénarios hydrologiques et hydrauliques et la représentation souhaitée pour la restitution des résultats,
- b) recueil et lecture critique de la bibliographie existante dont la recherche historique;
- c) analyses qualitatives permettant de déterminer la topologie des écoulements dans les différentes situations hydrologiques envisagées
- d) recueil des données hydrométriques, hydrologiques et hydrauliques, y compris celles permettant de préciser les points laissés en suspens lors d'études antérieures (b) ;
- e) détermination des conditions aux limites du secteur d'étude, dont étude hydrologique précise du périmètre de l'étude et des conditions aux limites prenant en compte l'analyse précédente,
- f) recueil des données bathymétriques et topographiques représentatives des écoulements analysés et également conformes aux rendus cartographiques souhaités (c) ;
- g) construction des outils d'analyse hydraulique adaptés à la topologie présumée des écoulements (c) et aux données hydrauliques (d) et topographiques (f) recueillies ;
- h) calage des outils d'analyse hydraulique sur les jeux de données disponibles (d) et éventuels compléments de données hydrauliques (d) ou topographiques (f) ;
- i) simulation des situations de projet et des événements hydrologiques (e) idoines et production des résultats attendus ;
- j) analyse des résultats (i) en fonction des objectifs visés (a) et conclusions partielles ;
- k) lorsque l'étude doit conduire à concevoir un aménagement fluvial intégré, révision éventuelle des objectifs initiaux (a) et fixation de nouveaux objectifs révisés et de scénarios complémentaires ;
- l) reprise des tâches (i) et (j) et obtention du résultat final.
- m) Mise en forme et contrôle du résultat final selon le mode d'exploitation souhaité (cartographique, tableaux de résultats pour poursuite de calculs ultérieurs, synthèse et extraction de données dimensionnantes pour un ouvrage etc...)

L'ambition de ce chapitre est de fournir au lecteur les clefs d'écriture d'un cahier des charges permettant d'obtenir, au terme de l'étude, les réponses aux questions posées par la problématique de la maîtrise d'ouvrage. Rendu succinct dans un souci de clarté et de lisibilité, ce chapitre est adossé à une déclinaison plus détaillée, plus technique et donc, plus difficile d'accès, des thèmes techniques spécialisés mobilisés durant la rédaction du cahier des charges, le jugement des offres et le suivi de l'étude.

1. Préparation de l'étude

1.1. Les objectifs

Le maître d'ouvrage doit décrire sa problématique aussi complètement qu'il peut le faire, en incluant les aspects connexes, avant d'exposer ses objectifs.

1.1.1. Décrire la problématique et ses aspects connexes

Dans un premier temps, le maître d'ouvrage doit décrire le motif de l'étude et exposer le contexte politique, réglementaire, etc. dans lequel sa demande se place. Il doit aussi donner des éléments de l'histoire du cours d'eau (modifications de tracés, endiguements, curages, canalisation, connexion ou déconnexion avec le réseau hydrographique naturel et/ou artificiel), des événements (crues, étiages le cas échéant) et des études déjà réalisées (notamment leurs conclusions éventuellement contradictoires ou insatisfaisantes).

Dans un second temps, le maître d'ouvrage doit mettre sa demande en regard de l'état initial du cours d'eau et imaginer ce que pourrait être l'impact de ce qu'il veut y faire sur d'autres aspects que ceux visés directement par l'étude (niveau d'eau, hauteur, vitesse moyenne, vitesse locale, ligne de courant, mouvement de sédiments, érosions et dépôts, qualité physico-chimique, faciès fonctionnels, mobilité latérale, connectivité, etc.)

Ainsi, par exemple, la suppression d'un seuil de moulin désaffecté qui serait soupçonné d'aggraver les niveaux d'eau atteints lors des crues faibles et moyennes au droit d'un quartier inondé peut entraîner, pour les eaux moyennes et les étiages, des abaissements significatifs du niveau des eaux libres (pouvant affecter le fonctionnement de prises d'eau), du niveau de la nappe phréatique (pouvant assécher des zones humides riveraines), modifier l'oxygénation des eaux et les faciès du fond, faciliter la migration piscicole, déstabiliser les berges, remobiliser des sédiments fins (éventuellement pollués).

Les différents types d'études qu'il est possible de piloter sont : cartographie de Zones inondables et aléa (éventuellement en vue d'un PPR), dimensionnement de projet (localisé ou aménagement rivière), étude d'incidence (pour dossier réglementaire)....

1.1.2. Analyse fonctionnelle et configurations de projet

Le maître d'ouvrage doit ensuite effectuer l'analyse fonctionnelle de sa problématique afin d'établir clairement les configurations qui l'intéressent. Ces configurations sont les suivantes :

- des états topographiques de la vallée : état actuel, état antérieur connu, état futur résultant d'une action humaine ou d'une évolution naturelle prévisible, etc.
- des états hydrologiques du cours d'eau : écoulement courant (module), étiage ou basses eaux (préciser la sévérité), crue de plein bord ou hautes eaux ou crue morphogène, crues fréquentes, rares ou exceptionnelles, historiques ou synthétiques.
- des états hydrauliques du réseau hydrographique (le cas échéant) : états de marée, concomitance de crues dans une confluence en aval ou au droit d'un affluent, etc.
- des scénarios de situations projetées : projets d'aménagement (à décliner en variantes), rupture accidentelle d'ouvrages sur le lit mineur en amont ou en aval, brèche dans une digue ou un remblai jouant le rôle de digue malgré lui, etc.

1.1.3. Objectifs de la maîtrise d'ouvrage

Enfin, le maître d'ouvrage doit fixer des objectifs et tenter d'indiquer les critères de satisfaction des objectifs qu'il vise. Ces objectifs doivent être décrits en termes clairs à partir des configurations et porter si possible sur les paramètres objectifs hydrauliques ou plus généralement potamologiques ainsi que sur les modes de restitution des résultats.

A titre d'exemple, on rencontre communément les thèmes suivants, pour lesquels on peut fournir quelques objectifs types, de manière non exhaustive :

- ↪ la lutte contre les inondations, le maître d'ouvrage doit savoir qu'il ne pourra abaisser les niveaux maximums atteints que dans la mesure où le secteur concerné (au sens hydraulique, c'est-à-dire, y compris en aval de la zone d'enjeux) comporte plusieurs points critiques générant une gêne sensible aux écoulements, qui peuvent être supprimés. De même, la submersion est parfois si importante que les seules améliorations envisageables ne puissent être obtenues que par l'endiguement complet et se réduisent à une atténuation des dommages pendant l'inondation. (réduction significative du temps d'inondation par accélération du ressuyage, protection rapprochée des enjeux, annonce de crue et évacuation, etc.). Une protection est conçue pour une crue donnée c'est à dire que la protection est totale pour la crue donnée tant que l'ouvrage résiste mais par hypothèse il est conçu et entretenu pour cela.
- ↪ les études préalables à la réalisation d'ouvrages hydrauliques, ayant vocation à agir sur les écoulements, les gammes de débit dans lesquelles le maître d'ouvrage souhaite le maximum d'efficacité (situation de projet) doivent être précisées clairement. Pour d'autres débits, recouvrant éventuellement certaines gammes de débit de projet, le maître d'ouvrage voudra simplement atténuer les interactions avec le milieu naturel et l'environnement : ce seront les situations de vérification. Dans certaines conditions inhabituelles (rupture d'ouvrages voisins, concomitance exceptionnelle d'événements naturels ou non, vandalisme, sabotage ou destruction, mise hors-service des systèmes de régulation par un orage, etc), l'ouvrage devra se comporter de sorte qu'il n'aggrave pas la situation déjà exceptionnelle pour le secteur sous son influence : ce sera alors une étude de danger.

1.1.4. Fixer des indicateurs d'évaluation de l'étude en vue de choisir et valider un objectif

Il s'agit de déterminer, a priori, les paramètres, qui devront faire l'objet d'une réponse quantifiée par le prestataire en cours d'étude, et qui permettront aux maîtres d'ouvrage de :

- s'assurer qu'un certain nombre de points précis et indispensables pour juger de la pertinence du résultat seront analysés,
- choisir une solution optimale si plusieurs scénarios sont possibles,
- avoir une vision plus ou moins exhaustive selon le sujet étudié, des impacts du projet, au sens large, (technique, financier et sociologique) pour anticiper le degré de complexité du projet.

Le choix des paramètres est directement lié à l'objet de l'étude. Selon la nature du paramètre et le degré d'évaluation demandé, il peut s'agir de valeurs directement quantifiées par le calcul ou des valeurs estimatives et codifiées sur une échelle (exemple : impact paysager 0 = aménagement qui s'insère bien dans le paysage, 3 = aménagement qui provoquera une gêne significative pour les riverains etc...). Ce choix doit aussi être fait en fonction de l'incidence environnementale du projet et de ses variantes éventuelles. Le choix du projet doit être explicité dans une étude réglementaire qui est l'étude d'incidence, partie du dossier d'autorisation au titre de la loi sur l'eau. Cette étude peut comprendre une étude de danger.

Les tableaux suivant proposent des pistes de réflexion pour permettre à chaque maître d'ouvrage d'établir sa grille d'indicateurs. Pour que la comparaison demeure facile, il est préférable de ne retenir en synthèse que quelques critères emblématiques du projet.

Paramètres techniques		
hydrologique	« hydraulique »	« géotechnique »
Taux de protection nominal offert par l'ouvrage (en période de retour de la crue par exemple).	Augmentation ou diminution de H et V sur le secteur d'études et selon les scénarios hydrologiques.	Sécurisation de l'ouvrage (possibilité de création d'un déversoir pour une digue, risque de dysfonctionnement)
Taux de protection limite de l'ouvrage (en période de retour de la crue par exemple).	Impact sur la dynamique fluviale (risque d'érosion, d'incision, amélioration de la situation – cas d'une remise en eau d'un bras mort etc...	Faisabilité de l'ouvrage (possibilité d'implantation, estimation de la difficulté de réalisation ancrage, accès etc...)
	Modifications de l'hydrogramme, volume stocké ou déstocké, temps de submersion etc...	Degré d'entretien prévisible
	Dimensions de l'ouvrage requis par type de scénario hydrologique.	
	Zones et enjeux concernés par chaque scénario	
	Statut de l'ouvrage proposé (futur ouvrage intéressant la sécurité publique etc...)	

Paramètres de contexte	Paramètres réglementaires	Paramètres économiques
Impacts paysagers	Anticipation des rubriques principales visées par la Loi sur l'Eau et déclinaison en procédure qu'il faudra engager (déclaration ou autorisation) de manière à connaître le planning de la suite du projet	Coûts d'investissement
Impacts sur le fonctionnement local (modifications d'infrastructures etc...)	Anticipation de la réglementation relative aux risques.	Coûts de fonctionnement
Degré prévisible d'approbation locale – popularité du projet -...	Existences d'autres réglementations (ZNIEFF, ZICO, arrêtés de biotope...)	

La synthèse peut utilement être faite à l'aide d'un tableau croisant les paramètres et les scénarios, par exemple :

	Taux de protection	Variation sur la hauteur en cm au droit du profil n°(à comparer à la situation non aménagée)	Enjeux protégés	Impacts paysagers	Coût d'investissement
Scénario 1 « rétention dans un bassin amont »	Crue décennale	+ 2 cm	15 maisons	0 (digue bassin ne dépassant pas 1.5 m)	850 k€
Scénario 2 « digue sur secteur A + 1 bassin)	Crue vingtennale	+ 3 cm	25 maisons	- (digues de protection rapprochée face aux maisons)	1 000 k€
Scénario 3 « digue en A et B + 2 bassins »	Crue centennale	+ 10 cm	27 maisons	-- (digues de 3.5 m max, nombreuse et visibles)	1 500 k€

Sur cet exemple fictif et simpliste concernant un projet de protection, on peut estimer que le scénario de protection pour une crue centennale n'apporte pas une plus value de protection significative au regard des inconvénients (coût, impacts paysagers) et soumettre à concertation les scénarios 1 et 2, en reprenant d'autres paramètres pour éventuellement approfondir l'évaluation du projet.

1.2. Inventaire critique des données disponibles

La nature des données recherchées concerne principalement : l'hydrologie, la topographie et l'hydraulique.

Préalablement à la collecte des données les zones d'étude relatives à ces thèmes doivent être définies :

- ☞ Bassin(s) versant(s) de l'étude hydrologique ;
- ☞ Secteur(s) de vallée(s) fluviale(s) pour la topographie et l'hydraulique.

A ce stade d'investigations il est habituel de prévoir des aires plutôt larges et de les réduire ultérieurement.

Cet inventaire critique constitue le préalable à toute étude hydraulique. Dans la mesure du possible, en particulier quand le Maître d'Ouvrage possède ses propres archives sur le cours d'eau à étudier, il est souhaitable, qu'au moins l'inventaire et si possible l'analyse critique, soient réalisés par le Maître d'Ouvrage. Ceci pour deux raisons :

- ☞ La connaissance acquise par cette analyse est un préalable indispensable à la rédaction du cahier des charges ;
- ☞ La réalisation de cette tâche par un prestataire extérieur est souvent décevante car difficile à définir, et donc à rémunérer.

1.2.1. Collecte des données : bibliographie, archives

Les sources de données sont multiples et ne peuvent être citées de manière exhaustive. Les principales sont les suivantes :

- ↪ Services de l'Etat : DDE, SN, DDA, DIREN, Préfecture, ... ;
- ↪ Organismes tels que : Météo-France, EDF, Service d'Etude des débits des DIREN, pour les données pluviométriques et hydrométriques ;
- ↪ L'IGN pour les cartes (en particulier les cartes au 1/25 000ème) et le Référentiel à Grande Echelle (RGE), orthophotoplans, photographies aériennes, profils en long de cours d'eau (nivellement d'une ligne d'eau de basses eaux généralement datant souvent de l'entre deux guerres) ;
- ↪ Les sociétés gérant des infrastructures linéaires : RFF, VNF, Sociétés d'autoroutes, ... ;
- ↪ Les diverses collectivités territoriales : communes, groupement de communes, Département, Région ;
- ↪ Les différents Syndicats intervenant sur les cours d'eau ;
- ↪ Certains Maîtres d'ouvrages privés : grandes industries ayant des implantations en zone inondable, extracteurs de matériaux, ... ;
- ↪ Les archives, municipales et surtout départementales qui recèlent une foule d'informations datant notamment du 19è siècle (demander les fiches de la « Série S » : fonds des Ponts et Chaussées, de la Préfecture, ...) et éclairent sur l'origine et la conception d'aménagements anciens, des ponts, ... ;
- ↪ Les articles de journaux (aux dates des crues historiques), cartes postales, ...

Il est conseillé d'analyser et de résumer chaque étude, chaque document par une fiche citant le Maître d'Ouvrage, l'objet de l'étude, sa date de réalisation et regroupant l'essentiel des données ou résultats par thème : hydrologie, topographie et hydraulique (d'autres thèmes peuvent apparaître au cas par cas).

1.2.2. Évaluation des données hydrologiques et hydrauliques

Cette évaluation est basée sur l'analyse des données collectées et résumées par les fiches.

1.2.2.1. Données hydrologiques

Les données collectées peuvent être regroupées selon trois thèmes :

- ↪ Les données relatives aux caractéristiques du ou des bassins versants : morphométrie, géologie, occupation du sol, ...
 - Une ou plusieurs cartes de synthèse peuvent être nécessaires pour caractériser le bassin versant et/ou son évolution.
- ↪ Les résultats fournis par les études antérieures :
 - L'évaluation des débits (crues, étiages, ...) fournis par des études antérieures est généralement instructive de la dispersion des résultats selon les données et les méthodes utilisées. Une critique des résultats fournis par ces études est à réaliser sur ces deux critères.
- ↪ Les données brutes :
 - Celles-ci constituent généralement des séries chronologiques (hauteurs de pluie, hauteurs d'eau en rivières, débits, mesures du transport solide, ...) mais il est utile de se procurer également des données telles que la liste des jaugeages effectués à une station depuis son origine, voire le détail de certains jaugeages (champ des vitesses).
 - Une première analyse de la qualité des séries hydrométriques et pluviométriques doit porter sur leur durée : taille de l'échantillon, manques éventuels. En ce qui concerne spécifiquement les débits, notamment ceux relatifs aux crues, la comparaison du plus fort débit enregistré au jaugeage maximum effectué est un bon indicateur, en première approche, de la confiance qu'il faut avoir dans l'échantillon de débit disponible.

A partir de l'ensemble de ces analyses, il est possible de préciser la zone d'étude hydrologique et la méthodologie à suivre en fonction des objectifs de la maîtrise d'ouvrage.

Pour le détail, le lecteur se reportera au Guide méthodologique pour l'estimation de la crue centennale dans le cadre des plans de prévention des risques d'inondation de la DPPR.

1.2.2.2. Données hydrauliques

On entend par « donnée hydraulique » (voir l'annexe 2 pour plus de détails) toute information telle que : niveau d'eau, hauteur d'eau, vitesse, répartition du débit, ... :

- ↪ Traduisant les conditions d'écoulement d'un événement hydrologique déterminé (crue, étiage, ...) ;
- ↪ Traduisant le fonctionnement d'un ouvrage singulier (seuil, vanne, pont, siphon, ...) et permettant de construire tout ou partie de sa loi de fonctionnement ;
- ↪ Relative à la loi hauteur-débit d'une section spécifique :
 - condition limite aval en régime fluvial, ou cas de marée, de confluence,
 - condition limite amont en régime torrentiel.

Pour analyser les données hydrauliques fournies par la bibliographie et les archives il convient de distinguer nettement les données observées des valeurs calculées. Celles-ci, intrinsèquement, ne constituent pas véritablement une donnée mais, dans certains cas où les observations font cruellement défaut, il peut être intéressant d'utiliser ces informations avec précaution.

Dans ces conditions les seules informations mesurées concernant les débits et les vitesses sont généralement celles fournies par les stations de jaugeage et les courbes de tarage afférentes.

En pratique l'information recherchée, et fournie, par les études antérieures, et/ou archives, concerne essentiellement les **niveaux atteints par les crues historiques** : repère d'une crue en un point donné, ligne d'eau, zone inondable. Il faut avoir à l'esprit qu'une marque matérielle de laisse de crue historique peut avoir été déplacée.

Le niveau d'information, et la précision du repère, varie notablement avec sa nature, son repérage, son nivellement éventuel.

Il convient d'établir un répertoire de tous les repères et informations de niveaux disponibles en :

- ↪ les numérotant et les positionnant, si possible, sur un plan :
- ↪ indiquant : l'origine de la source (étude en date du ..., enquête de terrain, témoignage, photo, ...), la date de la crue (voire l'heure), et en analysant une première fois sa fiabilité.

Une première analyse de cohérence consiste à reporter les repères sur un profil en long et à indiquer comme « douteux » ceux qui s'écartent notablement de la ligne d'eau probable pour une crue donnée.

N.B. : A ce stade de l'étude il ne faut écarter aucun repère. Les phases ultérieures permettront de se prononcer sur la pertinence de leur prise en considération.

Outre le répertoire des repères on établira celui des ouvrages singuliers et des données (y compris topographiques) s'y rapportant en vue d'établir leur loi de fonctionnement hydraulique.

Un diagnostic sur les données hydrauliques disponibles, et des manquements à combler si possible, constitue la conclusion de cet inventaire critique.

1.2.3. Évaluation des données topographiques

Parmi les besoins d'une étude hydraulique en données topographiques, il faut distinguer **ceux portant sur les données utiles aux calculs hydrauliques et ceux portant sur la cartographie des résultats de l'étude hydraulique.**

1.2.3.1. Données utiles aux calculs hydrauliques

Les données topographiques nécessaires pour les calculs hydrauliques sont avant tout des données altimétriques. La précision des résultats de calculs hydrauliques en termes de niveaux d'eau ne pourra jamais être meilleure que la précision des altitudes fournies par les données topographiques. De même, -il faut savoir critiquer la validité des données dans le contexte topographique actuel. La densité des données altimétriques est également un critère à prendre en compte.

Lors de l'inventaire des études antérieures, le maître d'ouvrage a pu identifier des gisements de données topographiques existantes. Il peut naturellement imaginer réemployer ces données pour son étude, et en contacter le propriétaire dans ce sens. En aucun cas il ne doit compter sur des données dont il ne connaît pas la teneur exacte, sur la base d'informations descriptives sommaires, par exemple. Il doit ainsi se faire préciser :

- ↪ s'il s'agit de données altimétriques levées dans le système de nivellement général de la France (utilisable dans une étude hydraulique) ou de données relatives en hauteurs par rapport à un point de référence non-nivelé (auquel cas il faudra rattacher les données à un repère du nivellement général de la France) ;
- ↪ s'il s'agit de données géoréférencées (tous les points ayant une position (X,Y) dans un système Lambert donné) ou non (profils en travers dont la trace n'est pas géoréférencée, points positionnés littéralement uniquement, tels que « lieu-dit le Pète-à-l'âne », « rue des Iles » ou « pont de l'ancien bac », auxquels cas il faudra vérifier que toute la description nécessaire de la position des informations est effectivement disponible) ;
- ↪ d'une manière générale, la date des levés, les systèmes altimétriques et planimétriques de référence, la méthode de nivellement (terrestre optique, terrestre dGPS, photogrammétrique, laser aéroporté, etc), et la précision et la densité de points, la forme sous laquelle les données sont disponibles (plans Noir & Blanc ou Couleurs, données informatiques au format de logiciel à préciser, etc).

Les données topographiques (terres exondées) et surtout les données bathymétriques (levés subaquatiques) peuvent subir des évolutions significatives qui les rendent inutilisables quelques années après leur nivellement. C'est le cas notamment lorsque :

- ↪ le lit mineur du cours d'eau subit d'importantes fluctuations morphodynamiques (incision du fond de lit, comme la Loire et le Cher, divagation de méandres, atterrissements fixés, pérennisés et engraisés par la végétalisation piégeant les sédiments, comblement d'un bras secondaire ou envasement généralisé du chenal, etc) ;
- ↪ un ouvrage de fixation du lit mineur ou de régulation des niveaux d'eau est mis en place ou supprimé entre le moment des levés topographiques et le lancement de l'étude
- ↪ des terrassements bouleversent le lit majeur (remblaiement de zones inondables, creusement de darses, etc) ou son inondabilité (érection de digues fermant une partie du champ d'expansion des crues, remblais d'infrastructures de transport croisant la vallée inondable, etc).

Dès que des informations (affouillement inhabituel d'ouvrages en rivière, déchaussement, effondrement de berges, nouveaux envasements nuisibles affleurant à l'étiage, nouvelles infrastructures ou zones d'activités remblayées, etc) laissent penser que l'une de ces évolutions a pu affecter la vallée depuis la date de réalisation des levés disponibles, il faut prévoir la mise à jour de ces données, en procédant par exemple à des levés de vérification d'une donnée sur trois ou quatre, qui, s'ils mettent en évidence une évolution effective (plus de 20 à 30 centimètres d'évolution), conduiront le maître d'ouvrage à procéder à un nivellement complet de toutes les données nécessaires. La problématique des fonds mobiles de rivières est à prendre en compte car il faut prévoir une vérification de la bathymétrie après chaque crue.

Enfin, il faut prendre garde à bien disposer, pour un ouvrage ou une infrastructure, des données de récolement ou au moins le plan de l'ouvrage fini, et non des données de projet qui ont pu évoluer sensiblement lors de la réalisation.

1.2.3.2. Données cartographiques

Concernant les données cartographiques, les supports graphiques de restitution peuvent être variés : bases de données de l'IGN (TOPO, ORTHO ou CARTO), carte IGN au 1/25000^{ème}, plans photogrammétriques, orthophotoplans, cadastre numérisé, etc.

Si le maître d'ouvrage désire rendre public un document utilisant un support cartographique, il devra s'assurer, auprès du propriétaire du support, qu'il possède bien un « copy right ».

De plus, il faut prendre quelques précautions élémentaires quant à la lisibilité des documents à produire au cours et au terme de l'étude, en choisissant des supports de restitution cartographiques adaptés (prévoir une restitution utilisable en noir et blanc).

Enfin, il importe naturellement que le maître d'ouvrage s'assure du format de la consultation de ces données cartographiques : papier ou informatique, avec ou sans géoréférencement.

1.3. Expertise préalable à la rédaction du cahier des charges

Muni de ses objectifs et de l'inventaire critique des données disponibles, le Maître d'Ouvrage doit se livrer à une expertise préalable de son problème en vue de rédiger le cahier des charges.

N.B. : Cette expertise ne concerne ici que la seule étude hydraulique. Pour l'hydrologie le lecteur se reportera au Guide méthodologique pour l'estimation de la crue centennale dans le cadre des plans de prévention des risques d'inondation de la DPPP.

Selon la complexité prévisible de l'étude et selon la compétence du Maître d'Ouvrage en matière d'hydraulique, il réalisera lui-même cette expertise préalable ou il la confiera à un prestataire extérieur. Par expertise on entend une analyse pertinente du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude (chapitre : analyse qualitative) et, en fonction des objectifs, des enjeux et des données disponibles et/ou à acquérir, une définition des moyens d'étude à mettre en œuvre (adéquation données/outils/complexité).

En conséquence une telle expertise préalable, qui ne recourt à aucun calcul significatif et encore moins à une quelconque modélisation, doit être réalisée par un ingénieur confirmé.

Enfin cette expertise préalable ne dispense pas le prestataire extérieur retenu ultérieurement pour la réalisation de l'étude de réaliser sa propre expertise.

1.3.1. Analyse qualitative

Le degré de complexité d'une étude hydraulique peut être apprécié en grande partie à travers l'analyse de l'hydrographie de la zone d'étude et des caractéristiques générales des vallées et talwegs structurant son relief.

1.3.1.1. Topologie hydraulique : hydrographie, orographie et géomorphologie

Au stade de cette analyse, l'identification

- ↪ des cours principaux et secondaires du cours d'eau étudié,
- ↪ des affluents, confluent et défluent, en appréciant leur importance relative,
- ↪ des anciens bras fossiles et autres noues drainant le lit majeur, des cheminements d'ensemble dans les vallées induits par les formes globales du terrain,
- ↪ des principales structurations apparentes du lit apparaissant sur carte IGN (routes, remblais linéaires ou zonaux, etc)

ne peut être exhaustive.

Mais, le recours à :

- ↪ l'inventaire critique des données disponibles,
- ↪ l'analyse des **bases de données** (Carthage® ou BD Alti®, d'IGN), des **cartes** 1/25000^{ème}, des cartes géologiques, des cartes anciennes, des **photographies** aériennes, des orthophotoplans
- ↪ et à une **visite sur site(s)** pour reconnaître les indices des fonctionnements devinés à travers cette analyse (érosions ou dépôts localisés, végétalisation de formes pérennisées, accélération ou ralentissement du courant, élargissement ou rétrécissement, verrous hydrauliques et cheminements fréquents, lit perché, etc)

permet de décrire complètement la topologie hydraulique du secteur d'étude.

Le support de cette description est une carte schématique présentant les axes principaux et secondaires d'écoulements (à distinguer s'ils ne sont ni parallèles, ni connectés longitudinalement), les nœuds de confluence et de diffluence, les embranchements latéraux venant nourrir le cours d'eau, les lignes de contraintes structurant les débits, les points de concentration des débits en lit majeur (ouvrages de décharge, etc) les éventuelles connexions conditionnelles (déversoirs, digue submersible en crue de projet, etc). Cette carte n'en est toutefois à ce stade qu'à l'état d'ébauche et sera appelée à évoluer au cours de l'étude en fonction des calculs effectués par le prestataire.

1.3.1.2. Analyse quantitative des paramètres hydrauliques

Dans la zone d'étude hydraulique, on peut apprécier quantitativement les caractéristiques hydrauliques des sous-secteurs identifiés dans l'analyse topologique qualitative précédente .

Ces potentialités s'apprécient à partir de

- ↪ la pente hydraulique du profil en long de la vallée et/ou des laisses de crues disponibles (voir études historiques) : elle détermine presque à elle seule le régime hydraulique prévisible des écoulements (fluvial ou torrentiel) et donc, les déconnexions hydrauliques par régime critique (cf. annexe 2 et éléments théoriques et pratiques d'hydraulique fluviale) ;
- ↪ les sections de contrôle ou de contraction des écoulements qui vont imposer leurs conditions restreintes d'écoulement à toute la fraction de vallée dans le remous en amont : « verrous hydrauliques » géologiques ou liés à des infrastructures (pont dont le remblai d'accès ne comporte aucun ouvrage de décharge, passage en siphon sous un obstacle insubmersible ou si peu que la très grande majorité du débit doit passer par le siphon, etc) ; il est important de noter que, pour les écoulements de grandes crues, les ouvrages ne barrant que le lit mineur n'ont qu'une incidence limitée, car ils sont largement contournés, tandis que pour les crues faibles, ils imposent une perte de charge importante et deviennent des sections de contrôle.

Ces deux éléments permettent d'estimer quelques quantités intéressantes pour apprécier le rôle respectif de divers éléments topologiques. La pente motrice fournit l'impulsion hydraulique, tandis que les sections d'écoulements permettent de comparer, à pente hydraulique équivalente, la fraction du débit qui transiterait vraisemblablement par l'une ou l'autre branche de la topologie hydraulique.

Quand bien même l'absence d'axes bien identifiables d'écoulements contrarierait cette quantification, ces éléments permettent d'estimer les zones d'influence (remous d'exhaussement notamment) des singularités identifiées (confluences, ouvrages ponctuels, etc) sur la zone d'étude, ainsi que la délimitation en plan de la zone concernée par les écoulements (et donc, l'extension – notamment latérale – de la zone « mouillée »).

A l'issue de cette dernière phase d'analyse, on peut décrire, sous-secteur par sous-secteur, hydrologique et hydraulique, le type d'écoulement auquel on a affaire et par conséquent indiquer :

- ↗ si une modélisation est nécessaire et, si oui, de quel type ;
- ↗ les données hydrologiques et hydrauliques à acquérir ;
- ↗ les données topographiques à acquérir.

1.3.1.3. Complexité de l'étude

Cette analyse permet d'évaluer le degré de complexité du fonctionnement hydraulique. Cette complexité se décline en fonction des éléments suivants :

- ↗ étude **simple** : lit simple et régulier, cours quasiment canalisé, homogène, de faible pente, avec débordements réguliers le long des berges et axe principal clairement identifiable autour duquel s'organisent les écoulements de crues ;
- ↗ étude **classique** : complexité « simple » assortie d'un aménagement usuel dont le fonctionnement est décrit dans la littérature technique (infrastructure orthogonale à l'axe d'écoulement ou presque, seuil ou barrage de forme simple) ;
- ↗ étude **ramifiée** : emboîtement de situations « simples ou classiques par parties », autrement dit, le secteur d'étude peut être considéré comme simple ou classique à l'échelle de chacune de ses composantes hydrauliques, mais le secteur d'étude hydraulique couvre une juxtaposition de ces composantes qui en complique l'étude d'ensemble : confluents, défluents, lit mineur perché, îles, etc ;
- ↗ étude **délicate** : nécessité de simuler des crues en régime transitoire dans un contexte d'étude « simple, classique ou ramifiée », soit qu'un objectif soit précisément d'étudier les caractéristiques temporelles de la propagation des crues ou leurs perturbations dans le secteur d'étude, soit que le secteur d'étude se décompose en sous-secteurs séparés par des lignes structurantes agissant directement sur la direction des écoulements en lit majeur en fonction du niveau de submersion : casiers topographiques, etc ;
- ↗ étude **spécialisée** : présence d'une difficulté très particulière telle que ressaut hydraulique à simuler, vecteur(s) vitesse d'écoulement à déterminer en certains points du lit majeur, écoulement dans un ouvrage complexe sortant complètement du cadre classique des lois académiques, écoulements en lit majeur pouvant s'écarter significativement d'un axe supposé principal d'écoulement en lit mineur, etc.

1.3.2. Adéquation données / outils / complexité

A cette complexité doivent répondre d'une part la qualité des données disponibles ou à recueillir, d'autre part la complexité de l'outil d'analyse.

Il est difficile d'établir une table de correspondance générique entre tous ces éléments. Nous proposons les éléments ci-après.

1.3.2.1. Variables à étudier

Les possibilités sont nombreuses :

- ↪ Débit seulement : modèle simplifié de type onde diffusante ; par exemple pour un outil de prévision de crue.
- ↪ Débit et niveau : Saint-Venant 1D (avec casiers au besoin) ; par exemple pour délimiter une zone inondable.
- ↪ Vitesse moyenne et niveau, par exemple pour simuler la dispersion d'un polluant au-delà de la distance de bon mélange : un modèle Saint-Venant 1D est suffisant (voir aussi le critère de couverture des phénomènes)
- ↪ Vitesse moyenne en lit mineur mais vitesse ponctuelle dans les zones de débordement car on a besoin d'évaluer la dangerosité du flot : un modèle Saint-Venant 2D est nécessaire.
- ↪ Niveaux et direction d'écoulement dans une plaine d'inondation : l'écoulement n'ayant pas de direction privilégiée identifiée, il faut recourir à une modélisation 2D.

Il faut également être vigilant par rapport à un certain nombre de variables « masquées » qui peuvent être nécessaires pour déterminer les lois de fonctionnement hydraulique de certains ouvrages (niveau Z imposé à un endroit donné, etc).

1.3.2.2. Phénomènes à représenter

Ce critère fonctionne en sens inverse du précédent : identifier les phénomènes dont la reproduction doit être correcte pour en déduire les variables à prendre en compte et, par là, le type de modèle à utiliser.

Ainsi l'identification des directions d'écoulement locales dans une plaine d'inondation, sans ligne structurante qui pourrait donner cette information, requiert une modélisation 2D. Inversement, il est inutile d'exiger une modélisation 2D pour un écoulement ayant une direction privilégiée manifeste.

On ne peut faire ici un catalogue exhaustif des situations dans lesquelles un modèle 2D est requis ou préférable, on peut seulement donner quelques pistes pour inciter le lecteur à poser les bonnes questions. On peut quand même citer :

- ↪ lit en tresse quand la submersion est plutôt faible ; les directions d'écoulements sont alors variables avec le niveau jusqu'à ce que celui-ci noie complètement la structure tressée du lit mineur ;
- ↪ confluent de deux rivières ayant des débits voisins, sans ligne structurante et/ou avec des directions d'écoulement variables ;
- ↪ lit à méandres non-encaissés : la structure transversale de l'écoulement n'est pas négligeable ;
- ↪ propagation, dispersion ou capture de polluants.

Dans le même ordre d'idée que précédemment, si la modélisation de l'écoulement doit servir à des études de transport solide ou de sédimentologie, une connaissance détaillée du champ de vitesse peut être nécessaire, ce qui impose un modèle 2D.

Voici quelques questions qu'il est indispensable de se poser pour choisir un modèle adapté aux données disponibles et à la question posée.

0. Faut-il une modélisation ?

a) non

b) oui, continuer

1. La zone d'étude est-elle constituée d'un réseau avec confluent et, éventuellement, des défluent nombreux ?
 - a) Oui : il faudra utiliser une modélisation 1D, éventuellement avec casiers ; si les confluent/défluent sont peu nombreux, une modélisation 2D est possible.
 - b) Non : continuer (pas de choix déterminé à ce niveau).
2. La zone d'étude est-elle de grande longueur ?
 - a) Oui : il existe donc sans doute une direction privilégiée, on pourra donc utiliser une modélisation 1D.
 - b) Non : continuer.
3. Existe-t-il une direction privilégiée ?
 - a) Oui : une modélisation 1D est possible.
 - b) Non : une modélisation 2D est nécessaire ; selon le type de problème à résoudre, une modélisation à casiers peut faire l'affaire.
4. La pente de la zone d'étude est-elle souvent supérieure à quelques % ?
 - a) Oui : vérifier les conditions d'application du modèle de Saint-Venant ; un modèle simplifié est sans doute préférable.
 - b) Non : le modèle de Saint-Venant est sans doute applicable (vérifier) ;
5. La zone d'étude est grande et le temps de calcul doit être très court :
 - a) Oui : envisager un modèle simplifié ; vérifier cependant la compatibilité de ses limitations avec le problème posé (comment simuler des niveaux avec un modèle simplifié ? Quelle est la précision nécessaire sur les niveaux ?).
 - b) Non : continuer.
6. A-t-on besoin de délimiter une zone inondée ?
 - a) Oui : le modèle doit offrir une bonne estimation des niveaux ; donc plutôt du Saint-Venant qu'un modèle simplifié.
 - b) Non : vérifier si on ne peut pas se contenter d'un modèle simplifié.
7. A-t-on besoin d'estimer correctement des vitesses en direction et module ?
 - a) Oui : il faut un modèle Saint-Venant 2D.
 - b) Non : continuer.
8. A-t-on une direction privilégiée et une structuration du lit majeur par des ouvrages tels que remblais, digues, ... ?
 - a) Oui : utiliser un modèle 1D à casiers et/ou échange latéraux.
 - b) Non : utiliser un modèle 1D standard (lit majeur actif + lit majeur de stockage).
9. Trouve-t-on sur la zone d'étude des pentes locales assez fortes (> 1%) ?
 - a) Oui : il est probable qu'on trouvera des passages localisés en torrentiel ; si le choix du modèle se porte sur Saint-Venant (1D ou 2D), il faudra que le code de calcul soit capable de prendre en compte ces passages en torrentiel. A défaut, un modèle simplifié peut être suffisant.
 - b) Non : continuer.
10. Est-ce que la dynamique de l'écoulement est incontournable ?
 - a) Oui : le modèle choisi doit être instationnaire (non-permanent, transitoire).
 - b) Non : le modèle choisi peut être stationnaire (permanent).

2. Rédaction du cahier des charges et jugement des offres

La rédaction d'un cahier des charges pour la réalisation de prestations intellectuelles, et en particulier pour la réalisation d'études hydrauliques, est un exercice difficile. Il n'est pas envisageable de se baser sur un cahier des charges « type » pour ce genre de prestation. Une telle démarche pourrait s'avérer préjudiciable tant l'approche doit être adaptée au cas par cas, en fonction des objectifs de l'étude, des moyens que le maître d'ouvrage peut y consacrer mais aussi et surtout de son contexte (localisation géographique, fonctionnement hydraulique du système, enjeux en présence, contexte économique et social etc.)

En préambule, les éléments suivants doivent donc être indiqués :

- Le Maître d'ouvrage doit avoir les compétences nécessaires pour assurer la rédaction du cahier des charges. On entend ici par « compétences nécessaires » avant tout de bonnes compétences techniques en hydrologie et hydraulique. Il est également nécessaire que le maître d'ouvrage ait une bonne connaissance de la législation, des procédures à suivre et du contexte local. Si ces conditions ne sont pas remplies, le maître d'ouvrage devra impérativement faire appel à un Assistant à la Maîtrise d'Ouvrage (AMO) afin de s'assurer du bon pilotage de l'étude.

- Dans la mesure du possible, le personnel ayant rédigé le cahier des charges doit aussi être celui qui évalue les offres et qui suit l'étude. Cette condition permet d'assurer une bonne cohérence du suivi de l'étude.

- L'objectif de l'étude et sa démarche doivent être bien cernés dans le cahier des charges. Comme pour toute prestation intellectuelle, le cahier des charges doit donc être précis. Sans cela, l'éventail des prix sera très étendu et les réponses ne seront pas comparables.

- La démarche proposée par le cahier des charges doit être robuste, adaptée aux enjeux. En cas de recours devant la justice suite à un problème grave, les juges sont fondés à rechercher la responsabilité du maître d'ouvrage s'il n'a pas mis en œuvre une démarche d'étude à la hauteur des enjeux.

2.1 Rédaction du cahier des charges

Même si les études hydrauliques peuvent être menées de manières très différentes, la structuration du CCTP s'articule autour des points suivants :

1. un préambule
2. la définition du contexte de l'étude,
3. la déclinaison des objectifs
4. la démarche à suivre pour atteindre ces objectifs
5. Le rendu

L'attention du maître d'ouvrage est attirée sur le fait que la démarche (moyens à mettre en œuvre) doit être parfaitement adaptée aux objectifs.

2.1.1 Le préambule

En quelques mots, il donne l'identité des différents acteurs (maître d'ouvrage, maître d'œuvre, chef de projet) et décrit le type d'étude à entreprendre :

- Étude de risque (inondation, érosion)
- Étude d'aménagement (infrastructure, protection, équipement ou aménagement de berge...)

2.1.2 Contexte et hypothèses de travail

Cette partie fait généralement l'objet de l'introduction du cahier des charges.

La description du contexte dans lequel est lancée l'étude est très souvent absente ou négligée dans les CCTP. Elle a pourtant une grande importance et peut significativement orienter les réponses des bureaux d'études (B.E.) : elle permet aux candidats de s'approprier l'étude et de donner une réponse adaptée, voire de proposer des variantes pertinentes au vu d'un contexte particulier. Ce dernier point peut donc être un bon moyen pour les bureaux d'études de se distinguer en montrant leur capacité d'analyse et leur savoir-faire. Ceci pourra être pris en compte par le maître d'ouvrage lors de l'analyse des offres.

Cinq éléments doivent être abordés dans la définition du contexte :

- Une description de l'état initial. Cette description intègre un bref historique du site et du projet. Ceci comprend également l'état des connaissances au moment du lancement de l'appel à candidature (mention des études déjà réalisées...) ainsi que les éléments disponibles (topographie, documents définissant le projet : les « entrants »).
- Un recensement des contraintes particulières et des enjeux spécifiques (contraintes environnementales, économiques, de délais, projet socialement sensible, etc.).
- Le contexte réglementaire. De ce dernier découleront notamment les objectifs de l'étude d'incidence si cela s'avère nécessaire.
- Le niveau d'étude requis (étude préliminaire, avant-projet sommaire, projet,...), la programmation et le phasage de l'étude.
- Les différents acteurs de l'étude et l'articulation de leurs interventions.

De la définition du contexte découlent en grande partie les objectifs de l'étude.

2.1.3 Objectifs

La définition des objectifs est indispensable. Elle doit faire l'objet d'un paragraphe spécifique du cahier des charges.

Les différents objectifs de l'étude doivent être :

- distinctement déclinés. La présentation sous forme de tirets, par exemple, peut permettre de gagner en clarté.
- précis et quantifiables, dans la mesure du possible. Le maître d'ouvrage devra donc avoir au préalable clairement identifié ses besoins ce qui signifie, s'il n'est pas en mesure de le faire, qu'il fasse appel à un AMO.
- formulés sous forme de verbe d'action si possible, là encore pour gagner en clarté. S'il s'agit d'une étude de risque inondation : l'objectif sera par exemple de « définir la vulnérabilité... » ou « établir la cartographie de l'aléa... ». S'il s'agit d'une étude d'aménagement, il s'agira alors par exemple de « fournir les caractéristiques de

l'aménagement... », « optimiser les caractéristiques de l'ouvrage... », « évaluer son impact... », « définir les modalités de chantier... », etc...

Les objectifs doivent être adaptés au cas par cas et sont spécifiques à chaque étude. Ci-après, suivant le type d'étude, nous avons cependant rappelé les résultats généralement demandés.

2.1.3.1 Cas d'une étude de risque

Les objectifs sont d'établir les cartographies :

- des zones inondées pour les débits de projet à une échelle spécifiée dans le cahier des charges
- des iso-vitesses, des iso-hauteurs, des aléas, des enjeux à une échelle donnée, pour le débit de projet donné.

Dans le cadre d'un PPR Inondation, éventuellement :

- Établir le zonage réglementaire (préciser l'échelle)
- Rédiger la note de présentation

2.1.3.2 Cas d'une étude d'aménagement

1) Cas d'un franchissement

- Optimiser l'ouverture de l'ouvrage principal de franchissement et des éventuels ouvrages de décharge
- Définir la cote d'eau au droit du franchissement (et éventuellement celle de la sous-poutre)
- Définir la cote minimal des remblais d'accès à l'ouvrage,
- Définir et dimensionner la protection des remblais, des berges et des appuis de l'ouvrage
- Caractériser l'incidence globale du projet sur les conditions d'écoulement pour des crues de projet
- Définir et tester d'éventuelles mesures compensatoires ou d'accompagnement
- Donner les modalités de réalisation du chantier de manière à apporter les éléments nécessaires à l'élaboration du dossier « Police de l'eau » (période de réalisation des travaux, batardage, estacade...) et en tester l'impact sur une crue courante (généralement la crue de période de retour 5 ans).

2) Cas de la création d'une plate-forme en lit majeur

- Définir les cotes des parking, des seuils des bâtiments...
- Caractériser l'impact hydraulique du projet pour les crues de projet ainsi que l'impact du déstockage.
- Proposer des mesures compensatoires et en caractériser l'impact

3) Cas d'un aménagement d'un cours d'eau ou de ses berges

- Établir le profil en long des lignes d'eau suite à l'aménagement pour les débits de projet
- Caractériser l'incidence du projet sur les conditions d'écoulement
- Proposer des mesures compensatoires si nécessaire et en caractériser l'impact

2.1.4 Les Moyens, la démarche

Les moyens à mettre en oeuvre varient en fonction de l'étude, de ses objectifs et des moyens financiers dont dispose le maître d'ouvrage. Dans la très grande majorité des cas, on retrouve cependant les postes suivants sous des libellés qui peuvent varier :

1. La collecte de données
2. L'enquête de terrain
3. L'étude hydrologique
4. Les travaux topographiques
5. L'étude hydraulique et géomorphologique

2.1.4.1 La collecte de données

Il s'agit de la première étape de l'étude. Complétée par l'enquête de terrain, cette collecte constituera la base de travail du bureau d'étude. Elle permet notamment d'obtenir des informations précieuses quant aux événements historiques (hydrologie, hydraulique, géomorphologie).

De manière exhaustive, on peut distinguer :

- les études existantes : réalisées dans le secteur d'étude dans le cadre du même projet ou non (en particulier les études PPR Inondation ou AZI quand elles existent). Il peut également s'agir d'études techniques autres qu'hydrauliques liés à des aménagements antérieurs (études géotechniques notamment) et qui peuvent apporter des renseignements précieux quant à la nature des terrains, le fonctionnement du système hydraulique etc...
- les études d'archives : Ce type de documents peut être très varié : il peut s'agir de coupures de journaux, d'extraits de journal télévisé issus des archives de l'INA (disponible sur Internet), mais également d'études et de plans pouvant avoir plusieurs siècles, de livres sur l'histoire régionale du secteur d'étude, de courriers anciens relatant les dégâts engendrés par certaines crues historiques etc. Ces documents peuvent provenir de particuliers, des collectivités locales mais plus généralement des archives départementales. Quand ils sont exploitables, ces documents sont souvent riches d'enseignement. Ils peuvent permettre d'expliquer ou de confirmer certains points qui seront constatés ou démontrés au cours de l'étude.
- Les documents topographiques : réalisés dans le cadre du projet ou de projets antérieurs, un état des lieux complets doit être fait avant de lancer des études

complémentaires. Avant toute réutilisation, le maître d'ouvrage devra s'assurer qu'ils sont encore valides.

- Les données annexes : elles ont souvent un rapport indirect avec l'objet de l'étude mais peuvent cependant apporter des compléments d'information : ZNIEFF, ZICO, Contrat de rivière, étude hydrogéologique...

En annexe au CCTP, le maître d'ouvrage listera l'ensemble des études dont il a connaissance. Cette liste fera apparaître :

- l'intitulé du sujet traité par l'étude
- l'année de réalisation
- l'organisme ayant travaillé
- si le document est consultable durant la consultation et auprès de quel organisme
- éventuellement un commentaire sur le contenu de l'étude.

Par ailleurs, il est important de préciser dans le CCTP si le maître d'ouvrage souhaite que le bureau d'étude entreprenne des recherches des documents d'archives au sein des différentes administrations (CSP, DDAF, DDASS, DDE, SPC, DIREN, pompier, mairies, archives départementales...) afin que ce travail soit inclus et chiffré dans l'offre. Ceci est vivement conseillé dans le cadre d'études techniquement complexes ou sensibles.

2.1.4.2 Enquête de terrain

L'enquête de terrain a pour objet de visualiser la topographie du site, la géomorphologie, les contraintes, les conditions d'écoulement, les obstacles présents mais aussi de collecter des informations sur les crues passées. C'est également pendant cette phase que sont définis les besoins topographiques à entreprendre en fonction des données déjà en possession du maître d'ouvrage.

Avec la synthèse bibliographique, ce travail minutieux de terrain, qui doit se faire généralement à pied, est le fondement même de l'étude hydraulique. Un bon pilotage de ce volet peut donc significativement améliorer la qualité finale de l'étude ou du moins, elle permet d'éviter des incohérences grossières.

En préalable à ce volet dans le CCTP, le maître d'ouvrage doit préciser les données dont il dispose (notamment s'il a connaissance de marques de crues historiques...).

Il peut ensuite décliner les différents objectifs du travail de terrain comme ci-après. Le CCTP développera plus ou moins les différents thèmes ci-dessous en fonction de leur importance vis à vis des objectifs de l'étude.

1) Recueil de données

Il s'agit de recueillir un maximum d'informations sur le comportement du cours d'eau et notamment les niveaux d'eau atteint par le passé, point clef de l'étude de terrain.

Ces données sont fournies au travers de :

- L'observation des lits mineur et majeur. En plus de la mise en évidence des laisses de crues, cette analyse de terrain permet de caractériser la dynamique du cours d'eau en prenant en compte les ouvrages ponctuels engendrant des perturbations (seuils, ponts, remblais), les zones de stockage etc. Ces données devront être caractérisées avec soin pour être prises en compte correctement dans la modélisation.

- Témoignages (écrits, oraux, photographiques, sous forme de films) : ils peuvent notamment apporter des éléments sur les niveaux d'eau atteints, la genèse des crues historiques (permettant de se faire une idée sur le temps de concentration du bassin versant), l'évolution de l'occupation du sol et du lit mineur et les niveaux d'eau atteints par le passé.
- Visualisation de marques et gravures de niveaux d'eau atteints par les crues historiques (notamment sur les murs et dans les caves)

Le C.C.T.P. précisera que chaque marque ou laisse de crue historique devra faire l'objet d'une fiche signalétique qui sera jointe en annexe au rapport final. Cette fiche précisera notamment :

- Le nom de la commune et du lieu – dit accompagné d'un plan de situation extrait de la carte au 1/25 000ème.
- La date de relevé de la marque
- Le nom de la personne ayant relevé la marque
- Le nom du témoin ayant indiqué la marque (quand c'est le cas)
- La date de la crue à laquelle elle correspond (quand cela est connu)
- Une description de la localisation de la marque (exemple : grillage de la station d'épuration)
- La nature du repère pouvant permettre un nivellement de la marque (exemple : base du mur, marche d'escalier...)
- Les coordonnées Lambert X et Y de la marque, même imprécises : cela peut se faire soit par l'intermédiaire d'un GPS de poche ou par positionnement de la marque sur SIG.
- Un schéma de localisation et une photographie de la marque
- Un commentaire qui doit notamment permettre une appréciation de la précision de la marque

Ces fiches pourront être fournies au géomètre pour qu'il procède à un relevé précis des cotes atteintes par l'eau. Ce travail est particulièrement important pour le calage du modèle numérique et donc la validation de ses résultats.

Tout comme pour les données bibliographiques, le CCTP devra préciser que le B.E. a en charge l'analyse, la confrontation et la critique des données acquises sur le terrain afin d'en faire une synthèse et de mettre en évidence les éléments exploitables.

2) Recensement des enjeux et des contraintes

L'identification des enjeux dépend de la nature de l'étude et de ses objectifs. Il s'agit généralement d'habitats, de bâtiments et d'équipements vulnérables. Dans certains cas, on prendra également en compte les enjeux touristiques, patrimoniaux...

3) Option

Par ailleurs, suivant le type d'étude à réaliser, il peut être utile d'inclure dans le cahier des charges un lot conditionnel en cas de crue « significative » (ceci reste à définir) survenant après que le bureau d'études ait réalisé le travail de terrain.

Dans ce cas, pour un montant forfaitaire, le bureau d'études devra parcourir à nouveau le terrain sur un secteur donné afin de confronter les nouveaux éléments avec ceux qu'il a déjà collectés, identifier de nouvelles laisses de crues, cartographier la zone inondée etc..

2.1.4.3 L'étude hydrologique

L'étude hydrologique a pour objectif de déterminer les débits de projet, les hydrogrammes de projet ou la période de retour de crues observée. Ces débits ou hydrogrammes à définir devront donc clairement apparaître dans le CCTP en préalable à cette partie.

Le volet hydrologie est particulièrement sensible : il est en effet celui qui ouvre le plus souvent la porte aux contestations de tiers. La démarche proposée par le bureau d'étude doit donc être robuste et dans la mesure du possible inattaquable.

Il existe généralement trois approches pour définir les débits de projets :

- Se fonder sur des valeurs obtenues dans la bibliographie. Si ces dernières sont fiables et admises de manière unanime (ce qui est rare), on pourra alors préciser dans le CCTP que cette approche est suffisante, ce qui réduira notablement, voire complètement, le coût de ce poste. Les débits de projet seront alors directement précisés dans le CCTP.

- Utiliser les lois classiques de l'hydrologie (statistiques et empiriques). On pourra se reporter à l'annexe 3 du présent guide pour avoir un bon aperçu des méthodes existantes pour estimer des débits caractéristiques ainsi qu'au Guide méthodologique pour l'estimation de la crue centennale dans le cadre des plans de prévention des risques d'inondation de la DPPER.

Dans le CCTP, le maître d'ouvrage pourra faire la distinction entre cours d'eau jaugés et cours d'eau non jaugés.

Dans le cas des cours d'eau jaugés, le maître d'ouvrage précisera dans le cahier des charges les stations débitmétriques présentes dans la zone d'étude ou à proximité immédiate ainsi que le nombre d'années pour lesquelles il existe des données (cette information est gratuitement disponible sur Internet).

Dans le cas de cours d'eau non jaugés et s'il s'agit d'un bassin versant de taille modeste, un inventaire des stations pluviométriques et des séries de données associées pourra être réalisé par le maître d'ouvrage.

Ces éléments seront fournis dans le CCTP, éventuellement en annexe, afin que les B.E. puissent estimer au mieux le temps nécessaire à consacrer à ce volet. Le maître d'ouvrage devra également préciser si l'acquisition des données hydrologiques est à la charge du B.E..

- Le transfert des données, provenant de l'amont ou de l'aval de la zone d'étude voire de bassins versants limitrophes et l'estimation du débit au droit de la zone d'étude par extrapolation (utilisation de la loi de MYER par exemple).

Pour s'assurer que la définition des débits de projets est la plus rigoureuse possible, et donc la moins attaquable, le maître d'ouvrage précisera dans le cahier des charges que :

- le bureau d'étude devra croiser les différentes approches quand les données le permettent et avoir un esprit critique quant à la représentativité des résultats.

- Les débits de projet obtenus devront alors être confrontés aux débits historiques connus, ces derniers étant généralement admis par tous.

S'il existe des hétérogénéités sur les résultats finaux, suivant l'approche retenue et les débits historiques connus, le B.E. doit les expliquer et justifier au final le(s) débit(s) ou l'hydrogramme de projet qu'il retient.

Lorsqu'il s'agit d'une étude complexe ou sensible, le CCTP devra prévoir, à l'issue de cette étape qui conditionne le reste de l'étude, un rapport d'étape soumis à validation ou une réunion de validation avec le Maître d'ouvrage.

2.1.4.4 Données topographiques

Les données topographiques sont de deux ordres :

- Profil en travers ou semis de points pour procéder aux calculs hydrauliques
- Carte(s) topographique(s) pour le report des résultats

Les relevés topographiques sont souvent à l'origine d'erreurs entraînant parfois des incohérences flagrantes à l'origine de questionnements ou de contestations de la part de tiers. Il est donc indispensable que cette mission soit menée par un personnel qualifié (géomètre, topographe) et que le travail à réaliser soit clairement défini au préalable.

Articulation entre étude hydraulique et travaux topographiques

Les travaux topographiques, indépendants de l'étude hydrologique, doivent être à la charge directe du Maître d'Ouvrage et non sous-traité au bureau d'étude. Ils feront l'objet d'un marché indépendant. Ceci doit être clairement explicité dans le CCTP. Deux arguments militent dans ce sens :

- Le travail topographique ne peut pas être défini au préalable mais seulement en cours d'étude. Le bureau d'étude ne peut donc généralement pas définir dans son offre les travaux topographiques à réaliser.
- Il est raisonnable que ce ne soit pas le même B.E. qui définisse le travail topographique à faire et qui réalise ce même travail, ceci afin de se dégager de toute ambiguïté: soit une surestimation du travail topographique à réaliser, soit au contraire une sous-estimation dans le but d'être le moins disant lors de l'appel d'offre.

Le bureau d'étude retenu devra établir le cahier des charges des relevés topographiques à entreprendre, en fonction de ce dont dispose déjà le maître d'ouvrage, de la spécificité du site et de l'objectif de l'étude. Il le proposera à la validation du maître d'ouvrage.

Si ce dernier dispose de moyens limités pour réaliser le volet topographique, il pourra le préciser dans son CCTP (en indiquant par exemple un nombre maximum de profils en travers ou une surface maximum à cartographier par photogrammétrie).

Ce cahier des charges devra notamment comporter les éléments suivants :

- Une cartographie à l'échelle adaptée (généralement avec le fond de plan au 1/25 000ème) faisant apparaître l'ensemble des points nécessaires de manière tout à fait lisible : profils en travers à relever, les points singuliers à niveler (qu'il s'agisse de marques de crues ou d'ouvrages hydrauliques), les zones où une photogrammétrie est nécessaire.
- Si elles existent et si cela s'avère pertinent, les fiches de marques de crues réalisées suite au travail de terrain (1.4.2.1).
- Une note précisant les besoins : échelle de restitution des plans photogrammétriques, nombre et longueur des profils en travers, nombre de points pris dans le lit mineur par profils, format de restitution des résultats etc.

Les données topographiques

On se reportera à l'annexe 5 « Bathymétrie et Topographie » pour avoir des précisions sur les méthodes et outils utilisés ainsi que leurs coûts. Certains éléments méritent cependant d'être précisés ici :

Dans le cas de la photogrammétrie, le bureau d'étude doit préciser l'échelle de restitution (on prendra généralement du 1/2000ème) et éventuellement de prise de vue, la densité du semi de points (on pourra prendre par défaut 1 point tous les 30 m), l'espacement des courbes de niveaux, la mise en évidence de singularités (les talus doivent être représentés et la cote amont et la cote aval doivent figurer).

Dans le cas de cours d'eau de largeur importante, une bathymétrie est nécessaire pour relever la cote du fond du lit mineur. Ce relevé doit être fait finement (la différence de cote entre deux points ne doit pas dépasser 0,5 m) et le raccordement avec les points exondés doit être précis.

Dans le cas de levés terrestres, les points suivants doivent généralement être nivelés :

- Les repères de crues (marques, gravures, laisses, témoignages...)
- Certains enjeux clefs (pour les habitations, on pourra relever la cote plancher du rez-de-chaussée par exemple),
- Les profils en travers représentatifs de l'écoulement dans le cas d'une modélisation filaire. Il est alors nécessaire de prévoir un profil en travers toutes les 5 à 10 largeurs de rivière. La densité des points par profil devra alors être spécifiée en fonction de la topographie locale et sur chaque profil, la ligne d'eau devra être cotée et datée.
- les lignes structurantes permettant de réaliser un modèle à casier (cas du modèle 1D à casier)
- Ouvrages hydrauliques spécifiques (ponts, seuils...)

2.1.4.5 Modélisation numérique

On entend ici par « modélisation », uniquement :

- la modélisation hydraulique, et non les modèles hydrologiques de type « pluie/débit » par exemple.
- la modélisation numérique : l'utilisation des modèles physiques n'est pas abordée.

La modélisation est maintenant un outil utilisé quasi-systématiquement dans le cadre des études hydrauliques. C'est l'aboutissement de la démarche. Pour certains problèmes cependant, elle n'apporte rien en plus par rapport aux formules empiriques ou aux abaques qui sont d'ailleurs souvent directement intégrés au code de calcul sous forme de « modules » (formule de seuil par exemple).

Préalablement à la rédaction du CCTP, il est donc nécessaire que le maître d'ouvrage puisse juger de l'opportunité de mettre en œuvre une modélisation numérique et surtout quel type de modélisation est le plus pertinent au vu du problème posé.

Le CCTP doit donc aborder les 5 points suivants :

- le choix du modèle
- sa construction,
- son calage,
- son exploitation.

- son rendu

On pourra se reporter à l'annexe 4 du présent guide « Choix de la modélisation » pour approfondir ces différents points.

1) Le choix du modèle

De manière synthétique, on distingue les modèles hydrauliques suivants, du plus simple au plus compliqué, chaque « complexification » nécessitant des données d'entrées supplémentaires :

- Modèle filaire en régime permanent : c'est le plus couramment utilisé. Il est bien suffisant dans la plupart des cas.
- Modèles ramifiés (ou maillés) avec confluences, défluences,...
- Modèle filaire en régime non permanent : il permet notamment de tester l'impact d'un stockage/déstockage lié à un ouvrage type barrage ou remblai par exemple. L'utilisation de ces modèles nécessite de connaître l'hydrogramme complet de la crue de référence.
- Modèle filaire à casiers : il est utilisé dans le cas d'un lit majeur comportant des zones de stockage clairement mises en évidence et compartimentées (souvent par des infrastructures ou des digues) Les calculs sont alors menés en régime transitoire.
- Modèles 2D : utilisés au droit de secteurs complexes où l'hypothèse d'un écoulement principal mono directionnel n'est plus valide (présence d'obstacles type gravières, lit majeur très large avec écoulements secondaires...).
- Modèles prenant en compte le transport solide voire la mobilité du fond : ces modèles sont utilisés dans des problématiques de dynamique fluviale (transport solide, dynamique de méandrement, enfoncement du lit mineur). L'utilisation de tels modèles est très délicate, demandant énormément de données d'entrée. Elle peut rapidement s'avérer inadaptée car souvent, elle nécessite des hypothèses discutables et utilise des formulations mathématiques insuffisantes pour prendre en compte la complexité des différents phénomènes de transport. Dans de tels cas, une étude historique et de terrain éventuellement complétée par l'analyse de différentes campagnes de photographies aériennes est probablement mieux adaptée.

Tout en restant ouvert sur l'outil à utiliser, le CCTP doit préciser le type de modèle demandé à priori. Cette indication permettra notamment d'obtenir des réponses comparables.

2) La construction du modèle

Lorsque cela est connu lors de la rédaction du cahier des charge, le maître d'ouvrage précisera l'étendue du modèle, ses limites amont et aval.

Dans certains cas, la zone à modéliser n'est pas connue précisément a priori. C'est le cas par exemple lors d'étude de cartographie des risques sur un grand linéaire où la modélisation ne sera faite in fine que dans les secteurs où des enjeux ont été identifiés. Dans ce cas, le CCTP doit préciser :

- un ordre de grandeur du linéaire total à modéliser afin que le bureau d'études puisse estimer le coût de ce poste.
- que les zones à modéliser devront être définies et proposées par le bureau d'étude suite à l'enquête de terrain et soumises à la validation du maître d'ouvrage.

3) Le calage du modèle

Cette phase est capitale. Elle a pour objet de s'assurer de la fiabilité du modèle en reproduisant par le calcul une ou plusieurs ligne(s) d'eau observée(s).

Si le maître d'ouvrage possède des éléments pour la réalisation du calage du modèle (notamment des cotes d'eau atteintes par des crues historiques dont le débit est connu), il le précisera dans le cahier des charges afin que le B.E. prenne en compte une phase de calage plus ou moins conséquente.

4) L'exploitation du modèle

L'exploitation du modèle se fait selon deux optiques :

- Une modélisation des écoulements dans l'état initial de la vallée avec les débits de projet. C'est l'approche adoptée pour cartographier l'aléa inondation.
- Une modélisation des écoulements dans l'état initial de la vallée et dans son état futur suite à une modification. C'est l'approche adoptée dans le cadre d'études d'aménagement. Dans ce cas, il peut être souhaitable que le cahier des charges propose en option un montant forfaitaire pour une simulation supplémentaire s'il s'avérait nécessaire de procéder un test d'aménagement non prévu initialement.

5) Le rendu

Le CCTP doit préciser les résultats attendus de la modélisation ainsi que la forme du rendu. En particulier le CCTP doit demander au bureau d'étude :

- Les différentes hypothèses prises pour la construction du modèle. Ceci comprend notamment les conditions limites et initiales ainsi que l'ordre de grandeur des coefficients de rugosité retenus dans les différentes zones d'écoulement.
- Un profil en long des lignes d'eau des crues de calage avec les points de référence à une échelle adaptée accompagné d'un tableau de comparaison des cotes d'eau « observées » et « simulées »
- Profils en long des lignes d'eau pour les différents débits de projet et les tableaux de valeurs associés (hauteurs, vitesses, aux pas de temps « clef » si on est en régime transitoire).
- Profils en travers avec les différentes cotes d'eau aux endroits « clef » (au droit de l'aménagement par exemple)
- Tableau de synthèse des résultats
- Un commentaire sur les résultats du modèle (fonctionnement hydraulique du secteur, mécanismes d'inondation, rôle de certains ouvrages, limites de validité du modèle, critique des résultats...)
- Dans le cadre d'une étude d'aménagement, l'ensemble des éléments permettant de réaliser l'étude d'incidence hydraulique

2.1.4.6 Hydrogéomorphologie

Ce volet sera plus ou moins important suivant les objectifs de l'étude et la réalisation ou non en parallèle d'une étude hydraulique « classique » avec modélisation numérique.

La rédaction du CCTP sera donc très variable. Dans tous les cas, il est nécessaire que le maître d'ouvrage indique :

- les documents qu'il a à disposition (notamment les photographies aériennes stéréoscopiques).
- les documents qu'il juge nécessaire que le bureau d'étude acquiert : carte géologique, carte IGN, différentes campagnes de photographies aériennes, plans cadastraux de différentes époques etc.
- Insiste sur le travail de terrain avec prise en compte de l'état des berges et de la ripisylve, les zones d'érosion, plage d'atterrissement, rupture de pente, présence de points durs, type de méandrement, recouvrement de différentes terrasses alluviales, de cônes de déjection d'affluents...

Afin de connaître les principes et la mise en œuvre de cette méthode, on pourra se reporter au guide « cartographie des zones inondables, approche hydrogéomorphologique » éditée par le MEDD et le MTETM.

2.1.5 Rapports et communication

Le cahier des charges doit préciser les attendus en terme de rendus écrits, oraux et informatiques.

2.1.5.1 Les rendus écrits

Il s'agit des documents d'étape, du rapport final, des cartographies, d'éventuels documents de communication.

Pour chaque document qui doit être rendu, le CCTP doit préciser :

- Son format
- Le nombre d'exemplaires voulus, précisant s'il s'agit d'exemplaires en couleur ou en noir et blanc, reproductibles et non reproductibles.

Si le nombre d'exemplaires voulus est important (c'est le cas notamment des documents à réaliser dans le cadre d'un PPR), le maître d'ouvrage doit prendre à sa charge la reprographie des exemplaires et ne demander au bureau d'étude qu'un nombre limité d'exemplaire. Ce poste peut en effet devenir très important et fausser au final l'offre technico-financière des différents bureaux d'étude.

1) Les documents d'étapes (le cas échéant)

S'il y en a, l'ensemble des documents d'étape que doit rendre le prestataire doit être spécifié dans le cahier des charges. Ceci comprend notamment les documents soumis à validation : note hydrologique définissant les débits de projets, le cahier des charges permettant le lancement de l'étude topographique...

2) Le rapport final avec ses documents annexes et les cartographies

Le rapport final doit contenir l'ensemble des données et des résultats de l'étude et notamment :

- Une présentation objective du contexte de l'étude et les problèmes posés
- Une synthèse de l'étude bibliographique avec leur analyse, leur critique pour au final faire apparaître les données exploitables.

- Une synthèse des informations acquises sur le terrain (notamment les fiches de laisses de crues et la synthèse des témoignages)
- L'ensemble des informations concernant la modélisation (voir 1.4.5.5).
- Une réponse la plus claire possible aux objectifs définis par le CCTP accompagnée éventuellement d'une discussion sur les incertitudes qui persistent (s'il y en a).

Toutes les cartographies demandées, avec leur échelle associée, devront être spécifiées dans le cahier des charge.

Par ailleurs des documents annexes peuvent être demandés : règlement de PPR, note de présentation.

3) Les documents de communication

Il peut s'agir de documents synthétiques simplifiés destinés aux élus ou au grand public, de posters de présentation des résultats etc... Si ces documents restent modestes sur la forme, le maître d'ouvrage peut inclure cette prestation dans le cahier des charges.

Dans le cas contraire, ces documents devront être réalisés par un prestataire spécialisé en communication. Ce travail fera alors l'objet d'un marché indépendant.

2.1.5.2 Les rendus oraux

Le nombre de réunion auquel doit assister à priori le bureau d'étude doit être spécifié. Le personnel ayant réellement réalisé l'étude doit être présent aux différentes réunions. On distinguera :

- les réunions d'étape (ou de travail)
- les réunions de présentation au maître d'ouvrage
- Les réunions publiques

Le cahier des charges précisera également à qui incombe la préparation des réunions (présentation avec transparents par exemple) et la rédaction des comptes-rendus.

Il est également vivement conseillé de faire apparaître dans le bordereau des prix, un montant forfaitaire à la réunion supplémentaire. Certaines réunions peuvent en effet s'avérer nécessaires en cours d'étude.

2.1.5.3 Les rendus informatiques

L'ensemble des documents écrits doit être rendu sous format informatique. Pour chaque document, le maître d'ouvrage précisera le format qu'il désire.

Pour les cartographies, il est vivement conseillé de préciser dans le cahier des charges que le rendu informatique se fasse sous forme Raster ainsi que sous forme vectorisée et géoréférencée. Là encore, les formats désirés devront être précisés.

2.2 Jugement des offres

Les critères de jugement des offres doivent être définis dans le dossier de consultation. Généralement les critères suivants apparaissent :

- La démarche proposée (le mémoire technique)
- Les compétences techniques et les références du bureau d'étude
- L'expérience et le CV des techniciens constituant l'équipe projet afin de juger de leur compétence.
- Le prix

Parmi ces critères, il apparaît utile de rapprocher le coût des études hydrologiques et leur importance, sachant que leur insuffisance est systématiquement la cause amenant à des déboires pouvant être très sérieux.

Le cahier des charges doit donner précisément l'importance relative que le maître d'ouvrage donne à ces différents critères. Le choix du mieux-disant en fonction de ces différents critères implique donc que le maître d'ouvrage ait de bonnes compétences pour juger du contenu de l'offre

2.2.1 La démarche

2.2.1.1 La note technique

La note technique et le bordereau des prix associé sera l'élément le plus étudié. Deux points techniques sont particulièrement sensibles et peuvent ouvrir la contestation de tiers. L'analyse des réponses des bureaux d'études sur ces deux points est indispensable :

- L'étude hydrologique aboutissant à la définition de débits de projet : le bureau d'études doit décrire la démarche qu'il compte suivre en fonction des éléments fournis dans le CCTP.
- La recherche d'éléments historiques et les enquêtes de terrain : il est important que les bureaux d'études se proposent d'y consacrer un temps non négligeable. On pourra apprécier la démarche proposée par le bureau d'étude et se reporter au bordereau des prix pour comparer les temps que chaque bureau d'études compte passer à cette phase d'acquisition de données.

Le maître d'ouvrage devra également être sensible aux éléments suivants :

- Une synthèse pertinente du contexte et de la problématique. Ceci montre que le bureau d'études a pris connaissance des différents éléments et qu'il a une bonne capacité d'analyse. Le fait que le bureau d'étude propose des démarches intéressantes qui ne sont pas proposées dans le cahier des charges ou qu'il fasse une proposition de variante pertinente permettant de mieux répondre aux objectifs fixés est un point positif. Il faut cependant faire attention que la proposition de la variante ne soit pas un prétexte pour utiliser un produit « maison » du bureau d'étude, produit souvent onéreux et pas forcément adapté à l'étude.
- La modélisation doit être en adéquation avec les besoins et les objectifs de l'étude. En particulier, l'usage d'un outil trop performant ou insuffisant peut conduire à de sérieux déboires. Quel que soit le modèle qui lui est proposé, le maître d'ouvrage doit dans tous les cas garder à l'esprit que la complexité du mode de calcul n'est pas un gage de précision : c'est le savoir-faire du modélisateur et son expérience qui priment et non la puissance de l'algorithme qui est souvent source de distorsion des résultats. Si le bureau d'études présente des routines de calculs incompréhensibles et illisibles, le maître d'ouvrage doit s'imposer de lui demander des explications.

2.2.1.2 Les compétences techniques et les références du bureau d'étude

Les références de l'entreprise sont un critère important, surtout s'il s'agit d'une étude « sensible ». Pour chaque étude référencée, il est important que figurent l'intitulé de l'étude, l'année de l'étude, le maître d'ouvrage pour qui elle a été faite. Il peut être également intéressant de voir si les références récentes indiquées correspondent à celles fournies dans les CV des membres de l'équipe projet.

2.2.1.3 Les capacités du bureau d'études et de ses techniciens

L'analyse des CV est importante afin de s'assurer que le personnel qui doit mener l'étude est suffisamment qualifié et expérimenté. Deux points peuvent être regardés avec minutie :

- Il est important de distinguer parmi les CV fournis, le personnel qui va participer concrètement à la réalisation de l'étude (enquête de terrain, recherche bibliographique, montage du modèle etc.) et le personnel souvent très expérimenté, « vitrine » du bureau d'étude (le directeur technique par exemple) mais qui n'aura pas forcément de rôle direct dans la réalisation l'étude sice n'est par exemple le contrôle des documents émis.

- les références du personnel devant réaliser l'étude doivent être en adéquation avec la problématique de la consultation

2.2.2 Le prix de la prestation

Même si pour le Maître d'Ouvrage le critère du prix peut apparaître particulièrement important, il doit garder à l'esprit que l'investissement réalisé dans les études hydrologiques est très largement valorisé. Dans le cadre d'études d'aménagement, le coût de l'étude est généralement très faible par rapport à celui des travaux et si l'étude est de bonne qualité technique, elle peut engendrer des économies substantielles sur le montant global du projet.

Le maître d'ouvrage devra juger de l'adéquation entre le coût de la prestation et le travail que propose le bureau d'étude.

Il est indispensable que le cahier des charges soit accompagné par un bordereau des prix qui peut par exemple reprendre les étapes 2.1.4.2, 2.1.4.3, 2.1.4.4, 2.1.4.5 et 2.1.4.6. présentées dans le présent guide. Ce bordereau peut détailler d'avantage les différents postes. Il doit dans tous les cas faire apparaître, le nombre de jours par poste et le prix unitaire à la journée.

En toute rigueur, le coût unitaire à la journée reflète la qualification du personnel alors que le temps indiqué reflète la quantité de travail que se propose de fournir le bureau d'étude. Cependant, le maître d'ouvrage devra rester critique quant aux temps indiqués par poste car concrètement, aucun moyen ne lui permettra de vérifier que le bureau d'étude y consacre le temps effectivement indiqué.

Ce bordereau des prix permettra de bâtir un tableau ou grille de comparaison synthétique des différentes offres. C'est le plus souvent le meilleur moyen de croiser tous les critères et d'évaluer le meilleur candidat.

3. Suivi de l'étude et gestion de ses produits

Les éléments de ce chapitre doivent être intégrés dans le cahier des charges de l'étude hydraulique (C.C.T.P.) pour améliorer leur efficacité.

3.1. Déroulement général d'une étude

Le déroulement technique d'une étude répond à un certain nombre de nécessités qui imposent au maître d'ouvrage une segmentation maximale en points d'arrêt au-delà de laquelle il est déraisonnable d'aller.

A rebours, la confrontation des résultats avec leurs incertitudes doit avoir lieu à certains moments clefs du déroulement de l'étude pour être efficace sans contrarier la cohérence globale de l'étude.

Le maître d'ouvrage devra toutefois se garder de procéder à une validation progressive de l'étude sur visa de résultats partiels, et réservera sa validation formelle au rapport final. En effet, parce qu'une étude hydraulique est souvent évolutive, il n'est pas rare qu'à la lumière de résultats intermédiaires, il faille revenir, par exemple, sur un calage initial ou des hypothèses de répartition de débits. Si ces hypothèses ou ces résultats intermédiaires ont été formellement validés au moment de leur formulation, des risques sérieux de critiques, voire de contentieux, entre le maître d'ouvrage et son prestataire sont susceptibles d'apparaître à la fin de l'étude.

3.1.1. Réunion de lancement de l'étude

Cette réunion de lancement de l'étude est généralement souhaitée par le maître d'ouvrage ne serait-ce qu'au titre de son utilité pour rappeler les paramètres administratifs et financiers de l'étude et les éléments temporels contractuels.

Elle doit comporter un volet plus technique dont la portée n'est pas à négliger : la reformulation des objectifs de l'étude.

Le chapitre 1 du présent document a eu l'ambition de présenter au lecteur combien une définition claire et complète des objectifs contribuait à la réussite de l'étude hydraulique. Il est cependant utopique de croire que la formalisation de cette définition dans le cahier des charges suffit à tout coup pour établir une compréhension mutuelle des objectifs entre le maître d'ouvrage et son prestataire.

En effet, la rédaction du cahier des charges par le maître d'ouvrage (ou son assistant) d'une part, le degré d'attention portée à la lecture dudit cahier des charges par le candidat à l'appel d'offres d'autre part, peuvent escamoter en partie ces objectifs et leur portée réelle.

La reformulation des objectifs de l'étude par le prestataire lui permet d'explicitier les souhaits du maître d'ouvrage, et de s'assurer qu'il les a lui-même bien compris. Elle fournit aussi au maître d'ouvrage l'occasion de signifier la hiérarchisation qu'il opère sur les préoccupations listées, la teneur des arbitrages qu'il entend effectuer, le contexte politique et social dans lequel se situe l'étude et ses conclusions. Elle peut aussi permettre au maître d'ouvrage, ainsi qu'à ses partenaires, de préciser certains éléments liés à leur connaissance du fonctionnement hydraulique du secteur d'études.

La réunion de lancement est également l'occasion pour le prestataire de faire connaître ou de préciser les éléments qu'il attend de la part des partenaires de l'étude : données techniques, éléments de bibliographie, autorisations d'accès, etc. Aussi, est-il raisonnable de faire démarrer l'étude à l'issue de la fourniture de ces éléments au bureau d'études prestataire, tant il est dommageable pour la qualité de l'étude que le prestataire, tenu par un délai courant en dépit de la non-fourniture de toutes les données nécessaires, soit forcé de produire un résultat de calcul sans disposer de certaines informations indispensables qu'il doit deviner (au risque de se tromper ou d'avoir à reprendre tout ou partie de son calcul lorsque la donnée réelle lui parvient enfin) ou négliger (à tort ou à raison). La réunion de lancement sera ainsi l'occasion pour le maître d'ouvrage et chacun de ses partenaires de

préciser, les délais respectifs de fourniture des éléments demandés ; la date de l'ordre de service (O.S.) de démarrage des prestations¹ pourra être fixée en conséquence à cette occasion.

Le cadrage de l'incidence de cette disposition sur le planning global de l'étude peut être très efficace si le recensement de ces données a été effectué dès la préparation du cahier des charges, et la liste correspondante, explicitée dans le cahier des charges.

3.1.2. Collecte et analyse des données

Cette phase est laborieuse et chronophage tant pour le prestataire que pour les partenaires de l'étude.

Les données existantes doivent être recueillies et soigneusement référencées. En particulier, les unités, les référentiels (lieu de prise d'information, référentiel géographique, altimétrique, etc), les dates, les sources d'information doivent être précisées pour qu'une donnée constitue une information complète et exploitable. Les contrôles de cohérence adaptés à chaque type de données doivent être mis en œuvre pour trier les informations a priori fiables et les informations a priori erronées, et pour identifier les lieux ou les événements mal connus pour lesquels des investigations complémentaires ou des hypothèses spécifiques doivent être menées ou émises.

La matière d'œuvre bibliographique doit être consultée et analysée de manière à faire apparaître les constats convergents d'une part, les points de divergence voire les contradictions d'autre part, que ce soit au niveau des ajustements effectués sur les données ou au niveau des conclusions tirées par l'auteur. Ces contradictions doivent être expliquées par le prestataire d'après ce qu'il a compris de ses lectures comparées et les données peut-être plus récentes ou révisées dont il dispose.

Au moins une visite sur le terrain doit permettre d'étayer les analyses du prestataire sur des observations in situ, mais aussi, de consolider les constats sur une base pragmatique en vue de les faire partager par tout connaisseur du site de l'étude.

A l'issue de cette phase, le prestataire est capable de produire une analyse qualitative du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude.

3.1.3. Construction, calage et validation de l'outil d'analyse

Contrairement à une idée très répandue parmi les maîtres d'ouvrages, la phase de construction, calage et validation du modèle, bien qu'elle regroupe un certain nombre de tâches bien identifiées, n'est pas dissociable de la phase précédente d'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude.

En effet, l'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude permet au prestataire d'ébaucher des hypothèses de fonctionnement, et donc, de topologie des écoulements, et par suite, de modélisation appropriée de ces écoulements. La construction et le calage du modèle viennent confronter le fruit de cette analyse qualitative à la réalité des données quantitatives. Si bien qu'il est fréquent que l'hydraulicien ait à amender son analyse initiale du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude, en fonction des premières difficultés rencontrées pour caler son modèle.

- On peut cependant décomposer le travail du modélisateur en trois sous-phases. Il commence par le choix d'un modèle approprié à la topologie des écoulements, et l'identification des hypothèses de simplification des écoulements réels et de leurs conséquences sur la nature et la qualité des résultats. Il peut s'agir du type et des caractéristiques des débordements, des conditions hydrauliques aux limites de chaque secteur, de tri par rapport aux données disponibles, de construction par interpolation ou extrapolation de données manquantes, de

¹ Pour cette raison, au niveau de l'Acte d'Engagement (ou du Cahier des Clauses Administratives Particulières), on précisera de préférence que les délais de réalisation de l'étude débutent à la date de l'ordre de service prescrivant le démarrage des prestations, et non à la date de notification du marché.

raffinement de données existantes pour augmenter leur densité apparente, du mode de représentation des singularités hydrauliques sous forme de lois hydrauliques, de géométries d'obstacles, de coefficients de perte de charge, etc.

- Ensuite, il convient de faire coïncider le résultat du calcul hydraulique (généralement, une ligne d'eau) avec les points de mesure connus réputés représentatifs de la ligne d'eau réelle d'un événement hydrologique effectivement survenu dans le secteur d'étude. Cette coïncidence est effectuée à l'aide du calage de paramètres du calcul laissés à l'appréciation du modélisateur, mais n'est pas forcément absolue. En effet, la qualité relative et la représentativité variable des données utilisées pour cette sous-phase (qu'il s'agisse des données utilisées pour le calcul ou des données auxquelles les résultats sont confrontés) ne permettent que très rarement un calage parfait, c'est-à-dire, sans écart entre simulation et réalité.
- Il appartient alors au prestataire d'explicitier les zones de son calcul qui sont sensibles, et à quel point, aux incertitudes liées aux données de calage. Cette dernière sous-phase est communément appelée « étude de sensibilité ». Enfin, une simulation de validation doit être tentée dès lors qu'il existe une forte crue différente de la crue de calage, pour laquelle on dispose de lasses de crue. Cette étape constitue la validation du modèle, et permet d'apprécier a minima l'incertitude liée au calage du modèle et la capacité de prédiction du modèle.

3.1.4. Fonctionnement actuel du secteur d'étude

Trop souvent négligée, cette phase fait écho à la réunion de lancement. Il s'agit d'y présenter au maître d'ouvrage l'éclairage technique qui a pu lui faire défaut lors de la définition de ses objectifs.

Ainsi, le prestataire doit décliner les objectifs du maître d'ouvrage en termes techniques, par zone et par variable physique significative, et il doit se prononcer sur l'opportunité et la faisabilité de ces objectifs « a posteriori ». L'échange qu'il doit avoir à ce sujet avec le maître d'ouvrage doit permettre à ce dernier de décider, en connaissance de cause :

- de l'abandon des objectifs aventureux ou hasardeux ;
- de l'amendement de la hiérarchisation initiale des objectifs de l'étude ;
- d'une éventuelle optimisation des scénarios d'aménagement initialement proposés à l'étude dans le cahier des charges, en respectant une équivalence de consistance entre les nouvelles tâches et celles auxquelles elles se substituent.

Le prestataire présente également, lorsqu'ils sont différents de l'état actuel, les états de référence. Il les décrit complètement et indique clairement ce qui les distingue qualitativement et quantitativement de l'état actuel. Il précise et explique les quantifications des niveaux de satisfaction des objectifs qu'il est raisonnable d'envisager compte-tenu des écoulements identifiés dans le secteur d'étude.

3.1.5. Conception de l'état projeté

Sur les indications du maître d'ouvrage (ou de son assistant, le cas échéant), le prestataire élabore les différents scénarios de l'état projeté.

Pour ce faire, il modifie la topologie des écoulements, dans des proportions qui ne doivent pas bouleverser le modèle au point de compromettre la pertinence de la comparaison des résultats entre les situations de l'état actuel, des états de référence et des états projetés. Puis il modifie les données structurelles du modèle pour modéliser les projets, et procède aux simulations selon des conditions semblables à celles des états actuel et/ou de référence.

L'analyse des résultats ne se limite pas à une énumération plus ou moins exhaustive des différences quantitatives entre les différentes situations. Elle prend en compte aussi de

manière approfondie les différences qualitatives entre les divers fonctionnements hydrauliques du secteur étudié.

Le prestataire doit dès lors apprécier, au vu des analyses des résultats, le niveau de satisfaction des objectifs du maître d'ouvrage. La synthèse de ces analyses n'appartient qu'au maître d'ouvrage, mais le prestataire doit avoir fourni, pour chaque objectif, les éléments compréhensibles qui étayeront cette appréciation de synthèse.

Cette étape peut faire l'objet de deux temps : le premier consistant à esquisser les tendances hydrauliques en fonction d'options de conception de l'ouvrage, et le second visant à dimensionner l'ouvrage en fonction du choix de la maîtrise d'ouvrage parmi les options (et tendances) présentées. Un dédoublement des réunions et du délai d'exécution doit alors être prévu.

3.1.6. Livraison du résultat final

Le rapport final de l'étude et ses annexes ne constituent qu'une fraction du produit de l'étude. Le maître d'ouvrage qui n'exigerait que ce produit pour livraison du résultat final céderait au prestataire la jouissance d'une masse importante d'informations élaborées par lui pour son compte et sur ses deniers.

Il n'est donc pas inutile de rappeler que le maître d'ouvrage peut réclamer, pour peu que le cahier des charges n'ait pas négligé de le mentionner :

- les données informatiques
- les données topographiques
- les fichiers de commande du modèle
- les fichiers des résultats (lignes d'eau, notamment).

Il faut toutefois s'assurer que la livraison s'effectue selon des formats archivables et lisibles par les moyens techniques du maître d'ouvrage, et que l'organisation de ces fichiers informatiques est expliquée clairement dans un document informatique ou papier livré en même temps au maître d'ouvrage.

3.2. Les critères de validation de l'étude

Le Maître d'ouvrage (ou son assistant) devra déceler les éventuelles erreurs commises par le prestataire, les incohérences dans les résultats des différentes variantes, les points de non conformité avec le programme de l'étude, ou tout autre sujet de désaccord. Il devra soutenir le débat technique qui en découlera et amènera le prestataire à rectifier ce qui doit l'être... ou se laissera convaincre par lui.

3.2.1. Comptes-rendus des observations de terrain

La confrontation des résultats de calculs avec les observations de terrain est le filtre le plus efficace et le plus accessible pour écarter les erreurs manifestes d'analyse. Encore faut-il pour cela que ces observations de terrain fassent l'objet de constats à la fois exhaustifs et compréhensibles, notamment par le maître d'ouvrage.

Il n'est généralement pas utile, à moins de nourrir d'importants soupçons quant au sérieux du prestataire, d'exiger la présentation des fiches de prise d'information sur le terrain, c'est-à-dire les minutes des observations faites par le prestataire durant l'arpentage du terrain. Celles-ci ne seraient pour le maître d'ouvrage que des preuves du passage du prestataire sur le terrain, et pour le prestataire, qu'un brouillon de prises de notes répondant à des critères de formalisation et de contenu propres à son organisation professionnelle.

Les comptes-rendus des observations de terrain doivent être un récapitulatif synthétique du dire d'expert du prestataire sur les lieux significatifs du site de l'étude, étayé par les observations de terrain présentées en des termes non-équivoques et intelligibles par le maître

d'ouvrage. Ainsi, ils doivent autant permettre au maître d'ouvrage de valider les options d'analyse retenues par le prestataire, que permettre au prestataire de partager ses constats techniques avec le maître d'ouvrage.

Il peut s'agir de fiches d'hydrogéomorphologie, de laisses de crues, etc. Ils doivent comprendre une ou plusieurs photographies du site, une indication des dates et auteurs du constat, et des éléments descriptifs du lieu et de ses caractéristiques intéressantes.

A moins de connaître très finement le site de l'étude, le maître d'ouvrage ne peut pas vraiment exercer un contrôle de la pertinence de ces constats. Par contre, il peut apprécier à quel point le prestataire justifie ses choix techniques dans l'élaboration de l'outil d'analyse et l'interprétation des résultats obtenus à partir de ces observations de terrain. Il ne devrait notamment pas tolérer que ces deux phases (observations de terrain et analyses) soient manifestement déconnectées : ce serait un indice d'un risque de manque d'ancrage de l'outil d'analyse dans la réalité du site, pouvant conduire à de sérieuses aberrations. Une simple vérification « orale » en interrogeant précisément le chargé d'études sur l'un ou l'autre lieu du site de l'étude devrait lui permettre de dissiper ou confirmer ces doutes.

3.2.2. Synthèse bibliographique

Quelque soit le site étudié, le prestataire ne doit jamais considérer qu'aucune étude n'y a été menée ; il doit plutôt considérer, a priori, que son étude vise à compléter une connaissance du fonctionnement hydraulique du secteur d'études déjà existante. Sur la base de la bibliographie fournie par le maître d'ouvrage si des études antérieures sont répertoriées, ou à défaut sur la base de ses propres recherches, en prenant alors soin de répertorier les organismes consultés, et de mentionner l'ensemble des documents consultés, le prestataire synthétisera les connaissances disponibles, pour identifier leurs convergences et leurs contradictions, et positionner ses propres analyses dans ce contexte technique.

Ainsi, il pourra être amené à positionner sur une carte schématique l'ensemble des données rassemblées, ce qui permet de faire côtoyer des informations de nature comparable provenant de sources différentes, et de rendre évidents quelques constats de divergence ou de convergence de ces informations. Ces informations pourront être les valeurs des débits de période de retour donnée, les niveaux supposés atteints ou calculés pour des événements identiques, les lois de fonctionnement d'ouvrages, les répartitions de débits entre bras principal et bras secondaire... Parmi les plus courants, on peut citer :

- un débit statistique de période de retour donnée dont la valeur varie sensiblement au même endroit en fonction des études : il s'agit alors de comprendre si cette variation provient de méthodes hydrologiques différentes² (et d'en tirer des enseignements pour le choix de la méthode de l'étude présente), d'échantillons de données différents (soit qu'une valeur jugée aberrante et écartée de l'ajustement par l'un ait été conservée et intégrée dans l'ajustement par l'autre, soit qu'une période de mesure plus longue profite à l'une des études), d'une modification structurelle du bassin versant et de ses modes de production d'un débit, ou encore d'une extrapolation plus ou moins correcte de débits calculés en d'autres lieux. On pourra aussi, s'ils figurent au niveau des études consultées, mentionner les intervalles de confiance correspondant aux différentes valeurs répertoriées ;
- un débit de pointe variable pour une même crue connue selon les sources : il s'agit alors de comprendre si cette variation provient d'une mise à jour des données hydrométriques (courbe de tarage rectifiée, suite par exemple à la réalisation de nouveaux jaugeages), d'une méthode d'estimation hydraulique différente (lois hauteurs-débits différentes, ou étalonnées différemment), de choix différents d'extrapolation de valeurs mesurées en d'autres lieux (extrapolation des valeurs en amont, extrapolation des valeurs en aval, interpolation des deux, hypothèses d'apports sur les affluents) ;

² par exemple quelle méthode d'évaluation des débits d'occurrence rare ?

- - une série de niveaux de crue incohérente, constituant une courbe hauteurs-débits improbable à cet endroit (typiquement : une crue de débit supérieur à une autre donnant un niveau inférieur à l'autre) : des explications ont pu être fournies (circonstances particulières telles qu'embâcles dans l'ouverture d'un pont, rupture d'un bassin de retenue sur le parcours, modification sensible du lit mineur, mesure indisponible et valeur « devinée ») ou doivent être trouvées ;
- une répartition variable des débits entre bras : à moins de trouver des explications relatives à des hypothèses de concomitance différentes entre les études antérieures ou à des positions différentes des ouvrages de régulation des niveaux et des débits (moulins, vannages, barrages de navigation, micro centrales hydroélectriques), il faut examiner la stabilité des lits mineurs et les incidences de ces clefs de répartition différentes sur les coefficients de calage des bras concernés ;
- des valeurs de coefficients de calage (notamment rugosité du lit) sensiblement différentes (plus de 5 unités de Strickler, par exemple) : les valeurs aberrantes par rapport aux valeurs usuelles reconnues par les règles de l'art doivent être identifiées, les circonstances particulières pouvant expliquer ces différences doivent être recherchées (occupation du sol variable selon la saison ou les pratiques agricoles en zone rurale, urbanisation différente), les erreurs anciennes ne doivent pas être renouvelées. Il ne faut pas oublier, dans le cadre d'une modélisation filaire, que les coefficients de Strickler ou de Manning sont, en pratique, des coefficients intégrateurs des différentes contributions à la perte de charge linéaire et qu'ils ne rendent donc pas compte uniquement de la rugosité du fond de la rivière (voir par exemple la formule de Cowan).

3.2.3. Fonctionnement hydrologique

L'étude hydraulique n'étant qu'une focalisation sur une portion restreinte d'un réseau hydrographique auquel elle est intimement liée, elle ne peut être pertinente que si l'expression des interrelations entre le niveau « étendu » (hydrologique) et le niveau « localisé » (hydraulique) est correcte. Le maître d'ouvrage doit donc s'assurer que le fonctionnement hydrologique dans lequel s'inscrivent ses objectifs d'étude est suffisamment bien restitué pour fournir des données pertinentes au projet.

Il ne s'agit toutefois pas nécessairement pour le maître d'ouvrage de juger de l'utilisation adéquate de formules spécialisées de l'hydrologue, mais de vérifier que les interrelations entre stations hydrologiques et limites du secteur d'étude hydraulique ont bien été établies.

Les principales questions qui doivent trouver réponse dans l'analyse du fonctionnement hydrologique sont :

- quelles stations hydrométriques ont servi de base à l'établissement des débits de calage et de référence ? Quelle est la durée d'exploitation de ces stations, et quelle méthode a utilisé le prestataire en vue d'évaluer les débits d'occurrences rares ? ;
- quelle analyse des crues historiques a été menée sur le secteur concerné ? Le débit de référence pris en compte est-il le débit de crue centennal calculé ou le débit de la crue correspondant aux Plus Hautes Eaux Connues ? Peut-on évaluer les marges de sécurité correspondant à ces évaluations ?
- de quelle manière les influences des divers affluents sont-elles intégrées ? Sur quelle base leur contribution respective a été déterminée (analyse de la pluviométrie, de la géologie, de la forme du bassin versant, des hydrogrammes de crue etc...) : comment se combinent les hydrogrammes, quel débit de pointe (ou hydrogramme) retenu pour chacun d'entre eux ?
- comment a été déterminée la contrainte aval (cote ou limnigramme), dans le cas d'une modélisation en régime fluvial (condition amont dans le cas d'un régime torrentiel) ?

- la durée de submersion (ou, ce qui est assez proche, le volume de la crue) est-elle un paramètre de décision à déterminer ?
- doit-on effectuer les calculs en régime transitoire ou en régime permanent (une réponse affirmative à la question précédente induit une réponse affirmative à celle-ci) ? Si le calcul doit être mené en régime transitoire, comment ont été déterminés les hydrogrammes retenus : à savoir si l'étude vise à déterminer un volume de crue (ou une durée de submersion), ou si la modélisation vise à déterminer la cote de la ligne d'eau pour le débit de référence, les hydrogrammes à prendre en compte pourront être différents.

On se reportera à l'annexe 3 - données hydrologiques, ainsi qu'aux Guide méthodologique pour l'estimation de la crue centennale dans le cadre des plans de prévention des risques d'inondation de la DPPR.

3.2.4. Choix de l'outil d'analyse

On ne trouve bien que ce qu'on cherche bien. C'est dans cet esprit que l'**annexe 2 – analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude** donne des pistes pour assurer une analyse qualitative du secteur d'étude avant le lancement des calculs dans lesquels le novice risque de se perdre.

Le choix de l'outil d'analyse repose sur la pertinence des interprétations du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude. Il ne pose pas forcément de problème particulier, mais il convient d'être vigilant une fois pour toutes au moment de ce choix.

La vérification du maître d'ouvrage porte sur la concordance entre le schéma de la topologie des écoulements dans le secteur d'étude et l'outil d'analyse proposé par le prestataire. Cette concordance devrait être *expliquée par le prestataire*, en répondant notamment aux interrogations suivantes :

- lorsque deux laisses voisines et fiables d'une même crue sont à des altitudes sensiblement différentes : s'agit-il d'une progression normale du profil en long d'un écoulement continu et régulier entre ces deux points, ou de témoignages de deux écoulements distincts qu'il conviendra de distinguer dans l'outil d'analyse ?
- pour chaque zone immergée, l'outil d'analyse permet-il d'identifier et de quantifier les écoulements qui vont entrer puis sortir ? Sinon, quelles hypothèses et quelles informations permettent de simplifier le fonctionnement analysé ?
- pour chaque cheminement significatif de l'écoulement identifié dans le schéma topologique, existe-t-il bien une représentation conceptuelle équivalente dans l'outil d'analyse ?
- pour chaque île et chaque dérivation de moulin, le modèle tient-il compte de la séparation des écoulements, et sinon, quels sont les indices permettant de valider l'hypothèse simplificatrice ?
- lorsque des connexions conditionnelles existent entre plusieurs zones, comment le prestataire a-t-il réglé (ou étalonné) les paramètres significatifs, à partir de quelles données ?

Quelle que soit la situation, le maître d'ouvrage ne devrait jamais laisser cette question de l'adéquation entre le modèle d'analyse choisi et la situation hydraulique du secteur d'étude faire l'objet d'un traitement diffus ou implicite par le prestataire.

Au choix de l'outil d'analyse se rattachent les choix des paramètres de calcul. Ceux-ci sont plus spécialisés et sont difficiles à contrôler directement. Il est toutefois intéressant pour le non-expert de demander au prestataire la fourniture des fourchettes usuelles de valeurs prises par chaque paramètre et la signification (qualitative) des bornes.

3.2.5. Pertinence du calage de l'outil d'analyse

Tout outil d'analyse hydraulique, qu'il s'agisse d'une formule empirique ou d'un modèle numérique complexe, est une formulation générale ou théorique représentative d'une tendance ou de propriétés spécifiques des écoulements, encadrée par des hypothèses explicites, et comprenant des paramètres ajustables en fonction des conditions particulières du site à l'étude.

Le calage (ou « étalonnage ») des paramètres ajustables est une étape décisive pour la qualité de l'étude : il permet de vérifier quantitativement le respect des hypothèses de validité de l'outil d'analyse, et de s'assurer de la concordance entre les simulations et la réalité modélisée.

Lorsque les données de description de la réalité (ou points de calage) manquent, le calage consiste essentiellement à choisir des valeurs pertinentes des paramètres en similitude avec des situations hydrauliques analogues et mieux connues, qui peuvent être présentées et expliquées.

Lorsque les données de description de la réalité abondent, le calage n'en est pas forcément facilité. L'**annexe 2 – analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude** a montré combien les informations descriptives d'un même événement hydrologique peuvent être incertaines sans pour autant être fausses. Il n'est toutefois pas question de laisser un prestataire indelicat se contenter d'une simple appréciation de la moyenne des écarts et d'un commentaire laconique et commode sur le peu d'influence de cet écart moyen.

L'analyse de la qualité du calage doit être plus fine, en précisant :

- l'écart absolu entre l'information et le calcul en chaque point de calage ;
- le graphique du profil en long de la ligne d'eau et des points de calage pour apprécier visuellement ces écarts, à l'aide d'une échelle de représentation significative à cet égard ;
- pour chaque tronçon homogène, la pente moyenne calculée et la pente moyenne connue pour les lignes d'eau simulées ;
- à l'aide des points précédents, la nature générale des écarts constatés (translation globale de portions de la ligne d'eau, rotation par rapport à un point à identifier, etc) et les explications relativement au fonctionnement hydraulique du secteur d'étude.

La précision que l'on est en droit d'attendre d'un calage dépend essentiellement des informations disponibles pour décrire la réalité, tant au point de vue des données hydrauliques de calage que des données topographiques. Les analyses fines de ces deux sujets (cf. en particulier **annexe 2 – analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude**) doivent permettre de conclure à des appréciations de la précision attendue du calage.

D'une manière générale, compte tenu des incertitudes usuelles, sur un cours d'eau naturel, en régime fluvial, on pourra retenir :

- que le maître d'ouvrage est en droit d'attendre un écart sur les niveaux d'eau inférieur ou égal à 10 cm ;
- qu'un écart compris entre 10 et 20 cm sera considéré comme satisfaisant sous réserve de la concordance des tendances générales (pente du profil en long et concordance de niveaux meilleure en plusieurs autres points) de l'écoulement ;
- qu'un écart supérieur à 20 cm n'est pas satisfaisant, à moins d'être localisé précisément à un endroit que l'analyse des données hydrauliques aura décelé faible au point de vue de l'information disponible. Il devra être accompagné d'un commentaire de la part du bureau d'études.

Ces limites indicatives peuvent être amendées pour les cours d'eau à pente très faible et sur les tronçons de cours d'eau très courts, en fonction du dénivelé moyen entre les limites amont

et aval du secteur d'étude. En effet, si le dénivelé est de 60 cm sur 6 km (pente en forte crue de $1/10.000^{\text{ème}}$), un écart compris entre 10 et 20 cm est moins admissible que si le dénivelé était de 180 cm (pente de $3/10.000^{\text{ème}}$).

Même si l'écart moyen constaté est finalement assez modeste, les écarts doivent être analysés point de calage par point de calage, et surtout, les tendances de l'écoulement doivent être fidèlement restituées. Ainsi, le maître d'ouvrage ne devrait pas se satisfaire d'une modélisation qui fournit, pour les situations de calage, une ligne d'eau de pente globalement différente de la pente des mesures de calage, quand bien même l'écart en chaque point resterait dans une enveloppe satisfaisante, avec une valeur proche de zéro vers le milieu du secteur modélisé, et une valeur (absolue) maximale aux extrémités. En effet, la dynamique d'écoulement, dont la pente est le paramètre le plus significatif, n'est pas fidèlement représentée dans un tel cas, et les réactions de l'écoulement aux modifications de cette dynamique ne peuvent être correctement prédites.

3.2.6. Cohérence des résultats

Il arrive bien plus souvent qu'on ne le croit qu'un chargé d'études concentre tant son attention sur la détermination au plus d'une ligne d'eau en un endroit donné, qu'il en oublie de s'assurer de la cohérence d'ensemble des résultats qu'il obtient.

L'hydraulique d'un cours d'eau est un domaine intégrateur des influences de la topographie et de l'hydrologie, à tel point que toute variation significative du profil en long doit trouver une explication dans une combinaison particulière de ces facteurs.

Le maître d'ouvrage devrait au moins exiger un profil en long des lignes d'eau de résultat associé à un profil en long du fond du lit mineur, et si possible, superposé à ce dernier, un profil en long de la ligne de charge hydraulique. Et il devrait demander au prestataire des explications pour :

- tout écartement visible entre le profil en long des niveaux et le profil en long de la charge hydraulique, qui traduit une accélération significative des écoulements ; un profil en long des vitesses moyennes devrait confirmer ce diagnostic en amplifiant les variations visibles ;
- toute brisure visible dans le profil en long de la ligne d'eau, qui traduit la présence d'une singularité hydraulique ;
- toute discontinuité entre deux branches de lignes d'eau calculées séparément, qui traduit souvent une erreur dans la condition limite aval de la branche amont, prise différente de la cote amont obtenue pour la branche aval, ou encore une erreur dans le débit de projet retenu dans l'une ou l'autre branche.

3.2.7. Vérification des hypothèses de calculs

Lorsque l'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude a conduit le prestataire à simplifier ses calculs selon des hypothèses de prépondérances de phénomènes, il lui appartient de démontrer la pertinence de ces hypothèses, en vérifiant que les ordres de grandeur relatifs des phénomènes négligés par rapport aux phénomènes calculés sont effectivement en faveur des simplifications opérées.

Par ailleurs, lorsque le prestataire a identifié des singularités hydrauliques dans sa modélisation, il doit avoir ensuite réalisé un calage des paramètres dimensionnants. Les lois de fonctionnement des seuils, piles de pont et autres ouvrages mobiles comportent toujours un paramètre de forme, un coefficient de débit, un coefficient de perte de charge qui demeure à l'appréciation du modélisateur. Il appartient donc au prestataire d'expliquer ses choix quant aux valeurs de ces paramètres

3.3. Sensibilité des calculs et gestion des incertitudes

3.3.1. De l'incertitude en hydraulique

La complexité des écoulements hydrauliques dans une géométrie naturelle de lit elle-même complexe, avec des interactions perturbées par les fluctuations du type de couverture végétale des sols immergés, rend tout calcul hydraulique sujet fortement à l'incertitude.

La possibilité de disposer, grâce aux outils numériques de calcul hydraulique, de lignes d'eau fournissant des niveaux d'eau calculés au centimètre ou au millimètre près ne doit jamais masquer l'incertitude inhérente au modèle hydraulique. **Seuls les plus inexpérimentés des hydrauliciens peuvent encore afficher une confiance absolue dans les résultats de leurs calculs.**

A contrario, cette incertitude ne doit pas jeter un opprobre systématique sur les outils d'analyse hydraulique, numériques ou physiques à échelle réduite. Car si elle est pratiquement inévitable et à certains égards irréductible, elle n'en est pas moins connaissable, et dès lors, les décisions qui doivent découler des résultats de ces calculs peuvent être éclairées par cette connaissance.

Si les tâches usuelles de l'étude hydraulique peuvent être assurées par un hydraulicien peu expérimenté sous le contrôle d'un hydraulicien plus confirmé, le recours à un hydraulicien expérimenté peut être décisif pour la phase d'appréciation des marges d'incertitudes dans lesquelles devra se former la décision du maître d'ouvrage.

L'incertitude ne contrarie pas fondamentalement l'analyse hydraulique : le calage des paramètres ajustables permet de faire coïncider « de force » les résultats de calcul avec les données disponibles, à quelques écarts interprétables près. Mais l'incertitude demeure lovée dans le meilleur des calages. En effet, les paramètres ajustables calés contiennent une fraction de valeur « vraie », représentative fidèlement de la réalité des écoulements, et une fraction de valeur « fausse », absorbant la part d'incertitude au droit du point de calage sur lequel l'hydraulicien a ajusté son calcul.

3.3.2. Les sources de l'incertitude

Les sources de l'incertitude sont nombreuses :

- les données mesurées, soumises aux incertitudes de la mesure elle-même ;
- la représentativité des données peut être affectée par leur provenance, leur âge, etc ;
- les hypothèses faites par l'hydraulicien pour remplacer les données manquantes ;
- les hypothèses faites par l'hydraulicien pour mettre en œuvre un outil d'analyse ;
- l'évolutivité des données significatives.

A ces sources « techniques » d'incertitude peut s'ajouter l'incertitude « décisionnelle » liée aux choix de la maîtrise d'ouvrage pour la définition sécuritaire ou non des hypothèses de travail (notamment, choix d'un débit de projet dans un intervalle de confiance). Cette incertitude-ci ne nous paraît cependant pas devoir être traitée sur le même plan que les incertitudes « techniques », à l'aide de simples tests génériques de sensibilité, mais plutôt, par l'élaboration d'un scénario « moyen » et d'un scénario « précaution » ou encore d'un scénario « minorant ».

3.3.2.1- Les incertitudes liées aux mesures de données

Les mesures d'altitudes (de sol, de lit mineur, de laisse de crue, de niveau d'eau, d'ouvrage hydraulique, etc) par levés terrestres sont rendues difficiles par l'emplacement des informations recherchées, souvent éloignées des lieux de concentration urbaine et des infrastructures routières où l'on trouve usuellement des points de repère altimétriques de l'IGN. Le géomètre est souvent contraint à un cheminement relativement long pour rattacher l'altitude recherchée, à travers des lieux ruraux qui perturbent fréquemment la visée (végétation arbustive, haies), et ne dispose que rarement d'un deuxième point de rattachement permettant de boucler le cheminement dans les règles de l'art. On n'espère jamais mieux qu'une incertitude moyenne de +/- 5 cm sur de telles mesures, et il n'est pas

anormal de considérer une incertitude de +/- 10 cm lorsque les conditions de nivellement sont difficiles.

Les mesures d'altitudes dans le lit majeur par télémétrie (photogrammétrie, laser aéroporté, etc), outre les incertitudes statistiques liées à l'échelle de prise de vue, peuvent poser problème dans les zones humides où le couvert végétal fausse l'information recueillie. La précision des données descriptives du lit moyen le long des cours d'eau peut s'en trouver perturbée. Cette précision, en planimétrie, et en altimétrie, est directement liée aux échelles des clichés pour la photogrammétrie ; elle est annoncée d'une dizaine de centimètre en altimétrie, et d'environ 50 cm en planimétrie, pour la technique du laser aéroporté³.

Les mesures de débits aux stations hydrométriques sont soumises à une incertitude directement liée à la technique de jaugeage. Mais plus généralement, lorsque les simulations concernent des débits de fortes crues, les valeurs fournies au niveau d'une station hydrométrique correspondent soit à un jaugeage forcément délicat de la pointe de crue, soit à une extrapolation de la courbe de tarage de la station. Il est commun de considérer que les débits disponibles pour des stations jaugées sont à +/- 10%, et que les extrapolations de débits de fortes crues sont à +/- 20% près. Attention à ne pas confondre ces incertitudes liées à la mesure avec l'intervalle de confiance relatif à l'ajustement statistique des débits permettant d'associer une valeur de débit à une période de retour donnée. On se reportera ici à l'*annexe 3 - données hydrologiques*

3.3.2.2- Les incertitudes liées à la représentativité de l'information

Quand bien même on ferait abstraction de l'incertitude de mesure, les données dont on recherche la valeur portent en elles-mêmes une incertitude liée à leur représentativité relative à ce pour quoi on souhaite les employer.

Ainsi, une valeur de débit de pointe qui ne correspond pas exactement à la hauteur maximale mesurée, une laisse de crue qui ne reflète pas véritablement le niveau atteint par les eaux au droit du lit actif, un profil en travers dont le positionnement est biais par rapport à l'écoulement, ou tombe exactement sur une singularité topographique mineure mais non-négligeable, jettent une ombre sur l'étude.

Les analyses conduites au niveau des annexes **3 - données hydrologiques**, et **2 - analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude** permettent de quantifier les valeurs probables de ces incertitudes.

3.3.2.3- Les incertitudes liées aux données reconstituées

Plusieurs situations exigent de la part de l'hydraulicien qu'il dispose d'une information spécifique pour effectuer un « forçage » de son calcul hydraulique par une loi hydraulique : seuil, déversoir, moulin, ouvrages de décharge, barrage de navigation, et plus généralement : section de contrôle, etc.

Quand bien même on disposerait de données mesurées à cet endroit en nombre suffisant pour caler leurs paramètres ajustables (coefficients de débit notamment), les lois hydrauliques à mettre en œuvre comprennent elles-mêmes une incertitude qui prend une grande importance lorsque la situation de projet est éloignée de la situation de référence.

L'analyse comparée de différents types de lois hydrauliques disponibles montre que les lois de déversoirs sont les seules qui comportent une sensibilité significative, et que cette sensibilité est en grande partie liée au type de loi choisie. Rien ne permet de préférer objectivement une loi à une autre, aussi la sensibilité a-t-elle été quantifiée par une fourchette fixe d'écart à l'amont immédiat du seuil.

A titre d'exemple, dans le cadre de la modélisation de seuils de biefs de navigation, selon le type de loi hydraulique choisi (Carlier, EDF-LNHE, USACE), en fonction de l'estimation des

³ Cf. Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques. CETE Méditerranée, juin 2001.

coefficients de débit et de noyage notamment, et en l'absence de contournement en lit majeur, la formule d'estimation d'une charge amont en fonction d'un débit franchissant une crête de seuil mince ou épais en régime noyé ou dénoyé induit une incertitude de +/- 15 cm.

3.3.2.4- Les incertitudes liées aux hypothèses de modélisation

Dans le cas où la situation étudiée (topologie hydraulique, conditions hydrologiques et hydrauliques, topographie) est compatible avec les hypothèses de validité des outils d'analyse mis en œuvre, il est prouvé que la sensibilité des calculs aux hypothèses « internes » de la modélisation numérique est quasiment nulle⁴. Ces incertitudes sont donc intégralement négligeables.

Les hypothèses « internes » testées sont :

- la valeur du coefficient de Boussinescq prise égale à 1, supposant une parfaite homogénéité de la répartition des vitesses dans un profil en travers ;
- la valeur du pas de planimétrage pour la description d'un profil en travers.

Par contre, le choix de l'espacement (et donc, du nombre total) de sections de calcul a une influence significative (plusieurs dizaines de centimètres en certains points) sur les résultats

3.3.2.5- Incertitudes spécifiques liées au régime transitoire

Au préalable, il convient de mentionner les difficultés liées au choix des hydrogrammes de référence (cf. *annexe 3 - données hydrologiques*) qui conditionnent les résultats d'une modélisation réalisée en régime transitoire, à savoir :

- que la construction des hydrogrammes de projet doit être réalisée en fonction de l'objectif recherché de la modélisation : une crue réelle exceptionnelle en débit de pointe peut s'avérer courante en volume. Cette construction doit permettre une interprétation satisfaisante en terme de fréquence de l'événement modélisé ;
- que cette construction doit aussi tenir compte du type de crue modélisée : répartition spatiale et concomitance des apports sur le bassin, onde de rupture de digue ou de barrage...

Le CETMEFa, par ailleurs, montré :

- d'une part combien la non-prise en compte du laminage de l'onde de crue pouvait fausser l'étalonnage des valeurs de coefficients de rugosité de lit majeur, de manière croissante depuis l'amont vers l'aval,
- et d'autre part que la construction de la courbe de tarage (débit en fonction du temps) nécessaire en condition limite aval d'une simulation en régime transitoire était très sensible à la position des jaugeages de référence dans l'hystérésis de crue (avant ou après l'instant du passage de la pointe de débit), dès que la pente est assez faible pour provoquer une hystérésis ample.

Ces influences combinées font peser une forte incertitude sur le calage de l'outil de simulations, c'est-à-dire qu'une fraction importante des paramètres ajustés est « fausse ». Ceci n'a pratiquement aucune incidence si les événements de projet sont du même ordre que les événements de calage (moins de 20% de différence de débit de pointe). Ainsi dans tous les autres cas, et si ni la topologie du site (par exemple influence de la marée sur la cote aval dans le cadre d'une modélisation en régime fluvial), ni les autres résultats recherchés (durée de submersion, volume...) l'exigent, il est déconseillé de recourir à une modélisation en régime transitoire en vue de déterminer les niveaux maximum atteints.

⁴ C'est-à-dire que l'explicitation des incertitudes pesant sur ces hypothèses internes n'occasionne qu'une variation infime (inférieure à 1 unité de coefficient de Strickler), et donc, non-significative, du paramètre usuel de calage.

Malgré tout, l'aspect dynamique de la crue est une donnée importante pour apprécier les objectifs de l'étude, la sensibilité de la courbe de tarage doit être évaluée :

- si elle est implantée à moins de 15 km de l'aval de la zone d'objectifs : en testant sa translation en altitude d'une valeur de +30 cm.

- si elle est implantée entre 15 et 30 km de l'aval de la zone d'objectifs, et si la pente moyenne de la rivière en crue est inférieure ou égale à 1/10.000 : en testant sa translation en altitude d'une valeur de +10 cm.

Il n'est pas inutile de rappeler ici qu'il est préférable (aux points de vue technique et économique) de choisir une modélisation en régime permanent du maximum de l'événement hydrologique plutôt qu'une modélisation en régime transitoire de l'ensemble de l'événement hydrologique dès lors que la longueur de cours d'eau à étudier est inférieure à 30 km pour des pentes inférieures à 1/10.000 ou à 15 km pour des pentes supérieures à 5/10.000, sauf dans le cas de crues éclairs ou dans le cas où la durée de submersion, la modification du laminage de l'onde de crue, la modification du volume écoulé ou encore les durées de submersion sont des données décisives pour le choix final du maître d'ouvrage.

Le prestataire peut s'affranchir de ces tests de sensibilité en construisant artificiellement une condition limite aval en prolongement de son modèle vers l'aval à pente identique sur une distance adaptée (15 à 30 km).

3.3.2.6- L'évolutivité des données significatives

La quasi-totalité des outils d'analyse hydraulique supposent que les caractéristiques géométriques des lits mineur et majeur sont invariables durant l'événement hydrologique simulé. Ceci est bien sûr vérifié lorsque l'évolution géométrique du lit a lieu à des échelles de temps très supérieures (années, décennies, siècles) à celles des écoulements (secondes, minutes, heures, voire jours). Mais dans plusieurs situations, il faut tenir compte d'évolutions du lit susceptibles de perturber les écoulements, ou du moins, leur simulation.

Un premier cas de figure concerne la simulation d'événements si anciens qu'il y a fort à craindre que le lit mineur, le lit majeur et les conditions hydrauliques résultantes aient significativement changé, rendant caduques les laisses de crues notamment. A moins de disposer des informations historiques correspondantes, et de simuler l'ensemble de la configuration hydrologie – hydraulique – topographie ancienne, le prestataire est obligé de se limiter à une étude du détarage de la ou des stations hydrométriques disponibles, permettant d'associer aux laisses de crues anciennes une situation hydrologique actualisée en fonction de l'état actuel du lit. Il s'agit toutefois d'une étude hydrologique en soi, qui doit faire l'objet de prescriptions spécifiques telles que décrites dans l'annexe 3 – données hydrologiques, et de laquelle le prestataire peut conclure quant à la fourchette d'incertitudes pesant sur les données résultantes.

Un deuxième cas de figure concerne les fluctuations rapides des fonds bathymétriques, voire du lit majeur, pendant l'événement hydrologique. Il peut s'agir d'un transport solide intense en lit mineur (la Garonne à Bordeaux pendant les marées, la Loire pendant les crues, etc), d'une tendance au dépôt de matériaux en lit majeur (la Meuse) ou encore d'une destruction d'obstacle (remblai routier, ferroviaire, etc) à l'écoulement en lit majeur. De telles occurrences devraient avoir été identifiées dans les étapes d'analyse des données, et les valeurs de fluctuations potentielles, quantifiées (et donc, utilisables dans les tests de sensibilité). Si la quantification de tels phénomènes clairement identifiés n'a pu être possible, du fait d'un manque de données de comparaison notamment, le prestataire pourra s'appuyer sur les valeurs connues suivantes pour proposer des valeurs relatives à sa propre situation d'étude :

- le Loir peut voir son fond fluctuer de +/- 50 cm pendant une forte crue ;

- la Loire peut voir son fond fluctuer de +/- 100 cm, voire 200 cm dans les zones d'écoulement rapide ;

- la Meuse peut déposer jusqu'à 50 cm dans les points bas de son lit majeur à la décrue d'une forte crue.

Il faut toutefois noter que si le prestataire dispose d'événements hydrologiques de calage suffisamment intenses pour être le siège de mobilité significative des fonds, son calage des paramètres ajustables du modèle sur ces événements intègre de facto l'existence de cette mobilité. Aussi, les tests de sensibilité à une mobilité quantifiée au jugé devrait être réservée aux études pour lesquelles les événements hydrologiques de calage sont nettement moins intenses que les événements hydrologiques de projet (débit de calage inférieur de plus de 20% au débit de projet).

Enfin, on se souviendra, qu'au delà de la problématique liée au caractère évolutif des données significatives pour la réalisation d'une modélisation hydraulique, la compréhension des phénomènes constatés et la détermination de leur évolution dans le temps sont des compléments souvent indispensables, en particulier lorsque l'étude répond à un besoin de dimensionnement d'ouvrages ; les approches hydrogéomorphologique et courantogique (modélisation bidimensionnelle) permettent d'y répondre.

3.3.3. Description des tests de sensibilité

Les sources d'incertitudes sont si nombreuses et si variées qu'il serait vain et contre-productif de tenter de décrire les tests de sensibilité les concernant, au risque d'en oublier certains qui n'apparaîtraient qu'au fur et à mesure de l'analyse des données disponibles par le prestataire.

Il s'agit plutôt ici de décrire les tests de sensibilité tels que le prestataire devra les concevoir durant son étude. Le maître d'ouvrage veillera à expliciter dans son cahier des charges les attentes méthodologiques qu'il souhaite reprendre du présent paragraphe, et bien sûr, le temps ou la fraction d'étude qu'il souhaite voir consacré à ces tests de sensibilité.

Au croisement de cette trame méthodologique souhaitée et de la consistance prévue au contrat, le prestataire et le maître d'ouvrage pourront convenir, en temps utile, des tests de sensibilité auxquels il sera effectivement procédé au vu de la révision des objectifs de l'étude d'une part, et de l'analyse des données disponibles et des contraintes hydrauliques d'autre part.

Il suffit de savoir qu'en général, un test de sensibilité correspond à la reprise d'un calcul en modifiant les conditions aux limites ou les données géométriques générales, ce qui ne prend que quelques heures supplémentaires par série de tests portant sur un type de données.

Il faut distinguer les tests de sensibilité portant sur les valeurs imposées au modèle, des tests de sensibilité portant sur les paramètres de calage du modèle.

3.3.3.1- Etape n°1a : les tests de sensibilité portant sur les valeurs imposées

Dans toute modélisation, et par extension, dans tout calcul hydraulique, les conditions aux limites sont des données intangibles à partir desquelles se déduisent toutes les autres quantités, aux paramètres de réglage près. Aussi, toute erreur portant sur ces conditions aux limites s'impose sur toute une zone du calcul. De même, lorsqu'une loi hydraulique est utilisée pour restituer le fonctionnement d'un ouvrage de régulation de niveaux ou de débits, le calcul subit un forçage direct et restituera nécessairement les valeurs imposées, qu'elles soient justes ou fausses.

Si l'erreur porte sur la valeur du débit, toutes choses étant égales par ailleurs, l'étalonnage des paramètres de réglage tendra à corriger cette erreur sur tout le linéaire étudié et concerné par cette erreur de valeur de débit. Les valeurs ainsi étalonnées pourront dévier significativement par rapport aux valeurs usuelles ou attendues, et alerter le technicien sur une probable erreur de valeur de débit. Il est donc raisonnable de considérer que cette erreur devrait être décelée par le technicien au cours de son calcul, ou, en dernière extrémité, par le technicien pressé de justifier ses valeurs aberrantes d'étalonnage lors de la présentation de ses résultats (cf. §3.5).

Par contre, si l'erreur porte sur la valeur d'une altitude à la limite aval du modèle, et si elle demeure dans une gamme raisonnable (inférieure à 50 cm environ), c'est-à-dire qu'elle correspond à une mésestimation « normale » plutôt qu'à une valeur aberrante, rien ne permettra de déceler l'erreur comme telle : les remous d'abaissement ou d'exhaussement résultants ne seront pas significatifs. Ce cas-là mérite tout particulièrement une étude de sensibilité.

L'analyse des données hydrauliques a normalement fourni au prestataire les informations nécessaires pour jauger la qualité relative de sa condition à la limite aval. S'il n'a pas directement quantifié la fourchette des valeurs équiprobables prises par cette condition à la limite aval, faute d'information suffisante ou faute de demande de cela dans le cahier des charges, l'étude de sensibilité doit être menée, sur des valeurs génériques.

Nous proposons des valeurs de base qui peuvent être amendées au cas par cas en fonction, par exemple, d'expériences de calculs antérieurs dans la même zone ayant fourni des idées plus « régionalisées » des amplitudes des incertitudes.

Nous recommandons de tester deux situations alternatives à la situation Z_{aval} sur laquelle est fondé le calcul de référence : l'une avec $Z_{\text{aval}}+20\text{cm}$, l'autre avec $Z_{\text{aval}}-20\text{cm}$.

De même, lorsque la détermination de la loi de fonctionnement hydraulique d'un ouvrage a laissé entrevoir une incertitude quant aux paramètres décisifs (coefficient de débit, par exemple), le prestataire devra établir la fourchette des valeurs de niveau d'eau correspondant à la fourchette de valeurs équiprobables de ces paramètres décisifs.

A partir de cotes d'eau connues, le débit estimé par les lois de seuil varie dans une fourchette d'amplitude de 30% centrée sur la valeur moyenne. L'emploi d'au moins deux formules d'estimation différentes permet de préciser la fourchette du test de sensibilité. Dans le cas où les deux formules choisies donnent le même couple débit – niveau amont, un test de sensibilité sur $Z_{\text{amont}}(0,85.Q)$ et $Z_{\text{amont}}(1,15.Q)$ est recommandé.

A titre d'exemple, dans le cadre de la modélisation de seuils de biefs de navigation, et en l'absence de contournement de l'écoulement en lit majeur, lorsque le débit est connu et que la loi hydraulique sert à déterminer le niveau d'eau amont en régime dénoyé, nous recommandons, de tester deux situations alternatives à la situation $Z_{\text{amont}}(Q)$ sur laquelle est fondé le calcul de référence : l'une avec $Z_{\text{amont}}(Q)+15\text{cm}$, l'autre avec $Z_{\text{amont}}(Q)-15\text{cm}$.

Enfin, lorsque la loi hydraulique a pu être étalonnée avec des valeurs fiables de débit et de niveaux d'eau, il est inutile de tester la sensibilité de cette loi.

3.3.3.2- Etape n°1b : les tests de sensibilité portant sur les paramètres de calage

La problématique des incertitudes pesant sur les résultats d'une étude hydraulique comprend deux étapes distinctes :

- d'une part (étape n°1), le modélisateur, face à un jeu de données dont il est tributaire, fait un choix de valeurs du paramètre intégrateur K supposé minimiser l'écart entre son outil de calcul et la réalité ;

- d'autre part (étape n°2), disposant de son outil de calcul supposé étalonné, il procède à une extrapolation qui comporte en soi une incertitude que le modélisateur ne peut maîtriser, et qui dépend des conditions générales de l'extrapolation.

On peut donc considérer que le modélisateur, fort de sa connaissance des meilleurs choix possibles de valeurs de K par rapport à son jeu de données, peut présumer de la validité relative de son choix, en la traduisant sous forme d'une fourchette de valeurs équivalentes de K (étape n°1). Puis, il peut prédire l'incertitude pesant sur son résultat final à partir du faisceau de profils en long de ligne d'eau obtenu à partir de la fourchette de valeurs équivalentes de K (étape n°2).

Un calage habituel de modèle hydraulique correspond à une minimisation plus ou moins pragmatique des écarts entre les valeurs issues du calcul (niveaux d'eau calculés) et les

valeurs de référence (laises de crues). En fait, ces valeurs de référence ne sont généralement pas des valeurs intangibles, mais elles comprennent elles-mêmes une certaine incertitude. Si bien qu'on peut considérer que, pour un jeu de données topographiques et hydrauliques, il y a en fait plusieurs calages équiprobables.

Dès lors qu'on ne considère plus une donnée de calage comme intangible, mais plutôt, comme intervalle, la minimisation comme stratégie de calage ne paraît plus pertinente. Il faut plutôt viser l'inscription de l'ensemble de la ligne d'eau calculée dans tous les intervalles des données de calage.

Or, l'inscription des lignes d'eau dans les intervalles des données de calage peut se faire par valeurs inférieures, c'est-à-dire que la ligne d'eau calculée correspondante s'inscrit dans tous les intervalles de référence, en passant par au moins une borne inférieure de l'un de ces intervalles. Mais elle peut aussi se faire par valeurs supérieures, c'est-à-dire que la ligne d'eau calculée correspondante s'inscrit dans tous les intervalles de référence, en passant par au moins une borne supérieure de l'un de ces intervalles.

Les jeux de valeurs des paramètres de calage correspondant d'une part au calage « minorant » et d'autre part au calage « majorant » déterminent l'enveloppe de la ligne d'eau réelle pour l'événement de calage.

3.3.3.3- Etape n°2 : analyser le faisceau des lignes d'eau

Indépendamment de tout autre calcul de sensibilité portant sur le calage, traité au paragraphe suivant, le calcul de sensibilité sur la fourchette des conditions à la limite aval (dans le cas d'une modélisation en régime fluvial) fournit une enveloppe de valeurs (et donc, d'écarts par rapport à la valeur de référence émanant du calcul avant sensibilité) minorant et majorant la valeur « vraie » du niveau d'eau, et ce, sur toute une zone en amont de la condition à la limite dont on teste la sensibilité.

Les deux informations (sensibilité altimétrique en fonction de l'éloignement de la condition à la limite aval) sont cruciales pour juger de l'imprécision du calcul de référence. La première indique l'amplitude maximale de l'imprécision, la deuxième indique, par défaut, la zone (en amont de la zone sensible au test) qui ne subit plus l'influence de la condition à la limite aval. Si les recommandations du choix des limites de la zone de calcul (*annexe 2 – analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude*) ont été suivies, le lieu de la limite aval a été choisi suffisamment en aval de la zone d'objectifs de résultats pour que la zone sensible au test ne la recoupe pas : en clair, le test de sensibilité effectué sur la contrainte aval (dans le cas d'une modélisation en régime fluvial) n'a alors pas d'impact sur la ligne d'eau calculée au droit du secteur d'études. Si tel n'est pas le cas, le test de sensibilité fournit, dans la zone d'objectifs, l'amplitude des imprécisions altimétriques, que le prestataire devra indiquer à côté de chaque information altimétrique issue de son calcul dans cette zone.

Exemple : au droit de la zone d'objectif, le test de sensibilité montre un écart compris entre -6 cm et +4 cm. Il conviendra, dans la présentation finale des résultats de l'étude à cet endroit, d'indiquer, par exemple : « côte de référence pour le déclenchement de l'ouverture du vannage : 23,45^[23,39-23,49] m NGF IGN69 ».

Il est important de noter que le test de sensibilité n'est pas un test de validation ou de rejet du modèle, à moins de compromettre gravement l'utilité des résultats dans la zone d'objectifs. En particulier, lorsque l'étude vise à déterminer des impacts d'aménagements en vallée inondable, il suffit de savoir qu'une imprécision altimétrique raisonnable sur la ligne d'eau de référence n'invalide quasiment pas l'impact calculé par différence entre la ligne d'eau de projet et la ligne d'eau de référence, l'imprécision étant quasiment égale pour les deux lignes d'eau, et disparaissant de la quantification de l'impact lors de la soustraction.

3.3.4. Spécifier les tests de sensibilité

La spécification précise des tests de sensibilité dépend directement des incertitudes du modélisateur face aux données qu'il manipule. Il est donc très difficile d'envisager cette spécification au stade de la rédaction d'un cahier des charges. Pour autant, si ces tests ne sont pas prévus dans le cahier des charges, le prestataire est en droit de refuser de les faire en surplus de sa prestation, même s'il en réalise quelques-uns, simples, de manière informelle, pour avoir une idée de cette sensibilité.

Le degré de formalisme des tests de sensibilité, souhaité par le commanditaire, peut par contre être précisé, ainsi que la méthode. Nous recommandons naturellement de reprendre la méthode proposée au § 3.3.3., mais il est possible que, pour une simple étude d'impact dans laquelle on est presque assuré de voir les erreurs systématiques commises au niveau des données de base s'annuler lors de la soustraction de l'état aménagé de l'état de référence, le commanditaire se contente d'une analyse sur les seules valeurs imposées.

A cette commande spécifique doit correspondre un budget spécifique, seule garantie contractuelle de ce que les tests de sensibilité laissés à l'appréciation du modélisateur dans le cadre formel précisé par le commanditaire seront réalisés sérieusement sans empiéter sur les autres calculs de l'étude.

Une ligne doit donc être prévue dans le bordereau des prix. Une petite étude de sensibilité, portant uniquement sur les valeurs imposées, devrait coûter entre 500€ et 1500€. Une étude de sensibilité normale, portant à la fois sur les valeurs imposées et sur les paramètres de calage, devrait coûter entre 1500€ et 4000€ selon le nombre d'informations de calage. Si plusieurs événements font référence pour l'étude, ou si le prestataire doit tenir compte d'hypothèses invérifiables portant sur les ouvrages de régulation notamment, l'étude de sensibilité peut coûter entre 4000€ et 6000€ (mais dans un tel cas, l'étude complète sera également plus coûteuse en proportion).

3.4. Archivage, propriété et droits d'usages des produits de l'étude

La réception de l'étude marque la fin des engagements liant le prestataire au maître d'ouvrage. Très souvent cependant, faute d'une formalisation correcte des prescriptions portant sur les produits de l'étude, le maître d'ouvrage continue de solliciter le prestataire pendant plusieurs semaines après le rendu définitif du rapport, pour obtenir des éléments sous divers formats qui l'intéressent.

3.4.1. *Archivage des produits de l'étude*

Bien que l'informatique soit omniprésente dans la production des résultats de calculs, les rapports et autres présentations, le moyen d'archivage le plus sûr est le format papier.

3.4.1.1. Le rapport

Un exemplaire reproductible du rapport doit toujours être livré au maître d'ouvrage. Il s'agit d'une maquette du rapport non-reliée, qu'il suffit de fournir à un service de reprographie pour effectuer une copie. Cet exemplaire devra être conservé précieusement par le maître d'ouvrage qui gèrera les tirages de nouveaux exemplaires sans jamais disperser son exemplaire reproductible. Le maître d'ouvrage devrait également conserver pour lui-même un exemplaire relié et paginé (le suivi des pages sera vérifié) qu'il ne donnera jamais à quiconque, et qu'il prendra soin de « marquer », par exemple de la façon suivante : « exemplaire unique à conserver ».

Il arrive que le commanditaire souhaite disposer des fichiers informatiques des rapports livrés, soit pour faciliter l'édition de futurs rapports, soit pour faciliter la diffusion de ces rapports par les moyens numériques, soit pour faciliter la copie d'éléments du rapport pour nourrir d'autres productions du commanditaire. Toutes ces intentions doivent tenir compte du fait que le rapport est protégé par le droit de la propriété intellectuelle (cf. paragraphes suivants pour plus de précisions), qui encadre strictement les deux premiers usages, et prohibe a priori le troisième, à moins que des clauses spécifiques n'aient été

prévues dès le stade de la commande publique, ou que des avenants soient conclus en cours d'étude à ce sujet.

Le commanditaire doit savoir que les logiciels de bureautique sont très évolutifs, sans garantie de lecture conforme de fichiers constitués pour des versions antérieures à la dernière version à jour. On peut même considérer comme illégale une clause qui consisterait à imposer la fourniture de résultats dans un format de logiciel dit « propriétaire » qui reviendrait à donner aux bureaux d'études détenant le « bon » logiciel un avantage susceptible de perturber la libre concurrence, la bureautique n'étant pas le point essentiel de la prestation. Ceci n'est généralement pas problématique, mais la prudence nous conduit à recommander que les clauses décrivant les formats de livraison des rapports renvoient à des standards de type OpenDocument (pour plus de détails, consulter par exemple le site Internet : www.oasis-open.org/).

3.4.1.2. Les fichiers de calcul

De même, si les fichiers d'entrée et de commande des logiciels utilisés sont réclamés par le maître d'ouvrage, la livraison d'une impression de ces fichiers est indispensable pour garantir la conservation pérenne de ces données.

Bien sûr, la fourniture des fichiers au format informatique est la seule qui permette une exploitation directe des outils de calcul utilisés dans l'étude et la disponibilité d'un rapport au format informatique rend possible une portabilité de l'information d'un logiciel à l'autre.

Aucun support informatique ne garantit la pérennité des données. Même les CD-ROM sont faillibles : la durée de vie des données qui y sont gravées est comprise entre 1 et 10 ans en fonction de la qualité du CD-ROM. Le maître d'ouvrage devra donc régulièrement (tous les 1 à 10 ans) recopier ces informations du support antérieur vers un support neuf.

De même, les logiciels qui peuvent lire les données informatiques sont eux-mêmes évolutifs. Des données informatiques sur des supports non-dégradés peuvent devenir illisibles faute de logiciel capable de les lire. En conséquence :

- soit le maître d'ouvrage demande que les données informatiques soient livrées dans un format ASCII de base avec des séparateurs simples (virgule, espace, tabulation, point-virgule, etc) ;

- soit le maître d'ouvrage s'astreint, à chaque changement de version de ses logiciels capables de lire les données, à enregistrer une version des fichiers livrés dans cette nouvelle version. Cela n'est cependant réaliste que dans l'hypothèse d'une démarche de type Management de la Qualité qui assure au maître d'ouvrage que l'astreinte en question sera réactivée assez régulièrement indépendamment des turpitudes liées aux rotations des personnels exerçant la fonction concernée.

Dans tous les cas, le maître d'ouvrage exigera du prestataire, pour toute livraison de données informatiques, la fourniture d'une notice explicative de l'organisation, du contenu (origine, date, type, source, etc) et du format (en lignes ou en colonnes, noms des variables, unités, etc) des données contenues dans chaque fichier.

3.4.2. Propriété et droits d'usage des données produites à l'occasion de l'étude

Pour une information exhaustive sur ce champ, au jour de la publication du présent guide, on se reportera à Echanger des données localisées. Guide juridique. Cabinet Bensoussan. DRAST, CERTU, 2005.

3.4.2.1 Définition des données publiques

La pierre angulaire de la propriété et des droits d'usage des données produites pendant l'étude est la circulaire du 14 février 1994 (NOR : PRMG9400081C) relative à la diffusion des données publiques. Une « donnée » est une information collectée ou produite sur tout support, informatique ou non. Une donnée est considérée comme « publique » dès lors qu'elle est produite ou collectée par un organisme public, dans le cadre de ses missions de service public, sur ses moyens propres (en régie) ou sur fonds publics (commande publique passée à un prestataire qui lui est extérieur).

Lorsqu'une administration (ou une collectivité publique territoriale) passe à un géomètre-expert commande de la réalisation de levés topographiques sur fonds publics, les fruits de cette commande (points nivelés, profils en travers, etc) sont une donnée brute acquise par l'administration : il s'agit d'une « donnée publique ». Il en va de même pour des données hydrométriques ou hydrauliques ainsi acquises.

L'administration (ou la collectivité publique territoriale) dispose dès lors des droits de diffusion et d'usage de cette donnée sans que le producteur de la donnée (le géomètre-expert, l'hydrométrologue) puisse faire valoir aucun droit de regard sur l'usage qui est fait de cette donnée.

Par contre, à moins d'avoir prévu, au moment de la contractualisation de la commande de production de la donnée, une clause d'exclusivité, rien n'empêche le producteur de la donnée de la fournir (gracieusement ou contre rémunération) à un organisme autre que celui du maître d'ouvrage.

On soulignera aussi que la convention d'Aarhus (25 juin 1998, approuvée par la France par la loi n°2002-285 du 28 février 2002) prévoit un accès renforcé à l'information sur l'environnement, imposant aux administrations une obligation de catalogage et de mise en ligne des données gratuitement. Ces dispositions sont intégrées dans le code de l'environnement (article L.124-1).

3.4.2.2 Protection des données publiques

Les données publiques pour peu qu'ils s'agissent de données « enrichies » (données qui représentent des informations comportant une valeur ajoutée soit par une appréciation, soit par une interprétation et représentent l'empreinte de la personnalité de leur auteur), bénéficient d'une double protection :

- la protection par le droit « sui generis » qui protège les investissements réalisés pour l'acquisition et la collecte des données ;

- la protection par le droit d'auteur (oeuvre de l'esprit). Ainsi, même la construction d'une base de données publiques, en tant que représentative de l'empreinte intellectuelle de son auteur (choix non trivial d'organisation des données, structure de la base, mise en page...) est protégée par le droit d'auteur. A plus forte raison, cette protection s'applique pour des données produites à l'issue d'une étude hydraulique.

3.4.3. *Propriété et droits d'usage des œuvres produites*

Contrairement à une idée généralement répandue, le maître d'ouvrage, payeur de l'étude, ne se rend pas par ce seul fait complètement propriétaire de tous les produits de l'étude. S'agissant de prestations intellectuelles, les produits de l'étude répondent à des règles très précises de propriété et de droits d'usage.

3.4.3.1 Définition des œuvres

Il est par exemple intéressant de savoir que les offres remises par les candidats au maître d'ouvrage pendant la consultation sont la propriété intellectuelle de leurs auteurs. Le maître d'ouvrage ne peut absolument pas copier tout ou partie de ces offres sans violer le droit d'auteur. En particulier, solliciter une offre d'un candidat pour en faire le cahier

des charges d'une consultation élargie, ou encore, se servir d'une portion d'argumentaire extraite in extenso de l'offre d'un candidat comme support d'une consultation complémentaire des autres candidats, sont une violation du droit d'auteur du candidat. C'est également la raison pour laquelle il n'est pas possible de reproduire dans le présent guide des portions d'offres sans l'assentiment exprès de leurs auteurs.

Cela est dû au fait qu'une offre de bureau d'études hydrauliques est souvent une « œuvre » au sens du droit de la propriété intellectuelle. En effet, ce droit prévoit qu'une œuvre est une idée originale mise en forme de sorte qu'on puisse percevoir l'empreinte intellectuelle de son auteur. Aussi, dès lors que l'auteur de l'offre met en œuvre une démarche de conception de solution en réponse à un cahier des charges qui lui en laisse la liberté, son offre peut être considérée comme une œuvre intellectuelle. Pour qui demeurerait sceptique sur ce point, il n'est qu'à considérer la variété des offres proposées par les bureaux d'études en réponse à un cahier des charges faiblement détaillé, qui pose justement problème en termes d'analyse équitable des offres !

Par contre, si l'offre correspond à l'expression simple d'une solution standard issue de l'état de l'art en réponse à un cahier des charges dans lequel la conception technique de la solution recherchée est suffisamment avancée pour que les candidats en fassent l'économie, l'offre ne peut plus être considérée comme une œuvre intellectuelle protégée par le droit d'auteur. Elle relève simplement du droit de la propriété industrielle, dans l'éventualité où des méthodes et outils brevetés seraient liés à cette offre.

Ainsi, le rapport de l'étude peut être considéré comme une œuvre pour peu qu'il se présente sous une forme non-standardisée. Mais, en allant plus loin, on peut considérer que les idées de combinaisons de solutions issues de l'état de l'art pour apporter une solution originale à un problème hydraulique sont-elles aussi protégées par le droit de propriété intellectuelle, quand bien même cette solution ne serait pas réalisée dans les faits.

3.4.3.2 Protection juridique des œuvres

Le droit de la propriété intellectuelle reconnaît quatre types de droits à l'auteur d'une œuvre : les deux qui nous intéressent au premier titre sont le droit patrimonial (qui permet à l'auteur de faire fructifier son œuvre sur le plan économique) et le droit moral (qui donne à l'auteur un droit de vie et de mort sur son œuvre, et lui permet de veiller au respect de son intégrité), auxquels s'ajoutent de manière plus anecdotique en ce qui nous concerne un droit de traduction et un droit d'adaptation.

Ce droit moral est perpétuel, imprescriptible et inaliénable. Il protège toute œuvre intellectuelle à laquelle le juge saurait reconnaître le caractère de formalisation et d'originalité (ce dernier point s'appréciant, pour ce qui nous concerne, à l'aune de l'état de l'art). C'est un droit très favorable à l'auteur, qui n'a pas à prouver ni la faute commise ni le préjudice subi, mais n'a qu'à constater la violation de son droit pour obtenir gain de cause. La jurisprudence est par ailleurs claire et constante : le doute bénéficie toujours à l'auteur. C'est pourquoi la clause de cession des droits de l'auteur des œuvres produites pendant l'étude hydraulique doit être exhaustive, claire et précise.

Elle doit préciser la durée, l'espace, les langues et les supports pour lesquels s'effectuera la cession.

Une clause contractuelle doit prévoir la cession des droits de reproduction du rapport et autres produits de l'étude.

Si le maître d'ouvrage récupère les diaporamas confectionnés par le bureau d'études hydrauliques (et qui sont donc des œuvres protégées), pour les projeter ultérieurement à l'occasion de présentations publiques ou en comité restreint après le terme de l'étude, il doit avoir prévu une clause dans ce sens par lequel l'auteur du diaporama cède au maître d'ouvrage un droit de représentation.

De même, si les produits de l'étude doivent être utilisés par le maître d'ouvrage ou l'un de ses futurs prestataires pour élaborer des outils de communication ou de présentation, par exemple, le contrat de l'étude hydraulique devra également prévoir une clause par laquelle le bureau d'études hydrauliques cède ses droits d'adaptation pour les usages envisagés. Mais le diaporama et autres supports de communication ainsi confectionnés deviennent alors des œuvres dérivées à part entière, protégées par le droit de leur auteur.

3.4.3.3 Des bonnes manières en matière d'œuvres

Si le droit de la propriété intellectuelle reconnaît des droits très forts à l'auteur d'une œuvre, les juges ne se départissent pas d'un certain pragmatisme dans l'appréciation de ce droit, notamment, du droit à l'intégrité de l'œuvre. Aussi, lorsque le but du maître d'ouvrage est d'obtenir une amélioration du fonctionnement d'un aménagement public, d'un projet d'utilité publique (au sens large de projet qui rendra service à la collectivité), le droit moral de l'auteur à l'intégrité de son œuvre ne peut, lorsqu'il s'agit d'œuvre de type étude hydraulique ou aménagement de cours d'eau par exemple, lui permettre de prétendre à l'intangibilité absolue de son œuvre.

Généralement, l'auteur d'une œuvre du type qui nous intéresse dans ce guide n'a pas tendance à s'opposer à la diffusion de son œuvre ou à son usage par le maître d'ouvrage. S'il a exposé une solution technique innovante qu'il ne souhaite pas voir ébruitée pour ne pas dévoiler ses atouts à ses concurrents, il peut breveter son idée, puis se féliciter de la publicité que peut lui faire la diffusion du rapport qui présente la mise en œuvre de sa solution technique innovante. D'ailleurs, généralement, l'auteur devra convenir avec le maître d'ouvrage des modalités d'utilisation de cette œuvre qui ne nuisent pas... à la confidentialité souhaitée par le maître d'ouvrage (cf. circulaire du 14 février 1996).

L'auteur peut simplement réagir vivement si le maître d'ouvrage viole son droit d'auteur en négligeant de solliciter son accord préalable. Nous ne saurions donc trop recommander aux maîtres d'ouvrage de veiller à systématiquement rechercher l'agrément de l'auteur d'une œuvre dont ils souhaitent assurer la représentation, la diffusion ou la modification.

Un cas moins bon enfant que les autres porte sur la situation suivante. Faute d'avoir parfaitement détaillé tous les objectifs fonctionnels donnés à une première étude hydraulique, pour laquelle une conception originale et un certain nombre de «dires d'experts» ont été formulés, le maître d'ouvrage est conduit à une deuxième consultation portant sur les mêmes objectifs que ceux énoncés pour la précédente étude hydraulique, augmentés des objectifs additionnels alors négligés. Pour cette seconde consultation, il paraît naturel de mettre à disposition les résultats de la première étude, mais l'auteur de ces résultats pourrait s'émouvoir de ce que son travail intellectuel innovant soit pillé sans vergogne par le nouveau prestataire. Par ailleurs, le droit d'auteur de ce premier prestataire n'est pas suffisant pour justifier que le second marché lui soit automatiquement attribué (cf. Cahier des Clauses Administratives Générales - prestations intellectuelles).

Il est recommandé de prévoir dès la première consultation une clause par laquelle l'auteur des œuvres de cette étude cède ses droits en vue de l'éventuelle reprise de l'étude par un autre auteur. Si cette clause n'a pas été prévue et qu'une deuxième étude non-prévue initialement se profile, il conviendrait de prévoir dans le cahier des charges de la seconde consultation que le prestataire retenu prendra l'attache de l'auteur de la première étude et recueillera son avis.

3.4.3.4 Cahier des Clauses Administratives Générales - prestations intellectuelles (C.C.A.G. - P.I.)

Les études hydrauliques relèvent des marchés publics de « service », et plus particulièrement des marchés publics de « prestations intellectuelles ». Aussi, le Cahier des Clauses Administratives Particulières (C.C.A.P.) de l'étude hydraulique fera référence au C.C.A.G. - P.I. et mentionnera l'option retenue par le maître d'ouvrage, en terme de gestion de la propriété intellectuelle :

- option A : les produits de l'étude sont la propriété exclusive de leur auteur (le bureau d'études) et le maître d'ouvrage ne dispose que d'un simple droit d'usage ;
- option B : le maître d'ouvrage acquiert une co-propriété des produits de l'étude ;
- option C : le maître d'ouvrage acquiert la totalité des droits d'auteur dont se libère le bureau d'études.

Si cette dernière option est choisie, le maître d'ouvrage se référera aussi au Code de la Propriété Intellectuelle.

3.4.4. Cas particulier des logiciels de modélisation numérique

D'ordinaire, sauf mention contraire dans le cahier des clauses techniques particulières, le maître d'ouvrage ne dispose pas des logiciels de modélisation hydraulique numérique. Au cas où le maître d'ouvrage souhaite procéder lui-même à d'autres simulations en complément de celles effectuées par le bureau d'études⁵, il doit acheter une licence d'utilisation du logiciel.

Il n'est pas raisonnable d'exiger, au moment de la consultation, des conditions spécifiques de mise à disposition du logiciel, qui pourraient entrer en conflit avec les conditions commerciales de diffusion de l'outil développé par le prestataire et qui est son entière propriété. En particulier, exiger les codes sources est a priori une clause exorbitante. Il est préférable de signaler dans le cahier des charges que le maître d'ouvrage entend acquérir, à l'issue ou en cours de prestation, le logiciel mis en œuvre par le prestataire, en précisant clairement les usages futurs qu'il compte en faire (combien de postes équipés, quel type de mises en œuvre il compte faire et en particulier, s'il compte l'utiliser dans le champ concurrentiel des appels d'offres d'études hydrauliques, etc), à charge pour chaque candidat de proposer un contrat de licence en conséquence, avec les conditions tarifaires y afférentes, au stade de l'offre.

Une licence totale est souvent assez chère (à partir de 7000 euros pour un logiciel filaire et au-delà de 25000 euros pour un logiciel bidimensionnel (prix 2003)), sauf dans le cas particulier des logiciels diffusés gratuitement (souvent par les services hydrauliques américains). Il est toutefois possible de n'acheter qu'une licence « dédiée », bridée pour ne faire tourner que le jeu de fichiers liés à l'étude réalisée, moyennant un abattement de 40 à 70% du prix de la licence totale (à négocier avec le prestataire).

Il ne faut cependant pas croire que l'acquisition financière de la licence soit le principal obstacle. Un logiciel de modélisation est un outil spécialisé destiné à l'usage des hydrauliciens, éventuellement prévu pour une diffusion commerciale. Il nécessite souvent une prise en main méthodique et éclairée par une documentation technique appropriée, voire, si possible, une formation spécifique. Si le maître d'ouvrage envisage l'acquisition d'une licence du logiciel, il lui est conseillé de prévoir une formation des utilisateurs chez le maître d'ouvrage ou, le cas échéant, la fourniture d'une interface utilisateur conviviale si le logiciel n'en comporte pas en série. Ce dernier point peut devenir un critère de choix entre plusieurs offres.

⁵ Cette perspective nous paraît cependant délicate, tant il est déjà difficile à un chargé d'études d'utiliser un modèle, pour lequel il n'a contribué ni à sa construction, ni à son calage.

Annexe 1

Formuler les objectifs de l'étude

Table des matières

1. Sérier les thématiques d'aménagement.....	2
1.1. Thématiques strictement hydrauliques.....	2
1.2. Thématiques potamologiques.....	3
1. Rationaliser les objectifs.....	3
2.1. Fixer des objectifs clairs.....	3
2.2. Relativiser l'antagonisme des demandes.....	4
2.3. Fixer des critères objectifs de satisfaction.....	4
2.4. Les exigences de précision.....	5

1. Sérier les thématiques d'aménagement

Les cours d'eau sont des milieux naturels intégrateurs de dynamiques naturelles et de facteurs anthropiques selon des interactions complexes qui en font la richesse. Cette ressource multifonctionnelle agrège une multitude d'usages possibles, qui tendent chacun à perturber les équilibres du milieu, et interagissent donc à leur tour en maintenant un équilibre dynamique.

La spécialisation relative des acteurs techniques et sociaux qui portent ces usages ne doit pas conduire à une compartimentation de la réflexion d'aménagement d'un cours d'eau qui risquerait de déséquilibrer les usages au détriment de fonctions malencontreusement oubliées.

En sériant les thématiques d'aménagement, on dispose d'une grille de lecture du cours d'eau pour identifier toutes les fonctions à intégrer dans la réflexion.

1.1. Thématiques strictement hydrauliques

Un premier niveau de lecture concerne les thématiques strictement hydrauliques, pour lesquelles la détermination de paramètres hydrauliques suffit à faire les choix adéquats.

Les variables hydrauliques déterminantes sont le débit, la cote de l'eau et la vitesse du courant. Elles peuvent ensuite être déclinées en force tractrice (problèmes d'érosion et de transport solide), pertes de charge, etc.

Sont ainsi concernés :

- le diagnostic de rivière (analyse / expertise des causes de dysfonctionnements constatés ou devinés, état initial pour asseoir / concevoir une politique d'aménagement du territoire fluvial, ...)
- la détermination de zones soumises à l'aléa d'inondation (atlas de zones inondables et pédagogie du risque d'inondation, planification des secours lors d'inondations, hiérarchisation des actions de lutte contre les inondations, ...)
- la détermination de l'intensité des aléas d'inondation (aide à la décision de mesures de protection des biens et des personnes, en termes d'aménagements, de documents réglementaires, de planification du territoire, ...)
- le dimensionnement de dispositifs de lutte contre les inondations (stations de pompage, digues de protection, dispositifs temporaires de protection, bras de délestage, ...)
- la prévision et l'annonce de crue (planification d'un réseau d'instrumentation des cours d'eau, d'intégration des données pour prévoir la dynamique de crue et les submersions,...)
- la détermination de l'influence d'un aménagement en lit mineur ou en lit majeur de vallée inondable (remblai d'infrastructures majeures, ouvrages d'art, modifications profondes des niveaux dans la vallée, ...)
- la conception de zones sacrificielles de ralentissement dynamique de crues (zones de stockage, polders, maîtrise des submersions dans des casiers successifs, ...)
- la régulation des niveaux d'eau (barrages mobiles, épis et seuils fixes, ...).

Les acteurs concernés (au titre de leur compétence technique, administrative ou financière) peuvent être : D.I.R.E.N., D.D.A.F., D.R.A.F., D.D.E., services de la navigation, réseau scientifique et technique de l'Équipement, MISE, Communes ou Syndicats Intercommunaux, Conseil Régional et Général, Concessionnaires d'un droit d'eau (E.D.F. et autres hydroélectriciens...), Fédérations sportives, Conseil Supérieur de la Pêche, ministère de l'Environnement, ministère de l'Agriculture et de la pêche, ministère de la

Jeunesse et des Sports, Europe, Agence de l'eau, V.N.F., Chambre d'Agriculture, Chambre Nationale de la Batellerie Artisanale, (liste non exhaustive).

1.2. Thématiques potamologiques

Un second niveau de lecture se rapporte à toutes les problématiques du milieu vivant « cours d'eau » pour lesquelles les paramètres hydrauliques ne sont qu'un élément intermédiaire d'appréciation, qui doit être combiné à d'autres indicateurs physiques, chimiques, biologiques ou socio-économiques pour constituer un élément pertinent d'aide à la décision.

Sont concernés :

- l'extrapolation d'informations hydrométriques discrètes,
- la restauration des dynamiques et milieux naturels,
- la gestion de la qualité des eaux,
- la prévision des mobilités de lit mineur (latérales ou verticales),
- le dimensionnement des dispositifs de fixation du lit ou de restauration de la mobilité morphologique,
- la rectification ou la restauration de la capacité d'écoulement,
- la prévision des transferts de pollution et l'optimisation des moyens de lutte contre ces pollutions,
- la détermination des échanges entre le cours d'eau et sa nappe d'accompagnement.

Pour chacune de ces thématiques, on précise les facteurs représentatifs à combiner et les compétences spécifiques associées, ainsi que les acteurs institutionnels concernés.

Le présent guide ne traite que des études hydrauliques, en tant qu'elles permettent d'obtenir des résultats strictement hydrauliques. Il n'ambitionne donc, pour les problématiques potamologiques, que d'aider les services à clairement identifier toutes les thématiques afférentes à l'aménagement, afin que l'étude hydraulique détermine, en une seule fois, tous les paramètres utiles immédiatement et en temps différé.

1. Rationaliser les objectifs

2.1. Fixer des objectifs clairs

Très souvent, la maîtrise d'ouvrage, laisse au bureau d'étude le soin de préciser des objectifs qu'elle a formulés.

Au minimum, l'identification précise des zones à enjeux relève de la maîtrise d'ouvrage. Il s'agit de formaliser clairement ce qui fait émerger le besoin d'une étude hydraulique, en élargissant la problématique à d'autres problématiques voisines. Cette formalisation devrait comprendre une désignation géographique des zones à enjeux et des ambitions de la maîtrise d'ouvrage a priori sur ces zones.

Par exemple, lorsque l'étude hydraulique vise à concevoir un ouvrage de protection contre les inondations, la maîtrise d'ouvrage devrait être à même de hiérarchiser les secteurs sur lesquels l'étude va porter, en fonction de leur vulnérabilité, de l'occupation du sol, de quelques principes de bon sens qui permettent d'imaginer la difficulté relative qu'il peut y avoir à protéger telle ou telle zone.

Pour prendre un autre exemple, lorsque l'étude porte sur le rôle joué par un ouvrage, une infrastructure ou une singularité géométrique du cours d'eau, sur l'aggravation des inondations, ou encore sur le dimensionnement des ouvrages de décharge à prévoir pour

une construction neuve, il convient d'indiquer à quels endroits la maîtrise d'ouvrage souhaite que l'impact soit apprécié avec précision.

Dans le cas d'une étude du risque d'inondations, si la maîtrise d'ouvrage éprouve le besoin de disposer d'une iso-ligne précise et exacte de vitesse de courant à 0,5 m/s pour combiner cet aléa avec celui lié à la seule hauteur d'eau, il lui faut apprécier, dès la phase de préparation du cahier des charges de l'étude, l'opportunité de disposer de cette information en tout lieu le long du linéaire de cours d'eau traité, ou seulement dans des zones à enjeux identifiés où un risque de contestation est plus probable que sur les parcelles innocuées.

L'une des erreurs classiques est de croire que ce sont les résultats (éventuellement partiels) de l'étude qui permettront d'y voir clair en termes d'objectifs. La réalité est tout autre, et il arrive un moment où la maîtrise d'ouvrage se sent incapable de décider parmi les options d'aménagement qui lui sont offertes sans une multitude de calculs précis : le calcul supplémentaire devient un moyen de retarder la décision dont le bureau d'études a besoin pour poursuivre.

En réalité, la fixation dès avant le démarrage de l'étude des objectifs de satisfaction de la maîtrise d'ouvrage permet au bureau d'étude de répondre réellement aux questions qui se posent pour faire le choix entre les options offertes, ou proposer des amendements de ces objectifs en fonction de l'analyse hydraulique effectuée.

2.2. Relativiser l'antagonisme des demandes

Une formulation trop approximative des thématiques d'aménagement conduit souvent à mettre en relief des usages apparemment antagonistes et inconciliables.

Le cours d'eau est un milieu intégrateur de très nombreux facteurs : de la pente de ses sous-bassins versants à leur couverture végétale et à leur degré d'artificialisation et d'imperméabilisation, en passant par les régimes saisonniers de pluies. Les régimes résultants sont propres à chaque cours d'eau. La meilleure variable significative pour les décrire est le débit, sauf pour les crues très lentes (dites « crues de nappe ») que des bilans volumiques décrivent mieux.

On peut affirmer que les divers interlocuteurs n'usent pas nécessairement du même cours d'eau, du moins, pas dans le même état hydrologique. Il est donc impératif de clairement identifier les gammes de débit sur lesquelles les usages évoqués sont effectifs.

Cela peut se faire sur des bases profanes (débit de plein bord, d'étiage, d'arrêt de navigation, etc.) ou plus techniques (période de retour), mais il importe que ces bases soient homogènes et consensuelles.

2.3. Fixer des critères objectifs de satisfaction

Un consensus sur l'efficacité attendue des aménagements à concevoir conduit inévitablement à des malentendus qui s'alourdissent en cours d'étude jusqu'à déboucher sur un contentieux ruineux pour la démarche partenariale.

Il est impératif de prendre le temps de « contractualiser » avec les divers partenaires les niveaux de satisfaction visés pour chacun des objectifs. Il s'agit notamment de préciser la lettre et le chiffre de ces niveaux.

Il faut être précis sur les termes employés : dimensionner, expertiser l'influence ou le fonctionnement, protéger, limiter ou annuler l'impact, restaurer, concevoir, etc.

Les variables significatives sur lesquelles porte l'objectif doivent être énoncées : cote de l'eau, exhaussement relatif, hauteur d'eau, largeur au miroir, vitesse(s), volumes d'eau, célérité d'onde de crue.

L'intérêt d'examiner les variations de ces paramètres doit être clairement examiné, et les conséquences tirées explicitement en terme de valeurs moyenne, minimum, maximum, de plage de variation.

Plusieurs niveaux de satisfaction peuvent être fixés, et une tolérance par rapport à l'objectif doit être évoquée et chiffrée.

La maîtrise d'ouvrage ne doit pas hésiter à formaliser ces critères de satisfaction dès la rédaction du cahier des charges de l'étude, car cela permet d'une part de mettre en évidence dès le départ les difficultés et antagonismes que les résultats de l'étude doivent permettre de lever, et d'autre part, d'indiquer aux candidats potentiels lors de l'appel d'offres, le degré de complexité que ces exigences de satisfaction induira sur l'étude, pour une prise en compte dans le mémoire explicatif et dans le budget financier.

2.4. Les exigences de précision

Un maître d'ouvrage échaudé par une précédente étude qui ne lui aurait pas donné satisfaction au regard des incertitudes liées aux résultats pourrait souhaiter se prémunir de toute nouvelle déception en fixant dans le cahier des charges des exigences de précision valant obligation de résultat. Par exemple, pour une étude de construction d'un modèle d'annonce de crue, il pourrait exiger que les niveaux prévus par le modèle pour une crue donnée (voire, pour toutes crues possibles) coïncident avec ceux constatés en réalité avec moins de 10 cm d'écart.

Il peut assortir cette exigence d'une totale liberté laissée au bureau d'étude pour définir les données topographiques, bathymétriques, hydrométriques, etc. utiles et nécessaires pour assurer cette obligation de résultat.

Le fonctionnement hydraulique du secteur d'étude montre qu'un même cours d'eau peut présenter, pour différentes gammes de débits différentes de l'étiage à la crue exceptionnelle, des topologies hydrauliques fluctuantes, en fonction de la connexion et déconnexion d'annexes hydrauliques, par exemple. Quand bien même cela ne serait pas le cas, des études menées sur le Rhône par le LNHE d'EDF pour le compte du CETMEF ont montré que la plupart des formulations usuelles des dissipations d'énergie hydraulique par frottement contre le lit mineur souffraient de l'inexactitude de l'hypothèse commune qui veut que les paramètres significatifs (coefficient de Strickler, par exemple) soient généralement considérés comme invariants pour un cours d'eau donné dans un secteur donné, quelles que soient les conditions hydrauliques. Il n'est donc pas anormal qu'une obligation de précision portant sur les résultats d'une telle étude ne soit jamais atteinte par le bureau d'études.

A tout le moins, il conviendrait d'assujettir cette obligation à un nombre maximal de tentatives validées par le maître d'ouvrage.

Annexe 2

Analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude

Table des matières

1. Préambule.....	5
1.1. l'expertise hydraulique ou l' « hydraulique qualitative ».....	5
1.2. l'appropriation progressive de l'expertise	5
2. Objectif : Identification des zones d'étude.....	6
2.1. la zone d'objectifs	6
2.2. la zone d'étude hydrologique.....	6
2.3. Données cartographiques.....	6
2.4. la zone d'étude hydraulique.....	7
2.5. Les données hydrauliques.....	7
2.5.1. Définition des données hydrauliques.....	7
2.5.2. Types de données hydrauliques.....	8
2.5.2.1 Lois hydrauliques à la limite aval	8
Loi de tarage.....	8
Loi de régime normal.....	9
Loi de régime critique.....	10
Limite aval fictive.....	11
lois de forçage : marégraphe ou remous de confluent prépondérant ou ouvrage de régulation.....	11
Forçage par une marée.....	12
Forçage par un cours d'eau prépondérant.....	12
Forçage par un aménagement hydraulique.....	13
2.5.2.2 Laises de crues.....	13
Typologie générale des laisses de crues, recueil des laisses de crues.....	13
les marques durables.....	13
les informations historiques.....	13
les laisses de crues récentes.....	14
les photographies.....	14
les témoignages.....	14
Les analyses de cohérence.....	15
la non-linéarité des profils en long.....	15
l'analyse du profil en long.....	15
l'analyse des courbes de niveaux de la surface libre.....	16
Les biais et rectifications.....	17
les incertitudes générales.....	17
les incertitudes particulières.....	17
les perturbations liées à des modes de fonctionnement distincts.....	19
L'information consolidée.....	20
2.5.2.3. Lois de fonctionnement d'ouvrages hydrauliques.....	22
Catalogue de lois.....	22
Les seuils.....	22
Les épis.....	24
Les barrages de navigation.....	24
Les microcentrales hydroélectriques.....	24
Les stations de pompage.....	25
Les vannages en sous-verse.....	25
Les portes à marée et les portes de garde.....	26

Les siphons.....	26
Étalonnage de lois.....	26
Ouvrages inclassables.....	27
3. Dresser la topologie hydraulique.....	28
3.1. La continuité hydraulique et l'homogénéité des écoulements.....	28
3.1.1. la largeur au miroir en basses eaux.....	29
3.1.2. la nature du lit.....	30
3.1.3. Les styles fluviaux.....	35
3.1.4. la régularité des écoulements.....	36
3.1.5. la ramification hydrographique.....	38
3.1.6. la géologie.....	39
3.2. Singularités et sections de contrôle.....	39
3.2.1. les ouvrages de franchissement.....	39
3.2.2. les ouvrages de contrôle des niveaux.....	40
3.2.3. les sections de contrôle.....	40
3.2.4. les aménagements hydrauliques.....	41
3.3. Schématiser la topologie en branches, mailles, nœuds, casiers et nappes.....	44
4. Les cheminements préférentiels.....	46
4.1. Les pentes d'écoulement principal.....	46
4.2. Les pentes de la vallée.....	47
4.3. Les éléments structurants du champ d'expansion.....	48
4.4. Des dépressions aux cheminements secondaires.....	49
4.5. Concentration ou diffusion des écoulements.....	50
5. Les connexions hydrauliques.....	51
5.1. Confluence de cheminements.....	51
5.2. Nature et conditions des connexions.....	51
5.2.1. confluences.....	52
5.2.2. seuils et vannages.....	52
5.2.3. remblais déversants.....	53
5.3. Déconnexions et discontinuités.....	53
5.4. Limite aval.....	55
5.5. Limite amont.....	55
6. La topologie hydraulique dans la commande.....	56
6.1. Tâches incombant à l'assistant au maître d'ouvrage (ou au maître d'œuvre).....	56
6.2. Eléments pour la rédaction du cahier des charges et l'estimation financière.....	56
7. Annexes.....	58
7.1. Données d'archives.....	59
7.2. Données de terrain.....	60
7.3. Fiche de visite.....	62
7.4. Exemple d'application.....	63
7.4.1. Délimitation du secteur d'étude.....	63
7.4.2. Eléments d'hydrographie et d'hydromorphologie.....	63
7.4.3. Topologie des écoulements.....	64
7.5. Crédits photographiques.....	67

Table des illustrations

Figure 1 : vue générale d'un jaugeage avec saumon à partir d'un pont avec un camion spécialement équipé, au droit d'une station hydrométrique (photo : © Marc Sagot, DIREN Auvergne).....	9
Figure 2 - Repères de crue sur la façade de l'hôtel du département du Lot-et-Garonne.....	13
Figure 3 - Laisse de la crue de 2001 sur la Vesle à Braine (02).....	14
Figure 4 - Trace de l'inondation à Prague (Na Kampa), crue de la Vltava de 2003.....	14
Figure 5 : crue de décembre 1982 sur la Vienne, de la confluence avec la Creuse jusqu'à la confluence avec la Loire ; laisses de crues suspectes.....	16
Figure 7 : surélévation liée à une courbe.....	17
Figure 8 : perte de charge liée aux écoulements souterrains.....	18
Figure 9 : encombres flottants après une crue.....	18
Figure 10 : fluctuations d'un niveau contre un mur de maison.....	18
Figure 11 : crue de décembre 1982 sur la Vienne, de la confluence avec la Creuse jusqu'à la confluence avec la Loire ; zone de remous de la Loire.....	19
Figure 11 - Comparaison des hauteurs atteintes sur l'Indre en plusieurs stations : noter l'inversion de la hiérarchie entre les crues de l'amont vers l'aval.....	20
Figure 11 - Comparaison des hauteurs atteintes sur l'Indre en plusieurs stations : noter l'inversion de la hiérarchie entre les crues de l'amont vers l'aval.....	20
Figure 12 - Dimensions caractéristiques d'un seuil.....	22
Figure 12 - Dimensions caractéristiques d'un seuil.....	22
Figure 14 - Noyage / dénoyage des seuils.....	22
Figure 15 - Épis déflecteurs submergés sur la Birse (Jura Suisse).....	24
Figure 16 – Microcentrale sur la Mayenne (53 © photo DHI).....	25
Figure 17 - Station de pompage sur la Somme à Abbeville (80).....	25
Figure 18 - Principe de fonctionnement d'un siphon.....	26
Figures 19 - Modèle physique réduit du barrage du Marguet (Boulogne), réalisé et mis en eau au CETE de Lyon, LRPC de Clermont-Ferrand).....	27
Figure 20 - Epi exutoire de la Saane à la mer, schéma d'ensemble.....	28
Figure 21 - Epi exutoire de la Saane à la mer: noyage par la marée.....	28
Figure 22 – Largeurs au miroir (en rouge) prises sur un cours d'eau sinueux (écoulement figuré en bleu).....	29
Figure 23 – Elargissement brusque du lit du Couesnon, vu sur carte I.G.N.....	30
Figure 24 – Microfalaises de berge dans l'extrados d'un cours d'eau.....	31
Figure 25 – Berge artificielle (noter la raideur du talus).....	32
Figure 26 – Berge en pente douce (en rive gauche).....	32
Figure 27 – Berge plate, zone humide.....	32
Figure 28 – Lèvre (sur le côté droit du lit) perchante le lit mineur avant le débordement.....	32
Figure 29 – Schéma classique de l'étagement végétal sur une berge naturelle.....	33
Figure 30 – Cours d'eau traversant une lentille d'argile.....	34
Figure 31 – Styles fluviaux.....	35
Figure 32 – Méandres naturels.....	36
Figure 33 – Méandres forcés de la Vesle (extrait du ©SCAN25 de l'I.G.N.).....	36
Figure 34 – Effet de miroir sur la surface d'un cours d'eau à tendance lente.....	37
Figure 35 – écoulement fluvial rapide, presque critique, sans effet de miroir.....	37
Figure 36 – Transition entre un écoulement lent (à droite, en amont du pont) et un écoulement rapide (à gauche).....	38
Figure 37 – Vue aérienne orthogonale montrant l'écume produite par un seuil biais.....	38
Figure 38 – Moulin de Braine (extrait du SCAN25 de l'I.G.N.).....	42
Figure 39 – Plan du double-moulin en dérivation des usines Navarre sur l'Iton (fonds de plan de la DDE de l'Eure).....	42
Figure 40 – Prise d'eau d'hydroélectricité et de navigation de Berry-au-Bac (extrait de SCAN25 de l'I.G.N.).....	43
Figure 41 – Plan d'archive de l'ancien château de Navarre et carte de Cassini de l'Iton au même endroit (remarquer combien l'organisation du système actuel de dérivation des moulins de Navarre, Figure 39 – Plan du double-moulin en dérivation des usines Navarre sur l'Iton (fonds de plan de la DDE de l'Eure) hérite de l'organisation des jardins du château de Navarre, détruits sous la Révolution Française).....	43
Figure 42 – Légende indicative pour la schématisation de la topologie hydraulique (librement inspirée d'un rapport d'étude de la SoGreAH).....	45
Figure 43 – Vue en perspective des données de photogrammétrie de la plaine de l'Aveyron à Albi (les zones de dépression apparaissent en brun foncé, les zones en léger surplomb apparaissent en brun clair).....	50

Figure 44 – Ressaut hydraulique au franchissement du barrage de Pontivy.....	52
Figure 45 – Déversement des eaux de l'Oise (à droite) par-dessus une route qui la longe latéralement.....	53
Figure 46 – schéma de fonctionnement classique d'une connexion ponctuelle entre lit mineur perché et fond de vallée.....	54
Figure 47 – vue aérienne d'écoulements de crue dans un lit perché contre le flanc de vallée.....	54

1. Préambule

1.1. l'expertise hydraulique ou l' « hydraulique qualitative »

L'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude est la mise en œuvre d'une expertise hydraulique qu'on peut désigner comme « hydraulique qualitative ». Cette étape, préalable indispensable à toute modélisation, est trop souvent négligée lors de la commande par le commanditaire de l'étude, autant que par le bureau d'études dont les prix serrés ne l'autorisent généralement pas à retarder la production de calculs tangibles. Elle peut parfois suffire à la production d'expertises hydrauliques pertinentes et à la hauteur du problème réellement posé.

Cette expertise comporte plusieurs degrés.

Une bonne lecture critique de la qualité des données disponibles est le premier. Elle permet de centrer la réflexion du prestataire sur les thèmes où il peut apporter une réelle plus-value.

Une bonne idée des données manquantes pour nourrir le calcul est le deuxième : elle permet de ne pas négliger, par une surestimation optimiste du fonds de données, des postes de dépense inattendus et une dégradation de la qualité globale de l'étude.

La prédiction des tendances des résultats en constitue sans doute le summum. Elle permet d'envisager un dialogue technique constructif avec le prestataire.

1.2. l'appropriation progressive de l'expertise

L'expertise ne doit pas être l'apanage du seul bureau d'études. Trop souvent, par manque de temps ou par manque de confiance en soi, le maître d'ouvrage confie à son prestataire de service le soin de dresser son cahier des charges techniques,

Le maître d'ouvrage peut pourtant mobiliser ses propres moyens pour assurer une bonne analyse préalable du fonctionnement du secteur d'études. Les services déconcentrés disposent souvent d'informations de qualité, et surtout, de « terrain », concernant le fonctionnement des cours d'eau.

Le but du maître d'ouvrage n'est cependant pas de se substituer au prestataire. Cette analyse préalable ne dispense pas le bureau d'études d'une réflexion au moins équivalente. Elle replace simplement le prestataire dans le rôle où il apporte une réelle plus-value au maître d'ouvrage : l'expertise d'un élément singulier permettant de lever une ambiguïté et de fiabiliser une prédiction.

L'analyse du fonctionnement du secteur d'étude par le maître d'ouvrage se traduit concrètement, in fine, par un cahier des clauses techniques précis qui fournit aux prestataires potentiels les questions auxquelles son travail devra répondre, les éléments utiles pour jauger la nature et la consistance du travail à proposer, et qui recadre le rôle qui lui sera dévolu auprès de la maîtrise d'ouvrage. Mais aussi, elle permet aux agents du maître d'ouvrage qui peuvent faire preuve d'une certaine « audace technique » de s'approprier les raisonnements techniques développés par l'expert titulaire de l'étude, et de développer, peu à peu, une expertise croissante.

Ce chapitre présente donc les différentes étapes de l'analyse du fonctionnement hydraulique d'un secteur d'études telle qu'on peut l'attendre d'un prestataire expert : les zonages pertinents d'études hydrologique et hydraulique, à partir de la topologie des écoulements, l'identification des cheminements préférentiels, puis des connexions hydrauliques activant ou désactivant ces cheminements. Les données utiles, les clefs d'analyse et les interconnexions entre divers indices sont présentées afin de fournir au lecteur les trois degrés de lecture correspondant aux trois degrés d'expertise qu'il est susceptible de mettre en œuvre, et les renvois aux chapitres spécialisés concernant les données hydrologiques, hydrauliques et topographiques.

2. Objectif : Identification des zones d'étude

L'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude consiste à établir la topologie prévisible des écoulements, à partir de laquelle des comportements et des incidences hydrauliques peuvent être devinés, pour limiter les différentes phases de l'étude aux seuls territoires pertinents, et inversement, pour apprécier la quantité et la qualité de données disponibles là où elles sont nécessaires. La connaissance de la typologie des écoulements permettra au commanditaire de juger de la pertinence du type de modélisation approprié.

2.1. la zone d'objectifs

La formalisation des objectifs par la maîtrise d'ouvrage et ses différents partenaires a conduit à préciser des valeurs cibles pour les paramètres hydrauliques, pour des conditions hydrologiques données et surtout, des lieux précis.

Les secteurs où des résultats sont attendus en vue d'une analyse de satisfaction des objectifs, forment des grappes de sous-zones, qu'il faut liasonner continûment pour constituer la zone d'étude.

2.2. la zone d'étude hydrologique

Le premier bon réflexe lors de l'examen de la consistance d'une étude hydraulique est de repérer la zone d'objectifs sur une carte de l'IGN au 1/25 000^{ème} et d'identifier les ramifications hydrographiques signalées.

2.3. Données cartographiques

Les cartes 1/25 000^{ème} restent l'outil de base d'une première analyse du secteur d'étude. Il existe également la BD TOPO ainsi que le RGE (Référentiel à Grande Echelle). La question de la mise à jour effective du tracé des cours d'eau dans la carte au 1/25 000^{ème} est variable. S'il est considéré comme appartenant à une région urbanisée, son tracé sera révisé lors de l'établissement de la nouvelle carte à partir de la photogrammétrie tous les 5 à 6 ans. Sinon, la période de révision est plutôt de 10 à 15 ans. Le tracé du cours d'eau, contrairement aux délimitations de lotissements et aux tracés de voies routières, n'est pas retouché par les levés terrestres du géomètre IGN, sauf si de grossières erreurs lui ont été signalées (oubli d'écluses, de seuils, etc.).

Les photographies aériennes orthogonales sont le fruit de missions de couverture nationale IGN à l'échelle de 1/20 000^{ème} - 1/32 000^{ème}, avec des conditions de qualité atmosphérique draconiennes (plutôt au printemps). Des missions spéciales peuvent être conduites à l'échelle 1/6 000^{ème} ou 1/8 000^{ème} maximum pour être réutilisées dans un modèle numérique de terrain exploitable. Les missions à l'échelle supérieure (1/16000^{ème} ou 1/32 000^{ème}) fourniront des éléments pertinents d'analyse du fonctionnement hydraulique, mais ne seront plus exploitables en MNT. Avec le développement des SIG, de nombreuses collectivités ou EPCI se sont dotées de données intéressantes (photogrammétrie, couverture photographique aérienne particulière etc....) Dans ce cas, au moyen de convention et sous réserve de compatibilité de formats, des conventions peuvent être prévues pour organiser des échanges d'informations.

Un financement spécial a été mis en place dans les années 1977⁺ pour assurer des missions spéciales de couverture des cours d'eau en crue, à l'échelle 1/12 000^{ème} ou 1/14 000^{ème}. L'IGN dispose d'un site Internet

http://www.ign.fr/rubrique.asp?lng_id=FR&rbr_id=409&lng_id=FR où il est facile de trouver les missions aériennes couvrant une commune particulière. Un symbole évoquant un œil associé à la mission retenue indique que les photos peuvent être visualisées avant la commande. A défaut, il faut se faire envoyer une photocopie du tableau d'assemblage de la mission retenue, en demandant à la photothèque de l'IGN (☎ : 01.43.98.80.60).

La couverture satellite fournit des informations (de plus en plus) intéressantes, notamment pour la caractérisation de la morphologie du lit mineur et de l'hydrographie. Le niveau de précision reste pour l'heure bien moindre que celui des photographies aériennes.

Les indications altimétriques reportées sur les cartes de l'IGN au 1/25 000^{ème} ne sont pas assez précises pour être utilisées directement dans les études hydrauliques, mais les courbes de niveaux figurées donnent une bonne indication de la topographie de la vallée. Elles permettent de délimiter assez facilement le bassin versant du cours d'eau et de ses affluents.

Les services en charge de la prévision des crues et les services en charge de l'hydrométrie (DIREN, EDF, CNR) connaissent la localisation des stations hydrométriques existant en amont et en aval de la zone d'objectifs, qui sont également consultables sur la base de données hydrométriques du ministère en charge de l'environnement (banque Hydro <http://hydro.rndc.tm.fr/accueil.html>). En première approche, la zone d'étude hydrologique, qui vise à établir les débits de projet pour l'étude hydraulique, s'étend sur tout le bassin versant compris entre les stations immédiatement à l'amont de la zone d'objectifs sur chaque affluent, et les stations immédiatement à l'aval de la zone d'objectifs.

2.4. la zone d'étude hydraulique

On peut définir la zone d'étude hydraulique comme la zone strictement nécessaire pour calculer les paramètres hydrauliques de proche en proche à partir d'un point connu pour obtenir leurs valeurs dans la zone d'objectifs avec fiabilité.

Cela suppose évidemment de savoir où sont les « points connus », et d'encadrer suffisamment la zone d'objectifs pour limiter les « effets de bord ».

Le régime hydraulique du cours d'eau joue un rôle primordial dans la définition de cette zone. Fluvial, il permet la remontée d'influences vers l'amont, et rend inutile le calcul de la ligne d'eau en aval d'un point connu en aval des objectifs. Torrentiel, il chasse vers l'aval toutes les influences, et rend inutile le calcul de la ligne d'eau en amont d'un point connu en amont de la zone d'objectifs.

Lorsque les points connus font défaut ou se trouvent si loin qu'ils prolongent démesurément la zone d'étude hydraulique, l'analyse du fonctionnement hydraulique permet de réduire efficacement sa longueur sans perdre en fiabilité de calcul. De même, il est inutile d'étendre la zone de calcul sur tout le lit majeur d'un cours d'eau dont on ne s'intéresse qu'aux situations non-débordantes. L'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude vise ainsi à préciser les objectifs caractérisés dès le démarrage de l'étude (cf. Annexe 1 : formalisation des problématiques) et à les décliner le long du cours d'eau et de sa vallée considérés comme un support dynamique des réflexions d'aménagement ou d'investigations.

2.5. Les données hydrauliques

2.5.1. Définition des données hydrauliques

On entend par « données hydrauliques » toutes les informations de hauteur, niveau d'eau et vitesses qui permettent de caractériser l'état hydraulique d'un tronçon de cours d'eau pour un événement hydrologique donné.

Cela exclut notamment les données hydrologiques, reflétant, au droit du secteur d'étude, l'incidence des facteurs climatiques sur le forçage hydrique du secteur d'étude, la transformation des pluies sur les bassins versants dont le secteur d'étude est un exutoire en

débits dans le cours d'eau étudié, les transferts d'eau souterraines qui sont susceptibles d'alimenter le cours d'eau, etc.

Les données hydrauliques rendent compte de la traduction du signal hydrologique, en un lieu et un instant donnés, en paramètres d'écoulement. Il convient d'être précis dans la désignation des différentes quantités hydrauliques, sous peine de commettre de graves malentendus.

On désigne par « niveau d'eau » l'altitude de l'interface entre l'eau et l'air (surface libre) dans un système de nivellement donné. On parle aussi de « cote d'eau ». La « hauteur d'eau » est la distance verticale séparant le sol de la surface libre. La vitesse moyenne désigne le rapport entre le débit et la section d'écoulement. La charge hydraulique est la somme du niveau d'eau et d'une quantité d'énergie cinétique dont la valeur est donnée

par l'expression : $\frac{V^2}{2g}$, g désignant l'accélération de la pesanteur et v la vitesse d'écoulement.

2.5.2. Types de données hydrauliques

Ces « données hydrauliques » comprennent principalement :

- les lois hydrauliques à la limite aval, qui permettent, en régime fluvial, d'amorcer le calcul des caractéristiques hydrauliques de tout le secteur en amont de cette limite ; lorsque le régime est torrentiel, ces données hydrauliques doivent être fournies à la limite amont, mais les recommandations qui suivent demeurent pertinentes ;
- les laisses de crues (au sens large), qui rendent compte de la réalité des écoulements pour un ou plusieurs événements passés, et font le trait d'union entre les calculs de l'hydraulicien et la réalité ;
- les lois de fonctionnement d'ouvrages hydrauliques, qui forment un sous-groupe particulier de lois hydrauliques pouvant faire office de condition à la limite aval, mais pouvant également être intégrées au sein d'un linéaire de cours d'eau pour les besoins du calcul.

2.5.2.1 Lois hydrauliques à la limite aval

Loi de tarage

La disponibilité d'une courbe de tarage à la limite aval d'un calcul hydraulique est une situation a priori idéale. Ce type de courbe provient d'une part de la réalisation à cet endroit de jaugeages réguliers effectués d'ordinaire par les services déconcentrés du ministère de l'écologie et du développement durable (DIREN), et d'autre part, de l'extrapolation des courbes moyennant ces points de mesure jusqu'aux débits les plus intenses prévisibles.



Figure 1 : vue générale d'un jaugeage avec saumon à partir d'un pont avec un camion spécialement équipé, au droit d'une station hydrométrique (photo : © Marc Sagot, DIREN Auvergne)

Généralement, les jaugeages sont disponibles pour des débits inférieurs ou égaux à la crue annuelle. Parfois, un jaugeage d'une crue décennale voire vingtennale récente peut avoir été effectué. Dans tous les cas, la courbe de tarage est incertaine pour les débits supérieurs au débit cinquantennal.

A partir des données de jaugeages fournies par la DIREN compétente, un prestataire peut apprécier cette incertitude, en proposant une extrapolation possible à partir du même semis de points, mais majorant l'extrapolation de la DIREN, et une extrapolation possible à partir du même semis de points, mais minorant l'extrapolation de la DIREN. Ces minorants et majorants doivent présenter un degré de corrélation avec les points de mesure équivalent de celui de l'ajustement de la DIREN.

En cas de jaugeages contradictoires, il est nécessaire de consulter la DIREN pour recueillir son explication, et rejeter de l'échantillon les valeurs invalidées. Si la DIREN n'a pas spécialement d'avis à ce sujet, le prestataire peut recourir à des analyses hydrauliques localisées pour privilégier un jaugeage et rejeter l'autre, étant entendu qu'il devra motiver son choix et solliciter l'avis de la DIREN à ce sujet. Les minorations ou majorations de la courbe de tarage fournies par la DIREN peuvent précisément porter sur la courbe de tarage extrapolée à partir d'un échantillon de jaugeages purgé de valeurs que le prestataire juge anormales.

Même lorsque les données de jaugeages sont indiscutables, le prestataire doit veiller à ce qu'aucun détarage n'invalide la courbe. Ainsi, lorsque de fortes perturbations morphologiques ont eu lieu à proximité de la station hydrométrique (recalibrage, endiguement, curage, dragages intensifs, etc.), ou encore, lorsque la mobilité naturelle du cours d'eau le conduit à faire évoluer son tracé au droit de la station hydrométrique, le couple Débit – Hauteur d'eau correspondant à un jaugeage ancien (antérieur à l'expression de la perturbation morphologique au droit de la station hydrométrique) n'est plus valide. On peut ainsi voir toute une période de jaugeages devenir caduques du fait de la mobilité des fonds du lit de cours d'eau au droit de la station hydrométrique.

Pour plus d'informations, il peut être utile de se référer au guide hydrologique édité par la DPPR du MEDD.

Loi de régime normal

Dans la très grande majorité des cas, on ne dispose pas d'une courbe de tarage au droit de la limite aval du secteur d'étude, ou bien la courbe de tarage la plus proche disponible en aval est trop éloignée pour qu'on prolonge le modèle si loin de la zone d'objectifs (critère essentiellement économique). Il faut alors construire une courbe approchée des écoulements supposés dans la section aval du calcul, par exemple, sur une hypothèse de régime normal.

Le régime normal dans une section en travers correspond aux caractéristiques hydrauliques (débit, niveau d'eau) que prendrait l'écoulement à cet endroit si le régime y était uniforme, c'est-à-dire, si les caractéristiques géométriques du lit (section mouillée, pente) et les caractéristiques hydrologiques (débit) étaient invariables dans le temps et dans l'espace en aval.

Dans la réalité, pour un cours d'eau naturel, ce régime n'est jamais atteint, mais l'écoulement tend à s'en rapprocher selon des courbes dites « courbes de remous ». Pour peu que la limite aval des calculs soit choisie en un lieu où le lit conserve des caractéristiques géométriques peu variables vers l'aval (et notamment, la pente est constante), sur un tronçon assez long, dans lequel aucun apport significatif de débit ne vient perturber les conditions hydrologiques, on peut supposer que la section de la limite aval est dans les conditions d'un régime normal, et ce faisant, on ne commet qu'une erreur bornée par le remous traduisant l'écartement entre les conditions hydrauliques « réelles » et la condition hydraulique « normale ».

L'intérêt de ce type de loi réside dans le fait qu'il suffit de formuler une hypothèse sur la pente de régime normal en aval de la section de calcul aval pour établir, grâce aux caractéristiques géométriques (section mouillée, rayon hydraulique) et hydrauliques (rugosité) de la section aval, et grâce à une formule classique de régime uniforme (Strickler, Manning, Chézy, etc), une courbe de couples débits – niveaux d'eau pertinente.

Il importera toutefois que le prestataire apprécie l'écart probable entre les conditions hydrauliques réelles et les conditions hydrauliques de la loi normale, c'est-à-dire, la valeur du remous du régime graduellement varié à cet endroit.



Loi de régime critique

En dehors des sections contrôlées équipées d'un seuil jaugeur, constituant des stations hydrométriques pourvues de courbes de tarage, il est fréquent de rencontrer sur les cours d'eau des sections contrôlées par un déversoir.

Lorsque ce déversoir a des caractéristiques géométriques réglées, c'est-à-dire que la ligne de déversement est droite et horizontale, en travers de l'écoulement, les lois de l'hydraulique montrent que la transition du régime fluvial de l'écoulement en amont du seuil vers l'écoulement torrentiel de chute libre en aval du seuil se fait par le régime critique, s'établissant au droit de l'arrête aval de la crête de l'obstacle.

Le régime critique correspond à un nombre de Froude égal à 1. La courbe des couples débits – niveaux d'eau en régime critique peut être entièrement déterminée à l'aide des seules caractéristiques géométriques de la section du déversoir, ce qui fait tout son intérêt.

Il est rare que la section de déversement soit absolument régulière. De plus, un seuil déversant peut, une fois que ses culées sont submergées, être contourné par une fraction modérée mais non-négligeable du débit. Enfin, toute singularité (embâcle, défaut géométrique, dommage subi) modifiant même localement la ligne de déversement, écarte la ligne d'eau du régime critique.

Pour autant, le régime critique a cet autre grand intérêt que le calcul hydraulique en amont est assez peu sensible au niveau d'eau exact au droit du déversement. Le niveau d'eau à la limite aval, proche du niveau du régime critique, induit une courbe de remous d'abaissement depuis l'amont en régime fluvial (soit, avec un niveau d'eau nettement supérieur au niveau d'eau du régime critique), qui accélère les vitesses jusqu'au droit de la section de déversement. Si une erreur de 10 à 20 cm est commise sur le niveau d'eau au droit du déversement, le remous d'abaissement sera simplement légèrement moins accentué, mais conservera les mêmes caractéristiques vers l'amont, en se raccordant au régime fluvial non-perturbé.

Il faut noter que, pour la plupart des codes de calcul ne fonctionnant qu'en régime fluvial, il n'est pas gênant de surélever de 10 cm environ les altitudes de la ligne d'eau calculées au droit du déversoir pour éviter le plantage du calcul à l'approche de cette condition à

la limite aval. Une autre solution consiste à introduire une loi d'ouvrage déversant à l'aval et une condition limite qui assure un dénoyage permanent de cet ouvrage.

Enfin, tout ceci n'est valable que dans le cas d'un déversement complètement dénoyé, c'est-à-dire que le niveau d'eau en aval du déversement ne vient jamais gêner la nappe d'écoulement par-dessus le seuil. Si cette hypothèse est invalidée, on se trouve dans le cadre d'une loi (complexe) de fonctionnement d'un ouvrage hydraulique.

↳ Limite aval fictive

Dans tous les cas de figure, nous avons vu que les conditions aux limites aval ne sont jamais parfaites, même s'il est souvent possible d'apprécier l'incertitude liée à chacune d'entre elles. Les tests de sensibilité qui seront réalisés en cours d'étude (cf. chapitre 7 – suivi de l'exécution de l'étude) montreront l'incidence de ces incertitudes, mais d'une manière générale, il convient de s'affranchir du biais qu'elles risquent d'induire sur les résultats de la zone d'objectifs en choisissant une limite aval suffisamment en aval de la zone d'objectifs, voire, une limite aval fictive.

Cette limite aval fictive est un compromis technico-financier satisfaisant permettant de limiter le risque de propagation d'une erreur commise dans l'appréciation de la condition à la limite aval sur la zone d'objectifs. Il s'agit de construire un prolongement fictif de la section de calcul réelle la plus en aval, suivant une pente ajustée sur la pente moyenne constatée au niveau de ce dernier profil réel, et d'implémenter à cet endroit la condition à la limite retenue parmi les trois décrites précédemment.

Sur la longueur fictive ajoutée, l'erreur commise dans l'estimation de la loi hydraulique à la condition limite aval tend à s'amortir, pour disparaître presque entièrement au niveau de la section de calcul réelle aval, et donc, dans le reste du calcul en amont (et en particulier, dans la zone d'objectifs).

La longueur de cet allongement dépend généralement de la pente moyenne du cours d'eau (i) estimée dans la dernière section de calcul aval, et de l'erreur supposée (ΔZ) dans la condition hydraulique à la limite aval. En première approche, pour un calcul en régime permanent, il est conseillé de prévoir un allongement fictif d'environ $L=2.\Delta Z/\tan(i)$ ou, i étant très souvent faible (inférieure à 1%), $L=2.\Delta Z/i$.

A titre d'exemple, pour une erreur classique d'estimation de 10 à 20 cm sur les niveaux d'eau d'une loi normale à l'aval, avec une pente de cours d'eau de 5 pour 10000, la longueur fictive à ajouter est de 400 à 800 mètres. Avec une pente de 1 pour 10000 (cas de la Seine), la longueur à ajouter est de 2000 à 4000 mètres. Avec une pente de 1 pour 1000 (cas de la Loire), la longueur à ajouter est de 80 à 160 mètres.

Pour un calcul en régime transitoire, du fait des problèmes liés à l'hystérésis de crue, il est recommandé de reporter la condition limite aval fictive entre 10 et 50 km en aval selon la pente moyenne du cours d'eau.

Cet artifice de calcul très pratique présente essentiellement l'inconvénient de gêner considérablement la compréhension du calcul par les néophytes en hydraulique, mais permet généralement de s'affranchir des tests de sensibilité sur la condition à la limite aval. En fonction de la réceptivité de la maîtrise d'ouvrage notamment à ces problèmes de sensibilité et d'incertitudes, il pourra être spécifié, dès le cahier des charges, que ce type de solution est préféré à l'analyse de sensibilité stricto sensu sur un secteur d'étude qui n'aurait pas été fictivement allongé.

↳ lois de forçage : marégraphe ou remous de confluent prépondérant ou ouvrage de régulation

Il est possible que les conditions hydrauliques à la limite aval soient forcées par un phénomène qui impose son niveau d'eau quelles que soient les conditions hydrauliques du cours d'eau étudié, ou presque. Il en va ainsi des zones

- sous influence directe de la marée,
- dans le remous d'un cours d'eau nettement plus important,
- sous le contrôle d'un ouvrage de régulation hydraulique.

- Forçage par une marée

La marée est une oscillation des masses d'eau océanique sous l'effet de l'attraction exercée par le soleil et la lune. L'onde de marée ainsi générée, de forme sinusoïdale de période variable selon le type, balaye les océans et subit, à l'approche des côtes continentales, des déformations importantes. L'onde qui pénètre à l'intérieur des estuaires (vers les zones de cours d'eau qui nous concernent) subit une nouvelle déformation liée aux vitesses différentes de l'onde de haute mer et de l'onde de basse mer (la célérité dépendant de la hauteur d'eau sur laquelle se déplace l'onde).

Ce phénomène est prépondérant sur les conditions hydrauliques générales du cours d'eau sur une distance dépendant de la pente moyenne du fleuve. Dès que le marnage constaté dans la zone aval du secteur d'étude approche ou dépasse 50 cm, il faut considérer cette condition limite aval spécifique. Sa prise en compte ne saurait faire l'objet d'une simple hypothèse de régime permanent au niveau d'étale de basse mer ou de pleine mer, car le marnage, éminemment dynamique, engendre des vitesses propres du courant dont l'hypothèse de régime permanent ne rend pas compte. Il est donc impératif de recourir à une modélisation en régime transitoire, avec une description complète du cycle de marnage à la limite aval. Compte-tenu d'une part de la mise en défaut quasi-systématique de l'hypothèse de forme sinusoïdale du marnage, et d'autre part, de la répétition quotidienne du phénomène, et mensuelle des fortes intensités de ce phénomène, il est recommandé de procéder à une campagne de mesures du marnage au droit de la limite aval du secteur d'étude. Cette campagne devrait avoir lieu pour un coefficient de marée moyen (environ 70) et pour un coefficient de marée forte (environ 95). Si l'opportunité se présente, une campagne de mesures pour une marée d'équinoxe (coefficient de 115 à 119) doit être prévue.

- Forçage par un cours d'eau prépondérant

Lorsque le cours d'eau étudié se trouve dans la zone de remous d'un cours d'eau nettement plus important (par exemple, de débit de crue cinq fois supérieur), il subit le niveau imposé par la confluence au même titre que le fleuve subit la marée, à ceci près que cela n'a lieu qu'occasionnellement, lorsqu'une crue survient sur le cours d'eau principal, et non périodiquement. Une manière d'identifier l'existence d'une telle influence de remous d'un cours d'eau important à proximité, outre d'éventuels témoignages, est de repérer une anomalie dans les laisses de crue sur la zone aval du secteur d'étude : les laisses de crue ne respectant pas la « hiérarchie » des crues du cours d'eau qui les ont générées, par exemple (ainsi, si la crue de 1982 est connue comme étant plus forte que la crue de 1993 sur le cours d'eau, mais que les laisses de crue dans la zone aval sont identiques, ou même si celle de 1993 est au-dessus de celle de 1982, il y a fort à parier qu'un cours d'eau proche a imposé en 1993 son niveau de crue plus fort que celui de 1982, pour ce qui le concerne). Si un atlas des zones inondables existe sur le secteur, il est également possible d'y lire si la zone aval du secteur d'étude est comprise dans le champ d'expansion d'un cours d'eau important à proximité.

A moins que le cours d'eau principal ne soit sujet à des crues de type « torrentiel », dont une caractéristique est la forte et brutale variation de niveau d'eau durant la crue éclair, le remous s'impose généralement au cours d'eau le plus faible selon une dynamique quasi-statique qui autorise une hypothèse de régime permanent au niveau du remous. Il suffit alors de procéder à une étude simplifiée du fonctionnement hydraulique du cours principal, sur un kilomètre environ autour de la confluence, et le long du cours d'eau secondaire jusqu'à la zone d'étude initiale, pour déterminer le niveau d'eau qui est imposé à la limite aval de la zone d'étude, en fonction d'hypothèse sur l'état hydrologique du

cours principal. A noter que dans ce cas, il convient, au niveau de l'étude hydrologique, de bien apprécier la probabilité globale de l'événement croisant concomitamment une crue donnée sur le cours d'eau objet de l'étude et une autre crue donnée sur le cours principal qui génère le remous.

Si le cours d'eau principal est sujet à des crues « torrentielles », son niveau peut varier brutalement (en quelques heures) de manière importante (plusieurs mètres), et son remous peut alors remonter de manière dynamique dans le vallon du cours d'eau étudié. Il faut alors modéliser cette dynamique en régime transitoire, en déterminant le limnigramme de la confluence et en l'imposant comme condition limite au secteur étudié.

A noter que si l'aval de la zone d'étude se trouve dans la zone de confluence, c'est-à-dire, dans la zone de mélange des eaux des deux cours d'eau, le choix de l'outil de calcul peut être restreint aux outils bidimensionnels, auquel cas la limite aval en pleine zone de confluence n'est sans doute pas correctement choisie.

- Forçage par un aménagement hydraulique

Enfin, le forçage de la limite hydraulique aval peut être le fait d'un aménagement hydraulique contrôlant (« réglant ») un bief. Il suffit alors de déterminer la loi hydraulique de fonctionnement comme pour un ouvrage hydraulique compris à l'intérieur du secteur d'étude.

2.5.2.2 Laisses de crues

Typologie générale des laisses de crues, recueil des laisses de crues

On désigne sous le vocable de « laisses de crues » toutes les informations relatives aux niveaux d'eau atteints par une crue donnée, en un endroit donné. C'est donc une information éminemment géographique.

A moins qu'une crue survienne durant l'étude hydraulique (ce qui n'est pas si rare !), les laisses de crues sont une information portant sur un événement passé, et qui résulte nécessairement d'un travail de collecte. Or, cette collecte porte simultanément sur des matériels d'information très variés, qui ne sont chacun qu'une approche fragmentaire de l'événement hydrologique dont il témoigne.

les marques durables

Les marques pérennes laissées par nos prédécesseurs prévoyants sur les monuments publics, dans les rues, les lavoirs, sur les culées des ponts, sous forme de trait profondément gravé dans la pierre ou encore de plaque informative apposée sur le support, correspondent généralement à une information fiable du niveau maximum atteint par la crue, qu'il ne reste plus qu'à retrouver sur le site, puis à niveler.

A condition naturellement que cette marque, ou son support, n'ait pas été déplacé depuis sa création : pierre déplacée, plaque déplacée ou masquée sous un crépi sont monnaie courante !

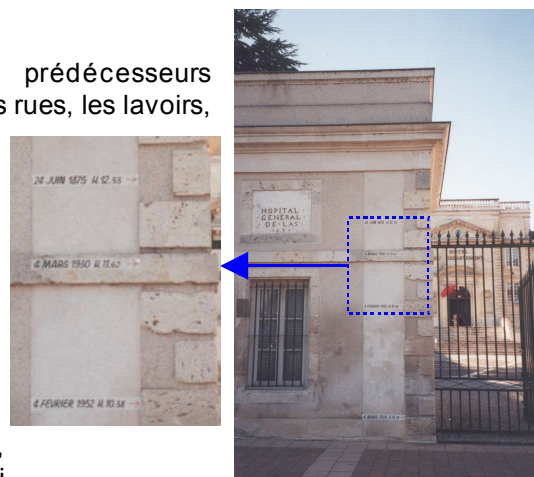


Figure 2 - Repères de crue sur la façade de l'hôtel du département du Lot-et-Garonne

les informations historiques

Les informations de niveaux d'eau de crues historiques peuvent également être trouvées dans les archives, anciennes ou récentes (par transcriptions successives d'une information ancienne).

Ces informations sont hélas trop souvent inexploitable : le système de référence altimétrique n'est que rarement indiqué, ou bien le niveau est indiqué en hauteur relative par rapport à un point de référence (échelle limnimétrique, ouvrage de génie civil, etc.) qui n'existe plus, ou encore le lieu exact n'est pas indiqué, quand il n'y a pas tout simplement une erreur de transcription des données manuscrites (un 3 devenant un 8, un 26,40 devenant 24,60 !).

Pour être utilisables, les informations historiques doivent être exploitées par une équipe pluridisciplinaire comprenant en particulier un historien. Il s'agit en effet de remettre la lecture dans le contexte de l'époque (topographie, cotes, ouvrages, etc.) et de la retranscrire dans la situation actuelle.

↳ les laisses de crues récentes

Lorsque la crue est assez récente, elle peut avoir laissé des traces dans l'environnement : débris flottants abandonnés par la crue à l'amorce de la décrue (ce qui correspond strictement à la définition – maritime – d'une laisse) dans les arbustes, les clôtures, les champs, traces de sédiments fins (boues) ou de végétaux aquatiques (lentilles) abandonnés sur un mur, un tronc d'arbre, une pile de pont, etc. Ces traces sont des témoignages indirects du niveau maximum atteint par l'eau, qui était nécessairement au-dessus du niveau de ces traces.



Figure 3 - Laisse de la crue de 2001 sur la Vesle à Braine (02)

↳ les photographies

Les photographies prises par des particuliers pendant la crue fournissent un complément d'information essentiel pour consolider une laisse de crue. Elles peuvent même constituer la seule information disponible. Leur intérêt est immense pour apprécier le niveau au moins atteint par le maximum de la crue (et d'autant plus pertinente qu'elles ont été prises peu de temps avant ou après le pic de crue), mais encore faut-il qu'apparaissent, sur ces photographies, des éléments de référence visuelle de hauteur (poteaux électriques ou de signalisation, bornes, parpaings, etc). Les photographies aériennes (droites ou obliques) fournissent également un angle de vue précieux, à condition que les limites du champ d'expansion soient lisibles et proches d'éléments visuels de référence de positionnement.



la Vltava de 2003

↳ les témoignages

Les témoignages des victimes et des riverains sont toujours à recueillir, car a minima, ils fournissent des indications chronologiques et / ou qualitatives sur le déroulement de la crue (mise en charge ou non d'ouvrages, existence d'écoulements secondaires, etc), et a maxima, des informations (photographies, indication d'un niveau maximum atteint, souvenir matérialisé de l'événement) précieuses. Le démarchage des riverains, des pompiers, des mairies, et autres services de proximité, permet, outre de récupérer ces informations, de faciliter l'adhésion de ces populations au « constat » hydraulique que constituent ces laisses



de crues. Cela prend du temps (environ 10 km de cours d'eau par jour à 3 personnes, l'une faisant du porte à porte, les deux autres nivelant l'information).

La mémoire, au bout de quelques jours, surestime le risque auquel on a personnellement échappé. A contrario, les propriétaires, occupants, élus, sous estiment considérablement le risque qu'ils ont subi (Barzac, Goudargues, Nimes, etc.) et vont même jusqu'à le nier (Roquebillières, Goudargues, etc.)

Quelques années après, des photos des laisses de crues, lorsqu'elles ne sont pas cotées, sont quelquefois considérées comme truquées.

Seules les photographies des laisses, leurs coordonnées, leur marquage précis et/ou leur repérage altimétrique immédiat (laisses pas encore sèches) permettent d'avoir l'image d'une ligne d'eau au paroxysme du phénomène. Ceci demande une organisation prévisionnelle sans faille (DDE du Gard en 2002) et la disposition de géomètres en urgence au delà du niveau local.

Les analyses de cohérence

↳ la non-linéarité des profils en long

Bien que la pente moyenne de chaque cours d'eau influence de manière prépondérante le profil en long de la ligne d'eau lors d'une crue, d'autres facteurs viennent perturber la ligne d'eau en régime graduellement varié. Ainsi, un rétrécissement de la largeur de la vallée submersible, la réduction ou l'augmentation localisée du nombre de bras et, par conséquent de la section mouillée totale disponible en lit mineur pour l'écoulement, peuvent influencer la ligne d'eau sur plusieurs kilomètres. A cause de ces influences liées aux irrégularités géométriques du lit de chaque cours d'eau, il n'est pas prudent de s'astreindre à ne conserver qu'une poignée de laisses de crues jugées « valides » ou « fiables » sans rien conserver des informations de « moindre fiabilité ». En effet, la tentation serait alors grande de considérer, entre deux laisses de crues réputées fiables, mais distantes de quelques kilomètres, que le profil en long est linéaire entre ces altitudes, comme si le lit était uniforme entre deux laisses de crue.

La complexité de la réalité hydraulique d'un cours d'eau ne peut être traitée avec justesse par une telle approche « uniformisante ». Le gestionnaire des données en général, et le maître d'ouvrage de l'étude hydraulique en particulier, ont intérêt à ce que, entre les laisses de crues réputées les plus fiables, le prestataire dispose d'un maximum d'informations hydrauliques intermédiaires rendant compte, même avec une précision ou fiabilité moindre, des tendances de fluctuations du régime graduellement varié qui est la généralité des cours d'eau.

Dans le cas le plus général, lorsqu'aucun gestionnaire n'a véritablement fait ou pu faire l'inventaire critique des données hydrauliques, la fiabilité des laisses de crues n'est pas connue a priori, et le prestataire doit donc analyser la cohérence des informations dont il dispose ou qu'il a recueillies sans préjuger de celles qui seront, à terme, réputées fiables.

Cette analyse peut être monodimensionnelle ou bidimensionnelle.

↳ l'analyse du profil en long

Monodimensionnelle, elle consiste à reporter sur un axe curviligne suivant le cheminement de l'écoulement principal supposé du cours d'eau, les altitudes nivelées des laisses de crues disponibles, sans en écarter aucune. Un ajustement linéaire par segments (type moyenne mobile) permet d'identifier facilement les laisses de crues anormales, qui s'écartent manifestement des tendances de l'écoulement moyen.

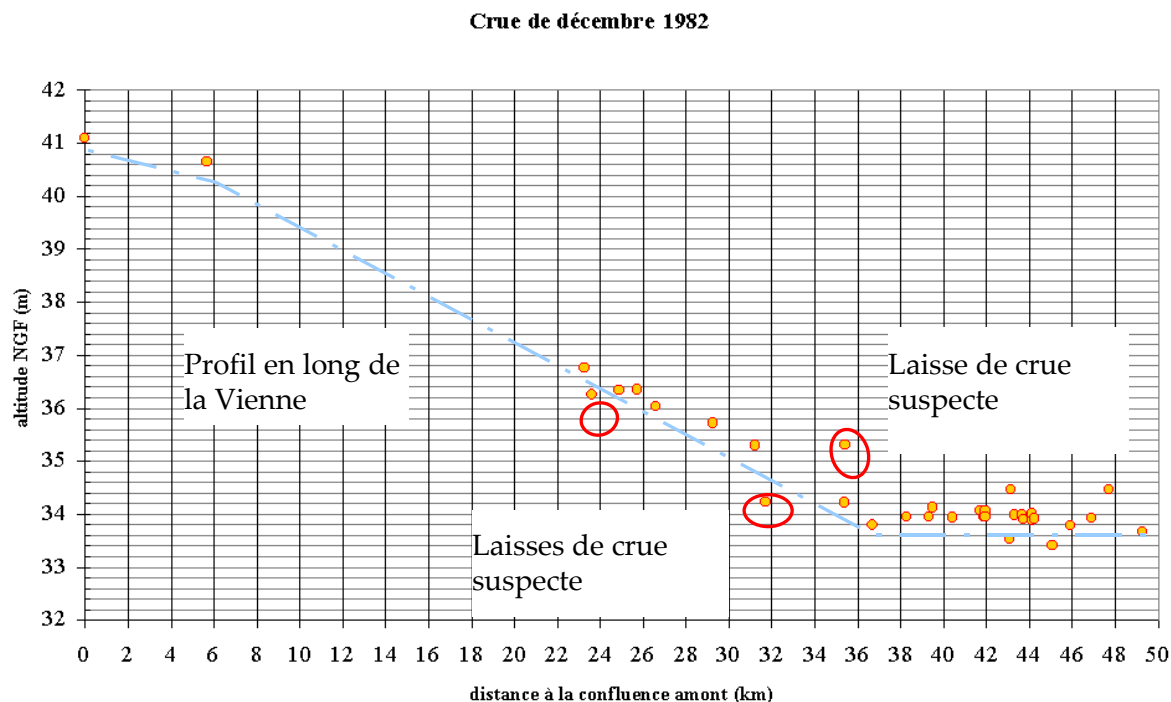


Figure 5 : crue de décembre 1982 sur la Vienne, de la confluence avec la Creuse jusqu'à la confluence avec la Loire ; laisses de crues suspectes

Attention toutefois à ne pas éliminer hâtivement ces données déviantes : une analyse spécifique doit préalablement envisager que la cause de l'écart constaté soit :

- une erreur de frappe (beaucoup plus fréquente qu'il n'y paraît), sur les coordonnées X, Y ou Z, commise par le géomètre ou lors de la saisie des données du géomètre dans le récapitulatif des laisses de crues ;
- une perte de charge singulière, liée à la présence (à vérifier) d'une ligne structurante faisant une obstruction significative, telle que remblai routier ou ferroviaire, digue, ensemble densément bâti, etc (cf. paragraphe 3.2.) ;
- une confusion dans les dates de la crue dont la laisse est représentative : lorsque des crues moyennes se succèdent en peu de temps, la mémoire collective peut avoir du mal à les distinguer (comme les crues de décembre 1993 et janvier 1995 sur le bassin Aisne et Oise) ;
- un phénomène connexe à la crue, comme par exemple : la mise en charge d'une zone en bordure de champ d'expansion par un petit affluent ou un exutoire d'eaux urbaines.

L'un des principaux intérêts de l'analyse de cohérence monodimensionnelle est sa stabilité par rapport à l'intensité de crue considérée, pourvu que le secteur d'étude ne soit pas sous l'influence d'une confluence ou d'une marée. Ainsi, il est possible de comparer les profils en long de deux crues d'intensités différentes, voire de compléter des informations manquantes pour l'une crue à partir de tendances identifiées dans l'autre crue.

☞ L'analyse des courbes de niveaux de la surface libre

Bidimensionnelle, elle nécessite des approches plus sophistiquées, et surtout, des données positionnées en plan avec précision. Si un axe principal d'écoulement est identifiable, il est possible d'appliquer une régression linéaire sur le rapport entre les différences d'altitudes et les distances entre les laisses de crues deux à deux, qui permet d'identifier les laisses de crues qui sortent du lot. Si on dispose d'un outil de cartographie et si les laisses sont suffisamment nombreuses, il est possible de créer un modèle numérique de la surface des

écoulements. Les laisses de crue qui sont représentatives de l'écoulement moyen ne doivent pas creuser singulièrement ces surfaces reconstituées.

Les biais et rectifications

les incertitudes générales

Le recueil d'un maximum de laisses de crues et l'analyse de cohérence qui s'ensuit peut décourager le maître d'ouvrage profane en matière d'hydraulique, tant ils jettent un certain doute sur une grande partie des informations. Car, même lorsque l'analyse de cohérence ne conduit pas au rejet de certaines informations aberrantes, elle souligne l'éparpillement des informations autour de la moyenne mobile que représente le profil en long. En fait, il ne faut pas se méprendre sur la précision réelle des laisses de crue, et sur l'incertitude probable qui les accompagne systématiquement.

Chaque type de laisse de crue comporte un biais lié à sa nature même. Ainsi, les traces physiques laissées par la crue une fois la décrue amorcée ne sont pas représentatives du niveau maximum atteint. On a ainsi pu montrer sur la Vesle, rivière affluent de l'Aisne dans le département de l'Aisne, par recoupement d'informations de natures différentes, que les traces nettes de sédiments sous-estimaient de 20 à 30 cm le niveau d'eau du maximum de la crue qui les avaient générées. De même, les nivellements de laisses de crue le long des rivières, en milieu rural, ne sont pas d'une précision égale aux levés topographiques en milieu urbain, et comportent une imprécision de +/- 10 cm environ.

En plus de ces incertitudes irréductibles, que le prestataire peut mettre en évidence lorsqu'il dispose de plusieurs sources d'informations en un lieu donné, les laisses de crue peuvent comporter des biais non pas de mesure, mais de représentativité : leur adéquation avec l'information recherchée par le prestataire au sujet de l'écoulement n'est pas toujours parfaite. En effet, le prestataire va interpréter ces laisses de crue à travers le prisme d'un profil en long «moyen», ou d'une modélisation filaire qui comporte des hypothèses d'écoulement «moyen». Or, la laisse de crue n'est pas forcément représentative de cet écoulement moyen : elle peut refléter des conditions locales que le prestataire devra interpréter pour en déduire une information de nature homogène avec d'autres informations relatives à l'écoulement moyen, et avec ses outils de calcul en général.

Enfin, il faut en général compter avec une concentration d'informations intéressante en milieu urbain, et une quasi-totale absence d'information en rase campagne.

les incertitudes particulières

Ainsi, lorsque la laisse de crue est située dans une courbe, elle peut être fortement influencée par la courbure.

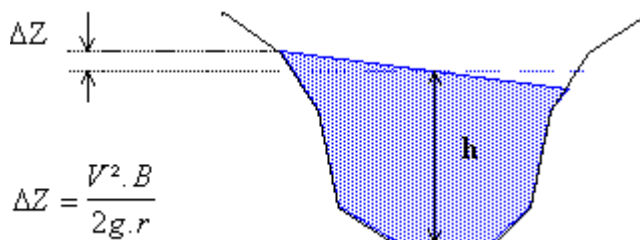


Figure 7 : surélévation liée à une courbe

Lorsqu'elle est prise derrière un obstacle qui s'oppose à l'extension de la zone inondée (merlon, digue, route, cave, etc), elle peut n'être que l'expression des échanges souterrains entre la nappe d'accompagnement de la rivière en crue et le terrain où la laisse est prise.

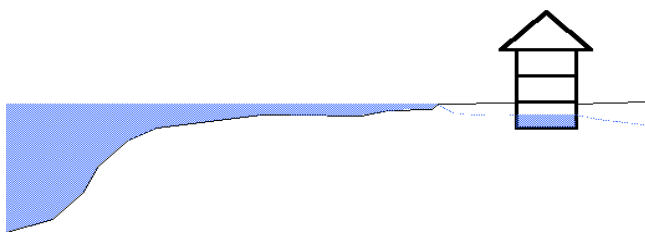


Figure 8 : perte de charge liée aux écoulements souterrains

En milieu urbain, selon qu'elle est prise sur le mur qui fait face à l'écoulement, qui est longé par l'écoulement, ou qui est en arrière de l'écoulement, la composante cinétique de la charge hydraulique sera plus ou moins incluse dans le niveau résultant. Autrement dit, le niveau visualisé est compris entre le niveau d'eau statique et le niveau de la charge

hydraulique :

$$Z < \text{laisse_de_crue} < Z + \frac{V^2}{2g}$$

De même, lorsque des encombres flottants, souvent appelées improprement « embâcles », viennent obstruer une ouverture hydraulique, la laisse de crue résultante peut être significativement surélevée par l'énergie cinétique.



Figure 9 : encombres flottants après une crue

Sur les murs des maisons, la nature du revêtement peut également fausser l'information, selon la capillarité, le clapotis, etc. L'amplitude de cette perturbation est variable selon la vitesse des bateaux créant des ondes secondaires de batillage, la vitesse du vent levant un train de vagues, la porosité du revêtement de surface des murs.

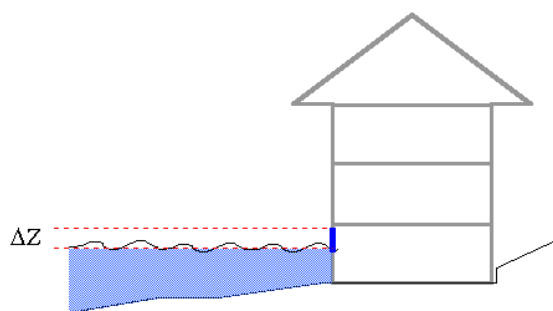


Figure 10 : fluctuations d'un niveau contre un mur de maison

Il importe que le prestataire analyse les laisses de crue dont il dispose non pas dans l'esprit d'écarter celles qui ne s'ajustent pas directement sur ses profils en long de référence, mais dans l'esprit de considérer ses laisses de crue comme des intervalles d'altitudes probables dont il doit calculer l'amplitude au cas par cas.

↩ les perturbations liées à des modes de fonctionnement distincts

D'une crue à l'autre, le fonctionnement général peut être perturbé par l'hétérogénéité du réseau hydrographique. Ainsi, lorsque la zone étudiée est sous l'influence du remous d'un autre cours d'eau, les laisses de crues pour plusieurs crues équivalentes sur le cours d'eau étudié peuvent présenter des écarts importants dans cette zone de remous si l'autre cours d'eau impose des remous différents, c'est-à-dire, s'il est lui-même dans des conditions hydrologiques sensiblement différentes.

Une manière d'identifier la longueur de cours d'eau sous l'influence d'un tel remous de confluent est de considérer les données hydrauliques disponibles sur le cours d'eau pour une crue exceptionnelle sur le confluent.

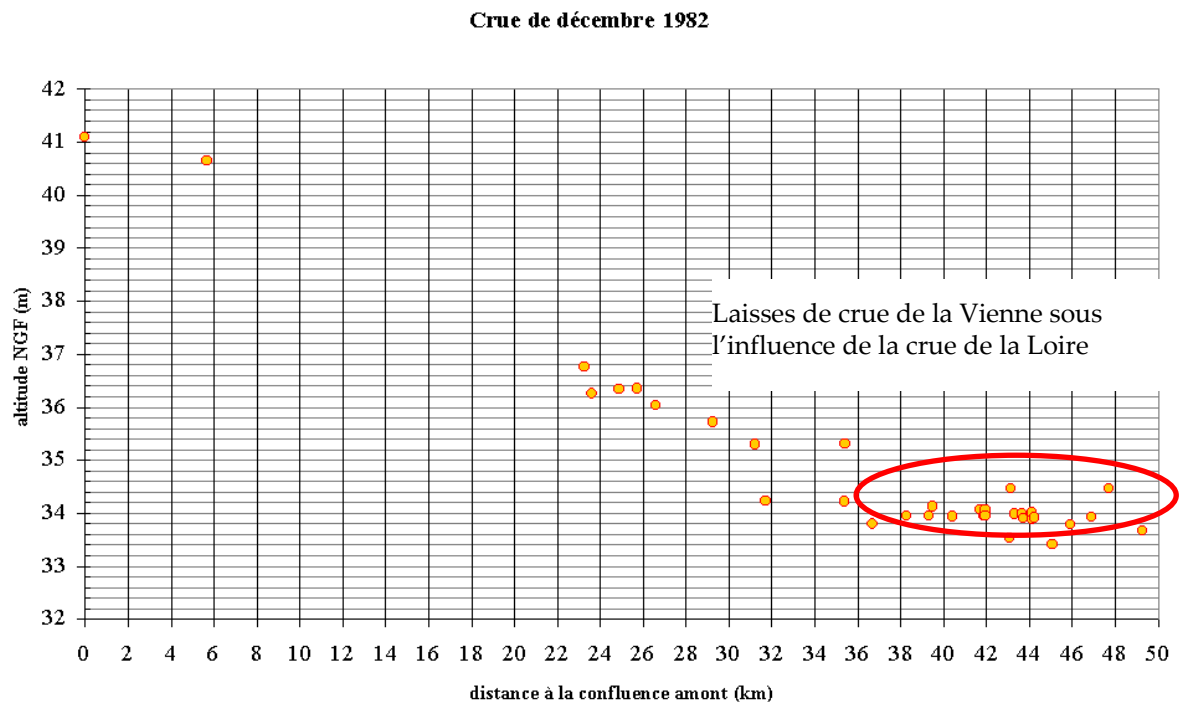


Figure 11 : crue de décembre 1982 sur la Vienne, de la confluence avec la Creuse jusqu'à la confluence avec la Loire ; zone de remous de la Loire

De plus, le profil en long des laisses de crues n'étant pas forcément une réalité physique (cf. chapitre 2 – analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'études), il convient de tenir compte de l'aspect dynamique des hydrogrammes de crues, qui peuvent être laminés sur un tronçon et s'atténuer fortement vers l'aval. Cette composante dynamique des événements passés est souvent perdue, seul le maximum de l'événement étant mémorisé.

Il peut exister, pour des crues du 19^{ème} siècle notamment, des récits tragiques des crues catastrophiques, fournissant un luxe de détails chronologiques qui permettent de reconstituer la dynamique de l'événement. Mais en dehors de cela, il faut se contenter d'être vigilant par rapport à la possibilité de visualiser, pour deux crues données, leurs profils en long se croisant : sur la partie amont, l'un serait au-dessus de l'autre, tandis que sur la partie aval, l'autre repasserait dessus.

Par ailleurs, lorsqu'on compare les profils en long de laisses de plusieurs crues, il convient de prendre garde à l'éventuelle évolution des fonds. Lorsque le lit est tenu, depuis des décennies, par des moulins et autres ouvrages transversaux, il est fort probable que les profils en long des crues pendant cette période n'aient pas souffert d'une évolution nécessairement modérée ou localisée des fonds. Par contre, si un entretien de chenal profond a cessé au beau milieu de cette période, ou encore, si un ou plusieurs ouvrages transversaux ont été supprimés (cf. le cas du barrage de Maison-Rouge sur la Vienne), sans oublier les conséquences d'une exploitation outrancière des granulats de lit mineur avant que la loi ne les interdise, il y a toutes les chances pour que le profil en long des fonds soit perturbé sur de grandes longueurs, entraînant une perturbation significative des profils en long des crues.

Les indices d'une telle mobilité des fonds peuvent être de plusieurs ordres :

- déchaussement d'ouvrages (pont Wilson sur la Loire à Tours), effondrement de berges sur des linéaires conséquents, concentration des écoulements dans un chenal étroit et délaissé de bras secondaires, trahissent une évolution des fonds à la baisse ;
- affleurement de vases, dépôt de bancs de sédiments, bouchure de vannes, sont des indices d'évolution des fonds à la hausse.

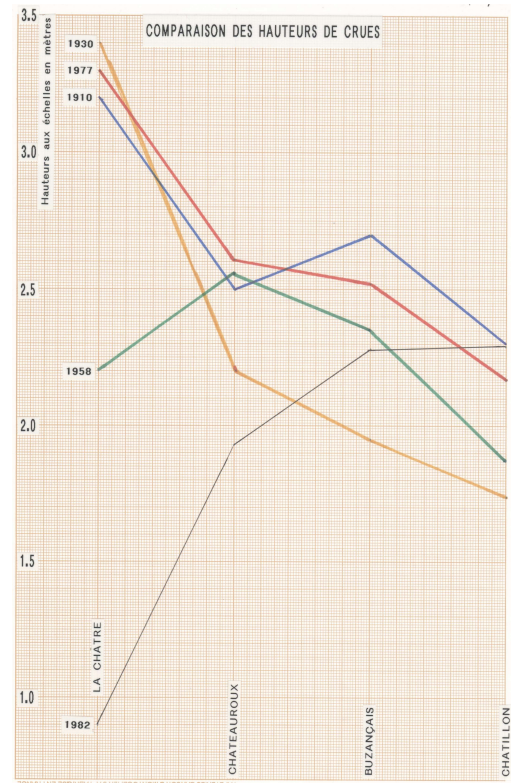
Il faudra cependant prendre garde à ne pas généraliser trop vite des indices ponctuels de mobilité : les cours d'eau présentant une dynamique sédimentaire saine voient souvent des formes migrer le long du linéaire, provoquant en un point donné d'observation des fluctuations significatives, sans qu'une évolution globale à la hausse ou à la baisse soit à craindre. Les documents historiques permettront souvent de relativiser les analyses portant sur ces indices.

Lorsque l'évolution globale du profil peut être quantifiée et datée, il est possible d'effectuer une correction des profils en long de laisses de crues anciennes pour effectuer des comparaisons avec les profils en long des crues les plus récentes.

L'information consolidée

La capitalisation de ce travail conséquent sur les laisses de crues est nécessaire et même, d'utilité publique. Elle doit se faire sous forme de fiches de laisses de crue, dont le format exact est laissé à l'appréciation de chacun, mais qui doit comporter, sous une forme ou une autre, les éléments suivants :

- position exacte sur une carte récente (SCAN 25, carte au 1/25 000ème), adresse précise, lieu-dit et nom de commune, et éventuellement, coordonnées en géoréférencement ;
- nature et date de l'information, nature (et date) du nivellement (terrestre optique, DGPS, etc.) ;
- date de la crue dont il est question, et altitude de la laisse avec mention obligatoire du système de référencement altimétrique ;
- photographie du lieu précis où l'information est prise ;
- commentaire de l'hydraulicien sur la fiabilité et/ou la représentativité de l'information.



A l'issue de l'analyse des laisses de crue, ou des études ultérieures portant sur ce secteur, il se peut que ce dernier commentaire de l'hydraulicien soit revu par un autre hydraulicien, qui interpréterait différemment la même information. Ou encore, il est possible que rapidement, l'information soit classée « douteuse » ou « non-représentative ». Il ne faut pas pour autant éliminer la fiche de telles laisses de crue, car l'information pourrait resurgir quelques temps plus tard, et perturber durablement les analyses futures si l'on ne se souvient pas qu'elle fut éliminée. Il vaut mieux conserver toutes les informations, en mentionnant clairement le statut des informations douteuses, et en les écartant seulement lors de l'analyse des informations exploitables.

Un Système d'Information Géographique est tout indiqué pour capitaliser ces fiches. La DIREN Centre et le LRPC de Blois, par exemple, ont mis en place ce type de SIG. La gourmandise des bases de données nécessite la mise en œuvre de moyens informatiques spécifiques pour éviter la congestion rapide du SIG qui le rendrait inopérant. Lorsqu'une telle base de données existe, il importe que le commanditaire de l'étude s'assure, par des prescriptions techniques adaptées aux géomètres mandatés pour réaliser le nivellement, que le format de rendu de ces travaux sera au moins compatible, et au mieux, optimal, en vue d'une intégration de ces nouvelles informations dans la base de données.

Enfin, dans le cadre de l'étude hydraulique, il reste à réduire au strict minimum ces intervalles de confiance dans lesquels on situe les laisses de crue, en recourant à une logique de dévalaison systématique de l'amont vers l'aval. En effet, sauf situation très particulière (écoulement en régime torrentiel, normal ou local), le profil en long constitué par les laisses de crue devrait présenter une décroissance systématique de l'amont vers l'aval. Il en résulte la mise en œuvre de règles simples de filtre des informations :

- si $Z_{aval}^{min} > Z_{amont}^{min}$ alors Z_{amont}^{min} est ajusté à Z_{aval}^{min}

- si $Z_{aval}^{max} > Z_{amont}^{max}$ alors Z_{aval}^{max} est ajusté à Z_{amont}^{max}

Ce type de filtre, systématisé dans un travail d'interprétation de photographies aériennes pour établir les altitudes de référence d'une crue (Cemagref de Montpellier, Damien RACLOT), permet de réduire notablement les intervalles d'incertitude liés aux laisses de crue.

2.5.2.3. Lois de fonctionnement d'ouvrages hydrauliques

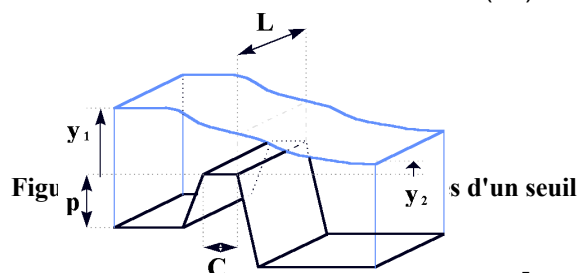
Catalogue de lois

On désigne ici par ouvrage hydraulique les ouvrages qui exercent un contrôle sur l'écoulement. Les endiguements, par exemple, en sont exclus, car s'ils ont une influence indéniable sur la ligne d'eau lors des crues, ils n'ont aucune fonction de contrôle longitudinal. Par contre, les seuils, épis, les barrages de navigation, micro-centrales hydroélectriques, les stations de pompage, les vannages en sous-verse et les portes à marées sont autant de types d'ouvrages qui opèrent un contrôle sur la ligne d'eau, au point qu'il est nécessaire d'intégrer leur fonctionnement sous forme d'une loi hydraulique de correspondance entre temps, débit, et niveau d'eau.

☞ Les seuils

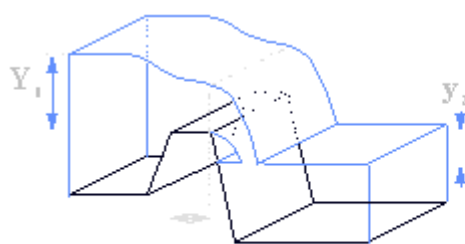
Les seuils sont des ouvrages transversaux à l'écoulement, placé en travers du lit mineur, au fond de l'eau, et saillant au-dessus du fond d'une hauteur donnée, qu'on appelle « pelle », vue depuis l'amont. Cette pelle fait obstacle à l'écoulement, qui est contraint de la surmonter pour poursuivre sa dévalaison. Selon le rapport entre la pelle et la hauteur normale de l'écoulement, la gêne occasionnée par le seuil peut se traduire par un exhaussement au droit de l'ouvrage, et, par remous, sur toute une longueur en amont de l'ouvrage, d'une hauteur inférieure à la hauteur de pelle. La forme du seuil en amont et en aval influent sur l'ampleur de l'exhaussement, et le niveau d'eau en aval du seuil, susceptible d'entraver le franchissement de l'obstacle par simple accélération de l'écoulement, peut aggraver la situation (on parle alors de noyage). Les seuils ont fait l'objet de nombreuses études, et d'autant de formulations de lois hydrauliques qu'il serait vain de détailler ici. Pour plus de détail, nous conseillons de se reporter à la notice de S. Ladreyt éditée par le CETMEF en 2005. Il suffira de retenir, pour le principe, que la formule classique de fonctionnement hydraulique d'un seuil est fonction

- de l'épaisseur relative de la crête C par rapport à la charge hydraulique comptée au-dessus du niveau de la crête (Y_1) :

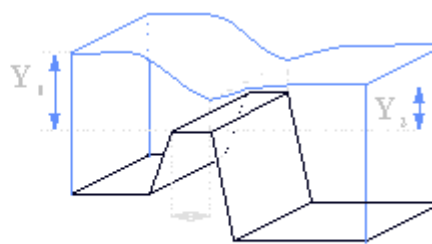


- si $C < \frac{Y_1}{2}$ le seuil est « **mince** » par rapport à la charge hydraulique amont
- si $C > \frac{2Y_1}{3}$ le seuil est « **épais** » par rapport à la charge hydraulique amont

et, en fonction de cette épaisseur, de la gêne occasionnée (ou non) par le niveau d'eau en aval à l'écoulement sur la crête (on parle de dénoyage ou de noyage) :



Seuil dénoyé



Seuil noyé

Figure 14 - Noyage / dénoyage des seuils

Seuil mince	$y_2 < 0$	écoulement <u>dénoyé</u>	$Q_{dénoyé} = \mu \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot Y_1^{\frac{3}{2}}$ avec $\mu = 0,42$
	$y_2 > 0$	écoulement <u>noyé</u>	$Q_{noyé} = K_{noyage} \cdot Q_{dénoyé} = K_{noyage} \mu \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot Y_1^{\frac{3}{2}}$
Seuil épais	$\frac{Y_2}{Y_1} < 0,66$	écoulement <u>dénoyé</u>	$Q_{dénoyé} = \mu \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot Y_1^{\frac{3}{2}}$ avec $\mu = 0,385$
	$\frac{Y_2}{Y_1} > 0,82$	écoulement <u>noyé</u>	$Q_{noyé} = \mu \cdot L \cdot y_2 \cdot \sqrt{2g(Y_1 - y_2)}$

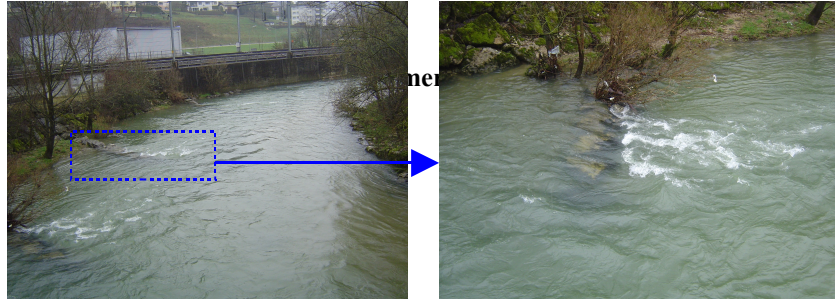
Les valeurs classiques fournies pour le coefficient de débit μ peuvent varier de manière substantielle sur un cas réel, en fonction de la géométrie particulière du seuil considéré (des seuils particulièrement profilés, de type Creager par exemple, évacuent mieux les débits que des seuils à arrêtes rectangulaires), de l'état de surface de la crête (usure du béton, développement de végétation, déjoints des pierres) ou encore de l'accompagnement des lignes de courant par la géométrie du lit en amont (un seuil longitudinal, placé le long de la berge, aura, à géométrie égale, une capacité d'évacuation moindre qu'un seuil placé orthogonalement au courant).

Il conviendra donc, dans le cas de seuils existants, d'étalonner si possible le coefficient de débit de l'ouvrage en procédant à (au moins) une mesure simultanée du débit et des niveaux d'eau amont et aval. Il va de soi que la géométrie (L , C , $Z_{crête}$) du seuil devra être finement décrite, avec précision.

↳ Les épis

Les épis sont des ouvrages biais ou longitudinaux placés dans le lit mineur sans le barrer sur toute sa largeur. Ils servent généralement à concentrer les écoulements au centre du lit pour constituer un chenal profond, et piègent les sédiments (un peu à la manière des épis maritimes qui « fixent » les plages).

La mise en œuvre de lois de type « seuils partiels » sur la fraction de largeur concernée par l'épi, et de lois hydrauliques



classiques sur le restant de la largeur, ne donnent pas satisfaction (cf. études CETMEF 1999-2000). Il est sans doute plus juste de distinguer deux types de fonctionnement hydraulique : aux basses eaux, lorsque l'eau dépasse la crête de l'épi de moins de la moitié de la hauteur de « pelle » de l'épi, il faut considérer que tout l'écoulement se concentre dans la section chenalisée et ajuster sa rugosité en conséquence, tandis qu'en hautes eaux, lorsque l'eau dépasse la crête de l'épi d'au moins la hauteur de « pelle » de l'épi, l'écoulement occupe toute la section disponible sans que l'épi exerce une gêne en terme de niveaux d'eau et de vitesse moyenne autre que l'obstruction relative de section mouillée. Toutefois, les écoulements franchissant le seuil immergé étant réorientés orthogonalement à la crête de l'épi, ils peuvent avoir des conséquences significatives sur les phénomènes d'érosion localisés dans cette direction.

↳ Les barrages de navigation

Les barrages de navigation sont des ouvrages transversaux réalisant une bouchure du cours d'eau de manière à obtenir un niveau d'eau supérieur au niveau normal. Pour les besoins de la navigation, ce niveau d'eau imposé est généralement constant ou presque, et donc, la bouchure réalisée est partiellement de type fixe (maçonnerie latérale et maçonnerie de fond, se comportant comme un seuil), et partiellement de type mobile (vannage escamotable en tout ou partie en fonction des fluctuations des débits naturels du cours d'eau).

Sur toute la gamme de fonctionnement d'un tel barrage de navigation, quel que soit le débit du cours d'eau régulé, le niveau d'eau imposé est celui de la consigne de navigation, sensiblement constante. Lorsque le débit naturel suffit à provoquer une hauteur d'eau propice à la navigation, le barrage de navigation n'a plus d'utilité, et l'ensemble de la bouchure mobile est escamoté. Ce débit est appelé débit d'effacement, et sur certaines rivières, détermine le niveau des Plus Basses Eaux Navigables (P.B.E.N.) (sous-entendu, plus basses eaux navigables sans assistance artificielle d'une régulation par le barrage de navigation). Au-delà du débit d'effacement, le barrage mobile se comporte comme se comportent ses parties fixes.

↳ Les microcentrales hydroélectriques

Les microcentrales hydroélectriques sont des ouvrages de production d'énergie (« houille blanche ») souvent construit en dérivation ou en parallèle direct d'un barrage mobile. A partir d'une différence de charge hydraulique entre l'amont et l'aval, une turbine est mise en mouvement pour produire l'électricité. On peut encore trouver d'anciens moulins qui, sur le même principe, actionnent des mécanismes divers, mais la plupart du temps, la partie de mécanisme exploitant la motricité hydraulique est désaffectée. La section de la turbine, et notamment, de ses voies d'amenée et de rejet, conditionnent, en fonction de la différence de charge hydraulique entre l'amont et l'aval, le débit dérivé dans la turbine.

Cette différence de charge est générée et contrôlée par un barrage mobile qui maintient le niveau amont aux altitudes requises : lorsque la toponymie ou l'analyse de terrain permettent d'identifier la présence d'un moulin ou d'une microcentrale hydroélectrique, il est certain qu'on peut trouver, en parallèle ou en dérivation, un barrage mobile qui en assure (assurait) la régulation de charge amont. Lorsque le débit dans le cours d'eau devient proche, voire inférieur au débit de fonctionnement des turbines, le cours d'eau est purement et simplement dérivé à travers les turbines de facto. Ceci ne peut être qu'une vue de l'esprit, puisqu'en fait, l'imposition de débits réservés dans les cours d'eau devrait prohiber ce type de situation. Par ailleurs, lorsque la différence de charge entre l'amont et l'aval se réduit (en cas de crue, notamment), les turbines ne peuvent plus être mises en mouvement pour produire de l'électricité, et sont généralement mises en panne.



Figure 16 – Microcentrale sur la Mayenne (53 © photo DHI)

↳ Les stations de pompage

Les stations de pompage sont des ouvrages de prise d'eau forcée à un débit imposé par l'engin. Les pompes usuelles ont un débit nominal de quelques dizaines à quelques centaines de litres par seconde. Les pompes les plus puissantes atteignent de un à dix mètres-cubes par seconde. Au-delà, il s'agit d'engins exceptionnels ou de pompes usuelles placées en parallèle.



Figure 17 - Station de pompage sur la Somme à Abbeville (80)

↳ Les vannages en sous-verse

Les vannages en sous-verse sont des dispositifs mobiles qui obstruent la section d'écoulement et ne la libèrent qu'en commençant par le fond du cours d'eau. La colonne d'eau bloquée à l'amont pèse de tout son poids sur l'ouverture de fond et, en fonction du contre-poids exercé par la colonne d'eau en aval, expulse un débit à travers ce qu'on appelle un orifice hydraulique. On parle d'orifice hydraulique dès lors que l'écoulement en fonctionnement normal mouille tout le périmètre de la face amont de la bouchure, c'est-à-dire, fonctionne en charge, par opposition à la surverse, dont une partie se fait à surface libre. Les pertes de charge générées par les formes de l'orifice ont une incidence forte, car les vitesses de franchissement sont généralement élevées. D'autre part, l'écoulement expulsé vers l'aval se mêle à la colonne d'eau aval en formant un tourbillon en fer à cheval (à fort potentiel érosif) sur toute une zone de mélange en aval. Il faut généralement prévoir des dispositifs de dissipation de cette énergie en aval.

↳ Les portes à marée et les portes de garde

Les portes à marée ou les portes de garde sont des dispositifs escamotables qui visent à empêcher la remontée, depuis l'aval, d'un remous conséquent, de type marée ou crue sur un cours d'eau important proche. Il peut également s'agir d'empêcher la remontée d'intrusions salines dans un cours d'eau servant à l'irrigation de terres agricoles. Il s'agit souvent de portes busquées, mais il peut également s'agir de vannes en sous-verse manœuvrables en charge. Lorsque le cours d'eau principal ou la marée force le niveau d'eau au-dessus d'une limite jugée admissible, la porte est fermée, coupant la zone en amont de ce remous. La conséquence directe est évidemment que l'eau dévalant le cours d'eau ainsi fermé s'accumule à l'amont de la porte de garde. Ce type d'aménagement n'a donc un intérêt que si la submersion liée à l'accumulation en amont de la porte de garde est moins grave que le remous de la marée ou de la crue dont on se prémunit par fermeture de la porte.

↳ Les siphons

Lorsque deux éléments hydrographiques se croisent sans que l'aménageur souhaite que les eaux se mélangent, une solution usuelle est de construire un siphon qui permet de faire passer les eaux de l'un des éléments hydrographiques (par exemple, un cours d'eau) sous l'autre (par exemple, un canal).

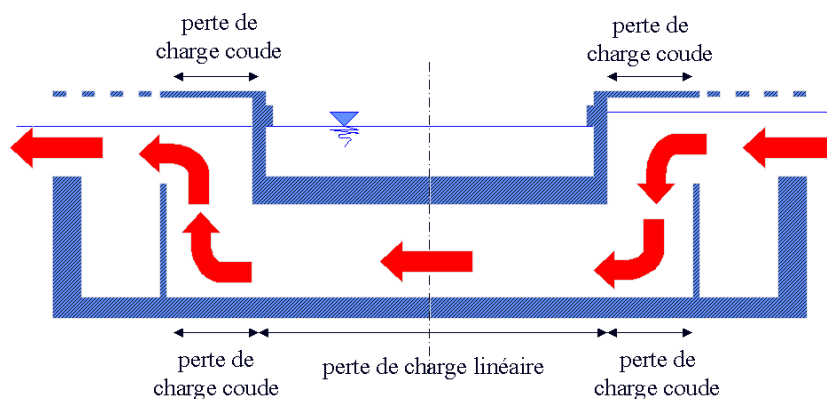


Figure 18 - Principe de fonctionnement d'un siphon

L'écoulement franchit le siphon en instaurant une pente de charge surmontant les pertes de charge singulières générées à l'intérieur du siphon (prise d'eau, coude d'entrée, linéaire rugueux, coude de sortie, rejet et systèmes de dégrillage amont et aval).

Ces pertes de charge sont estimées à l'aide des lois de Colebrook (pertes de charge linéaires par frottement dans les conduites) et des lois de pertes de charge singulière à la Borda, avec des paramètres fournis par la littérature technique (Mémento des pertes de charge Idel'Çik, édition Eyrolles page 198).

Étalonnage de lois

L'expérience montre à quel point les formules académiques, pour la plupart empiriques, donnent des résultats dispersés pour une même situation. A niveaux d'eau donnés, le débit peut fluctuer de 15 à 30% selon la formule d'évacuation de débit sur le seuil retenue. Cette erreur est toutefois à relativiser, puisque finalement, cela fait des lois de fonctionnement hydraulique des seuils des objets assez stables en fonction des incertitudes sur les débits, lorsque le résultat de calcul recherché et sur lequel porte l'exigence de précision est le niveau d'eau.

Lorsqu'on ne veut pas laisser au hasard heureux le soin de régler le problème de la forte variabilité des lois hydrauliques des ouvrages, on se doit de demander au prestataire un

étalonnage de ses lois de fonctionnement d'ouvrages hydrauliques, quelle que soit la loi académique, théorique ou empirique, qu'il décide de retenir.

Cet étalonnage doit se baser sur un jeu de données hydrauliques à recueillir (lorsqu'un suivi de type « main courante » existe, tenu à jour par des agents d'exploitation) ou à constituer, par une campagne de mesures in situ dont la planification doit tenir compte du temps nécessaire à l'instrumentation adéquate et de la probabilité d'occurrence d'un événement hydrologique intéressant durant le laps de temps disponible.

Ouvrages inclassables

Lorsque l'ouvrage n'existe pas encore (projet en cours de conception), ou va subir de telles modifications qu'on ne peut pas supposer que son fonctionnement hydraulique demeurera inchangé, ou encore, si l'on veut réduire au strict minimum l'incertitude résiduelle pesant sur une loi de fonctionnement hydraulique après étalonnage (notamment lorsque l'étalonnage n'est pas satisfaisant, faute de données hydrologiques propices durant la période d'étude !), il convient de mettre en place une sous-étude spécifique.

Cette sous-étude devrait idéalement être effectuée sur un modèle physique à échelle réduite, plutôt que sur un modèle numérique, même en trois dimensions (cf. chapitre 5 – les outils de calcul hydraulique). En effet, même ces modèles numériques sophistiqués comportent des hypothèses simplificatrices qui compromettent leur validité dans les conditions complexes d'un écoulement à travers une géométrie non-triviale. En particulier, la présence de courants ascendants et de pressions non-hydrostatiques n'est généralement pas prise en compte dans ces modèles tridimensionnels.

Un modèle physique à échelle réduite permet, sous condition de respect de contraintes de similitude hydraulique basées sur le nombre de Froude (cf. annexe à ce sujet), de simuler les écoulements tels qu'ils se présenteront – ou presque – dans la réalité à l'échelle 1:1, et de déterminer la loi hydraulique de son fonctionnement.



Figures 19 - Modèle physique réduit du barrage du Marguet (Boulogne), réalisé et mis en eau au CETE de Lyon, LRPC de Clermont-Ferrand)

Lorsqu'on n'a pas les moyens économiques ou techniques de réaliser un modèle physique, on peut conseiller, par défaut, de commencer par utiliser une loi standard adaptée, et de procéder à une étude de sensibilité approfondie.

Par exemple, pour une expertise des conditions d'évacuation des débits de crue de la Saane (fleuve côtier de Seine Maritime), l'ouvrage d'épi exutoire à la mer a été segmenté en sous-unités fonctionnelles au plan hydraulique, avant de rassembler toutes les influences de proche en proche.

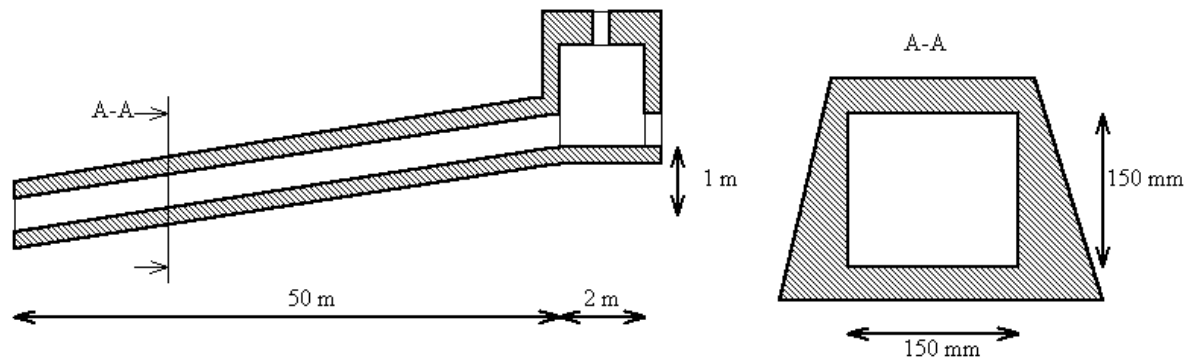


Figure 20 - Epi exutoire de la Saane à la mer, schéma d'ensemble

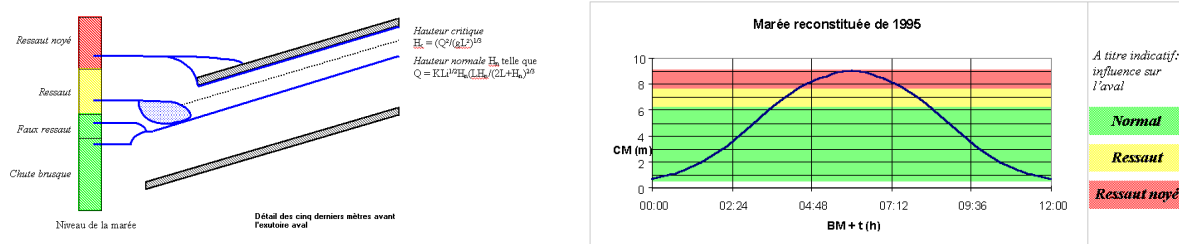
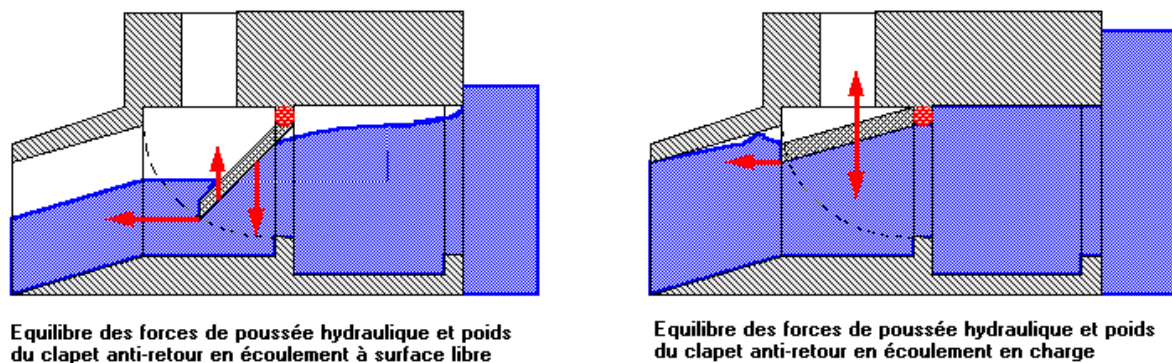


Figure 21 - Epi exutoire de la Saane à la mer: noyage par la marée



Cette analyse a permis de se prononcer à moindre frais (environ 5 jours de travail d'ingénieur) sur les capacités d'évacuation des eaux de crue de la Saane de l'épi exutoire et sur le rôle joué par chaque élément dans la gêne supposée à l'évacuation pour cibler les efforts d'amélioration sur d'autres facteurs plus pertinents.

3. Dresser la topologie hydraulique

L'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude consiste à établir la topologie prévisible des écoulements, à partir de laquelle des comportements et des incidences hydrauliques peuvent être devinés.

3.1. La continuité hydraulique et l'homogénéité des écoulements

La morphologie d'une vallée fluviale comporte généralement des ensembles de caractéristiques homogènes sur lesquels il est possible de faire des hypothèses globales comme la réduction de l'écoulement aux valeurs moyennes de quelques paramètres représentatifs (vitesse, hauteur). Plus le cours d'eau va présenter de longueur homogène, et plus il se prêtera docilement aux hypothèses classiques de calcul et aux simplifications.

Par contre, à chaque changement de tronçon homogène, le calcul devra s'adapter à un niveau de complexité supplémentaire. A moins d'imposer une simplification de la réalité qui risquera de nuire à la qualité des résultats, il faudra d'autant plus d'informations hydrauliques qu'il y a de tronçons homogènes distincts.

Pour identifier ces tronçons homogènes, l'analyse se base sur les critères suivants :

- la largeur au miroir,
- la nature du lit,
- la sinuosité du cours,
- la régularité des écoulements (qui traduit généralement la régularité de la pente des fonds que le miroir masque),
- la ramification hydrographique,
- la géologie.

Il s'agit donc de segmenter le cours d'eau selon ces indicateurs, lorsqu'ils changent « significativement », c'est-à-dire selon des variations précisées dans la description de chacun de ces critères. Chacun de ces indicateurs pris séparément ne suffit pas à prouver le passage d'un tronçon homogène à un autre, mais ensemble, ils constituent un faisceau d'indices suffisant pour se prononcer sur le genre d'hétérogénéité recherché.

Généralement, plusieurs indicateurs changent ensemble pour traduire une hétérogénéité morphologique du cours d'eau d'un secteur à l'autre.

3.1.1. la largeur au miroir en basses eaux

On désigne par miroir la surface libre du cours d'eau. Sa largeur est considérée perpendiculairement à l'axe d'écoulement principal..

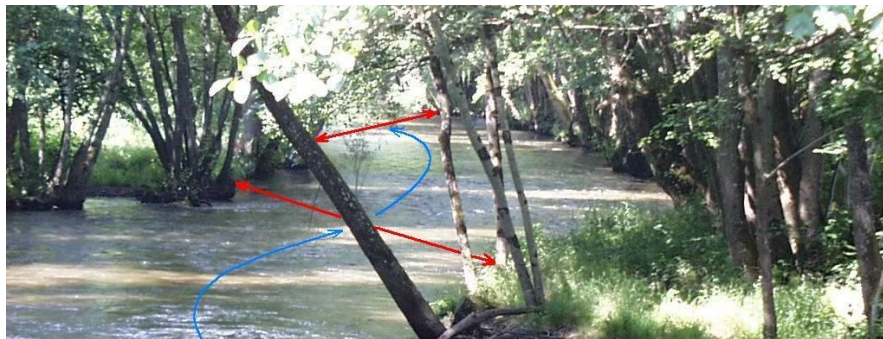


Figure 22 – Largeurs au miroir (en rouge) prises sur un cours d'eau sinueux (écoulement figuré en bleu)

La largeur au miroir en basses eaux est un critère à la fois très pratique et très insuffisant. Elle ne permet de distinguer réellement des tronçons homogènes que si on peut disposer de cette information à une échelle suffisante pour détecter les variations significatives. La carte IGN 1/25 000^{ème} est souvent insuffisante pour mener une analyse pertinente.

Mais surtout, cela présuppose que l'équilibre morphologique du cours d'eau assure, à conditions hydrauliques équivalentes, des formes de section en travers similaires. Bien que cela soit vérifié dans une majorité de cas, il ne faut pas oublier ce postulat au moment où des contradictions apparaissent, et d'autant plus si la vallée est taillée dans un matériau dur qui rend l'incision du lit impossible.. On peut s'attendre à des vitesses plus importantes lorsque la largeur est restreinte.

A moins qu'un ouvrage ne les sépare, il est difficile d'identifier exactement la délimitation entre deux tronçons homogènes à partir de la seule largeur, car la transition se fait souvent continûment.

La transition peut être considérée comme suffisamment brutale pour délimiter nettement deux tronçons homogènes lorsqu'elle est identifiable en un lieu donné. Un critère simple (mais moins maniable que le simple coup d'œil) est que la variation des largeurs au miroir en amont (L1) et en aval (L2) de la section de délimitation est supérieure (en valeur absolue) à la moitié de la distance (d) séparant les deux sections amont et aval, c'est-à-dire $(L2-L1) > (d/2)$.

Dans l'exemple ci-contre, on identifie à l'œil nu la présence d'un élargissement brusque séparant deux tronçons homogènes en largeur au miroir.

L1=25m, L2=45m et d=25m, ce qui donne bien $L2-L1(=20m) > d/2 (=12.5m)$.

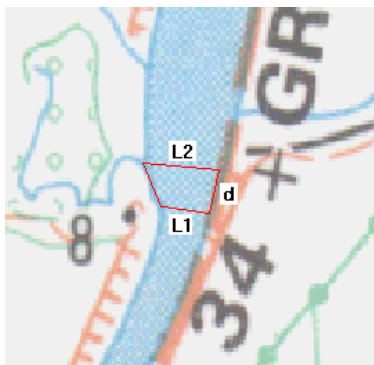


Figure 23 – Elargissement brusque du lit du Coesnon, vu sur carte I.G.N.

3.1.2. la nature du lit

La nature du lit (ou plutôt, devrait-on dire, des lits) fournit des indications d'homogénéité ou d'hétérogénéité des écoulements pour peu qu'on puisse en avoir une vue d'ensemble, ce qui suppose que l'on a le temps et les moyens (problèmes d'accessibilité, notamment) pour parcourir tout le cours étudié et caractériser continûment la nature du lit.

Ce n'est qu'exceptionnellement le cas (lorsque l'étude porte précisément sur le diagnostic de l'état ou de l'occupation des berges), aussi cet indice doit-il être manipulé avec précaution, en renfort d'un premier découpage du secteur d'étude en sous-tronçons supposés homogènes. Dans ce découpage, résultant de l'analyse d'autres facteurs, le choix de deux points de constatations au moins dans chaque tronçon supposé homogène permet de confirmer ou d'infirmer les premières hypothèses retenues.

Une fiche-visite (fournie en annexe au §7.1) permet de qualifier tous ces aspects au moment de la visite sur le terrain ou de sa préparation, et de mieux formaliser la conjonction de ces petits indices.

La nature du lit est un indice à deux niveaux.

Premier niveau : le lit mineur

Dans le lit mineur, elle complète l'indication liée à la largeur au miroir en basses eaux. Une reconnaissance visuelle est incontournable pour s'en faire une idée. Les indicateurs à observer sont la forme, le matériau constitutif, et l'occupation du lit. La caractérisation proposée devrait permettre de graduer ces indicateurs de sorte qu'une variation assez nette implique un changement probable de tronçon homogène. Les variations minimales sont donc lissées à dessein dans une caractérisation qualitative. L'inconvénient principal de cette approche est que l'appréciation de sites différents permettant de délimiter des tronçons homogènes d'écoulement doit être faite par la même personne, ou par des personnes qui ont préalablement homogénéisé leur graduation qualitative sur un tronçon conjoint.

a) *la forme des berges*

La raideur du talus de berge peut refléter l'intensité des processus érosifs contre la berge (ou la fragilité de cette dernière) ou trahir une action anthropique souvent limitée dans l'espace :

- micro-falaise à pic, signe d'une érosion active en pied de talus, donc souvent d'un écoulement moyen rapide, ou encore d'une évolution morphodynamique à la recherche d'une pente d'équilibre par modification du tracé du lit. (en concurrence avec l'incision, et pas forcément lorsque le processus d'incision a abouti jusqu'à substratum



Figure 24 – Microfalaises de berge dans l'extrados d'un cours d'eau

-

- forte inclinaison (1 pour 1 et plus), souvent fruit d'une action anthropique de profilage des berges, assortie d'une défense de berge, ou état transitoire de remodelage d'une berge après effondrement



Figure 25 – Berge artificielle (noter la raideur du talus)

-

- pente douce (1 pour 3 ou moins), berge naturelle sous influence de régimes hydrologiques assurant un marnage perpétuel sans à-coups, reconnaissable à un étagement régulier des occupations végétales et à un tri granulométrique dans la section en travers, ou encore intrados d'un méandre

**Figure 26 – Berge en pente douce (en rive gauche)**

-

- berge plate ou risberme, assez rarement submergée (quelques jours par an) mais constamment humide, sur laquelle on trouvera une végétation rivulaire croissant sur des éléments fins

**Figure 27 – Berge plate, zone humide**

-

- lèvre (bourrelet de berge en surplomb du lit moyen bordant le lit mineur), pouvant trahir une action humaine (dépôt de produits de curage, assez «régulier») ou un phénomène naturel (dépôts localisés de sédiments à la décrue, sans forme claire).

**Figure 28 – Lèvre (sur le côté droit du lit) perchante le lit mineur avant le débordement**

Une dissymétrie entre rive gauche et rive droite n'est pas forcément signe pertinent de changement de tronçon homogène au sens où nous l'entendons dans l'analyse du fonctionnement hydraulique. Ainsi, si une berge à pic dans l'extrados d'un virage répond à une pente douce de matériaux fins dans l'intrados du même virage, il peut s'agir d'une

réorganisation classique des rives sous l'influence des efforts hydrodynamiques générés par les écoulements dans le coude. A cette sinuosité devrait correspondre un autre virage de sens opposé présentant des caractéristiques de berges alternées par rapport aux premières. Il faut alors se reporter au paragraphe concernant la sinuosité pour caractériser l'homogénéité ou non des tronçons.

Par contre, une dissymétrie non-alternée des deux rives peut correspondre à deux types de matériaux ou d'occupation des berges différents qui peuvent cadencer des tronçons homogènes : se reporter à ces critères pour délimiter les zones homogènes.

b) *l'occupation des berges :*

- absence de toute végétation sur la berge émergée, traduisant un faucardage (action anthropique) ou une forte fréquence de submersion (l'observation étant faite dans des conditions d'étiage inhabituel) si des éléments fins (vases, limons) sont présents
- présence d'une végétation vivace caractéristique d'une zone humide (roselière, herbe, orties) sur les pentes, associée à une fluctuation (« respiration ») régulière du niveau d'eau
- présence de broussailles, d'arbustes, des branches et d'arbres morts, descendant assez bas sur l'eau, susceptibles d'être mouillés lors de la montée du niveau d'eau avant débordement (et de gêner l'écoulement des eaux), désignant des milieux majoritairement à sec (berges légèrement perchées)
- artificialisation des berges, par des protections plus ou moins lourdes (techniques végétales, fascines, enrochements, palplanches, cuvelage bétonné, etc)

Il s'agit de repérer l'état de submersion usuel de la berge par rapport à l'étagement végétal classique d'une berge complètement naturelle soumise à un régime hydrologique balancé.

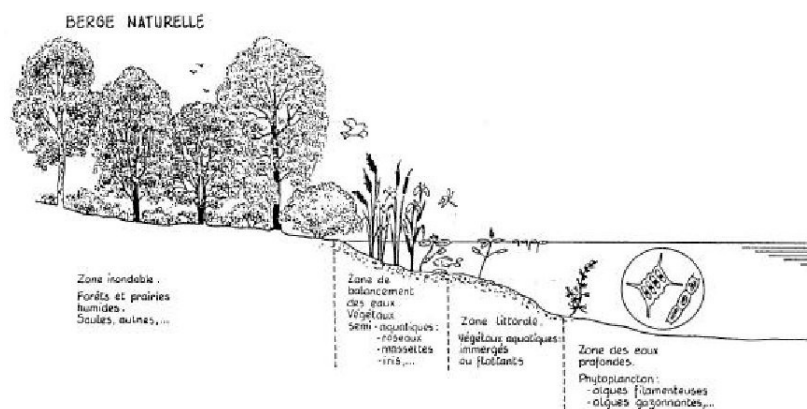


Figure 29 – Schéma classique de l'étagement végétal sur une berge naturelle

c) *le matériau constitutif du lit*

- vases, (vitesse très faible, presque nulles, en moyenne, et eaux de crues lentes) – eaux mortes et turbides
- limons, boues, (vitesse très faible en moyenne, eaux de crues moins lentes) – eaux turbides
- sables homogènes, (vitesse faible en moyenne, eaux de crues assez rapides) – eaux claires, avec ou sans rides de fond
- sables hétérogènes, (vitesse faible en moyenne, eaux de crues localement rapides) – eaux claires, avec bancs d'éléments grossiers localisés et plus ou moins colonisés de flore aquatique

- graviers, (vitesse assez forte en moyenne, forte en crue) – eaux claires, développement algal possible
- galets, (vitesse forte en moyenne, très forte en crue) – eaux vives, développement algal possible
- blocs, (idem) – eaux vives
- substratum (idem) – eaux vives

Il faut bien sûr être prudent lorsqu'on base une analyse sur le matériau constitutif du lit, car le cours d'eau inscrit sa dynamique sédimentaire dans un bassin qui lui fournit des stocks de matériaux en provenance de l'amont et de tout le long de son cours. Ainsi, la géologie peut biaiser les correspondances simples indiquées ci-dessus.

L'exemple ci-contre montre un cours d'eau traversant une lentille d'argile, et il serait manifestement hasardeux de croire que les vitesses de courant sont très faibles en moyenne.



Figure 30 – Cours d'eau traversant une lentille d'argile

Deuxième niveau : le lit majeur

L'examen de l'occupation du lit majeur permet de sous-tronçonner le secteur d'étude en cas de débordement. Il s'agit surtout de délimiter les grands secteurs de caractéristiques équivalentes, sans entrer dans une analyse approfondie d'occupation du sol. On peut ainsi regrouper :

- occupation dense et continue ; les futaies denses, les zones champêtres entrecoupées de haies denses ou de talus supportant des chemins, les forêts : les écoulements y seront nécessairement laborieux, lents voire presque immobiles, la vitesse moyenne d'avancement de l'eau pouvant être considérée comme nulle même si de lents mouvements internes peuvent brasser légèrement ces zones
- occupation moyenne et continue ; les zones en friche, les zones cultivées où les cultures sont montées, les futaies éparées, les zones entrecoupées de haies susceptibles d'être encombrées de matériaux flottants (fils barbelés sur plusieurs étages, grillage), les champs de vignes : les écoulements y seront fortement ralentis, mais demeureront possibles
- occupation faible et continue ; les zones nettoyées, les champs en hiver, les routes, parkings, les gravières, les terrains de sport, les marais : les écoulements y chemineront librement, et formeront localement des zones d'accélération significative
- occupation faible et discrète ; les zones urbanisées peu denses : les écoulements seront contraints de passer entre les habitations, mais l'obstruction n'étant pas supérieure à 50%, ils accéléreront localement pour compenser la perte locale de capacité d'écoulement du lit majeur
- occupation dense et discrète ; les zones urbanisées denses : les écoulements y seront considérablement gênés par des obstructions du lit majeur de plus de 75% liées aux habitations, si bien qu'une majeure partie sera stoppée nette tandis que localement, des écoulements violents traverseront la zone de part en part.

3.1.3. Les styles fluviaux

La morphodynamique naturelle tend à faire passer le cours d'eau par différents styles fluviaux depuis sa source jusqu'à la mer.

D'entaille quasi-linéaire creusée dans le substratum dur par le torrent, le lit adopte, avec la diminution de sa pente, une forme de tresses, c'est-à-dire de multiple bras de taille comparable découpant une large lit moyen en petites îles plates d'éléments grossiers et fortement mobiles lors des crues.

Avec la diminution de pente, les eaux de crues sont plus lentes, moins capables de remobiliser les sédiments constitutifs des îles, qui se consolident d'éléments plus fins et de végétation, tandis que le nombre de bras en parallèle se réduit fortement pour présenter un bras principal et des bras secondaires plus modestes.

Cet état intermédiaire (appelé anastomose) assure la transition avec l'écoulement de plaine, de faible pente, où le lit mineur devient unique après comblement des bras secondaires, et forme de larges méandres de longueur d'onde assez régulière en fonction du substrat alluvionnaire.

A proximité de la zone d'influence de la marée, les méandres tendent à s'écraser contre le niveau d'étalement de haute mer, avant de constituer la zone estuarienne proprement dite, avec son évasement progressif exponentiel raccordant les lignes de rive du cours d'eau avec le trait de côte qui leur est perpendiculaire.

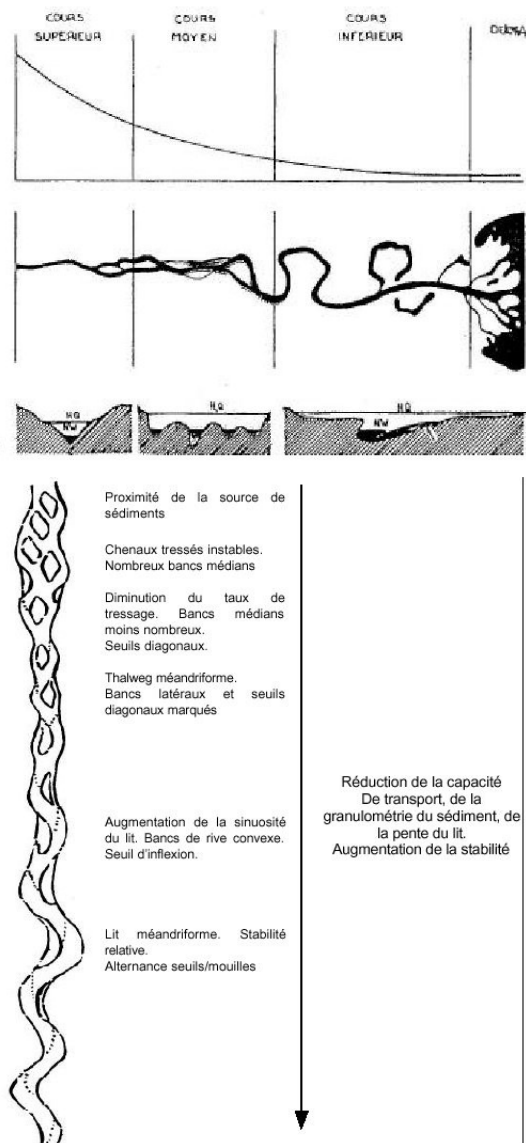


Figure 31 – Styles fluviaux

Les méandres d'un cours d'eau correspondent à un état d'équilibre entre débit solide (charge sédimentaire transportée) et débit liquide par ajustement des caractéristiques géométriques (largeur, profondeur, pente).

Il faut distinguer un simple virage lié à une anisotropie de la géologie de la vallée, un contournement d'obstacle dur naturel ou artificiel, des méandres constituant une sinuosité significative. Ceux-ci se répètent plusieurs fois de suite, alternant virage à droite et virage à gauche avec une longueur d'onde à peu près stable.



Figure 32 – Méandres naturels

Un changement de la longueur d'onde ou de l'amplitude moyenne des méandres est significatif d'un changement de tronçon homogène, que viennent conforter habituellement les diagnostics visuels (nature du lit mineur, régularité / pente des écoulements).

Ils peuvent traduire une gêne à l'écoulement en aval, qui conduit l'écoulement à dissiper l'énergie de son élan en rongant latéralement son lit pour en augmenter le parcours linéaire, lorsqu'ils apparaissent en des endroits que les équilibres dynamiques naturels entre débit solide et débit liquide n'expliquent pas.

Ci-contre, sur la Vesle (dans l'Aisne), les protections de berges et l'artificialisation du lit au droit du pont routier fixe le lit et contrarie sa tendance naturelle à méandrer faiblement dans ce secteur : des accumulations de méandres accentués en accordéon dans la zone en amont trahit cette contrariété.

Le même type d'accumulation de méandres en accordéon peut être constatée en amont de seuils de moulins, par exemple.

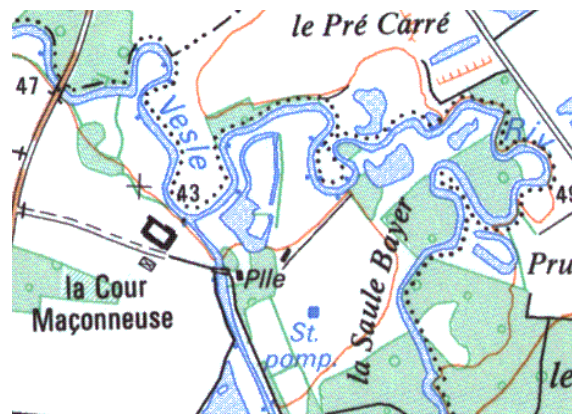


Figure 33 – Méandres forcés de la Vesle (extrait du ©SCAN25 de l'I.G.N.)

Selon la dynamique générale du cours d'eau, lié à des facteurs de géologie et de pente de vallée, la sinuosité du cours peut se traduire de manière plus subtile que par de simples méandres. Le cours d'eau peut ainsi emprunter plusieurs bras globalement parallèles, liés à intervalles réguliers par des coupures transversales dans les longues bandes de terre qui les séparent. En fait, l'un des bras est souvent plus profond que les autres, et son parcours peut basculer d'une rive à l'autre du lit mineur global via les liaisons transversales, créant une sinuosité de chenal principal qu'une simple carte ne fait pas forcément apparaître. A défaut d'indices d'un tel comportement par la largeur, par exemple, l'examen de la longueur des bandes de terre séparant les divers bras peut fournir une indication correcte de la sinuosité.

3.1.4. la régularité des écoulements

La faiblesse des paramètres morphologiques est sans aucun doute de fournir parfois des indications de tendances contraires dont la résultante ne peut être devinée, surtout lorsqu'une action anthropique vient perturber la dynamique naturelle. L'examen de la régularité des écoulements pallie cette faiblesse en livrant précisément la synthèse qualitative des interactions géométriques.

Lors d'une investigation visuelle sur le terrain, il est facile d'identifier les zones à tendance lente et les zones à tendance rapide.

Les zones à tendance lente présentent une surface de miroir lisse en l'absence de rafales de vent, sur laquelle le paysage se reflète d'autant plus facilement que l'eau est plutôt turbide et que le fond, assombri par un envasement plus ou moins important, renforce le contraste de la réflexion. Les obstacles immergés perturbent peu le fil d'eau.



Figure 34 – Effet de miroir sur la surface d'un cours d'eau à tendance lente

La vitesse moyenne du courant est limitée à quelques dizaines de centimètres par seconde (un brin d'herbe ou une feuille peut en fournir une indication correcte). Le courant présente une grande homogénéité sur toute la largeur du miroir. L'écoulement est généralement très silencieux.

Les zones à tendance rapide présentent une surface perturbée même en l'absence de vent, sur laquelle il est difficile d'apercevoir un reflet cohérent. L'eau est plutôt claire, et le fond est plutôt propre (c'est-à-dire que les matériaux assez grossiers et les végétaux qui le tapissent ne sont pas envasés). La végétation immergée est plutôt abondante (longs développements entraînés par le courant). Le courant dépasse facilement plusieurs dizaines de centimètres par seconde et se compte en mètres par seconde. Il forme des bourrelets et des sillages autour des obstacles qu'il baigne : branches, troncs, piles, pieux, etc. C'est un écoulement bruyant.



Figure 35 – écoulement fluvial rapide, presque critique, sans effet de miroir



Figure 36 – Transition entre un écoulement lent (à droite, en amont du pont) et un écoulement rapide (à gauche)

Une photographie aérienne (de préférence orthogonale) prise en période de basses eaux permet de fournir une idée moins exhaustive, mais souvent suffisante au stade de la préparation de la commande, des grands tronçons homogènes.

On y repère en effet les zones de cours d'eau agitées par des vitesses importantes, les zones d'eaux tranquilles, et les ouvrages singuliers barrant le lit (cf. paragraphe suivant).

Les premières sont blanchies par l'agitation, ou au moins, ondulent trop pour réfléchir correctement la lumière. Les deuxièmes sont lisses comme un miroir et réfléchissent parfaitement la lumière. Les troisièmes forment une ligne nettement tracée à l'amont et soulignée d'un panache d'eaux bouillonnantes et blanchies sur quelques mètres.



Figure 37 – Vue aérienne orthogonale montrant l'écume produite par un seuil biais

3.1.5. la ramification hydrographique

A défaut de toute autre approche, l'examen du réseau hydrographique fournit la structure a minima des tronçons de comportement homogène de confluence en confluence.

L'apport d'un affluent conséquent peut ainsi, par le surcroît de débit incident, provoquer directement à partir de l'aval une modification de la morphologie du cours d'eau principal. Inversement, si le cours d'eau étudié se jette dans un cours d'eau plus important, il va en subir l'influence dans sa dynamique hydraulique et sédimentaire. Par contre, un affluent trop modeste ne jouera pas de véritable rôle dans la morphologie du cours principal, et un tronçon homogène peut parfaitement intercepter plusieurs de ces rus.

Lorsque la pente des vallées des deux cours d'eau faisant confluence est du même ordre de grandeur, la largeur relative de chacun à proximité de la confluence peut indiquer lequel domine l'autre. De plus, si le cours de l'un des deux s'élargit significativement à l'approche de l'autre, c'est souvent le signe qu'il subit son influence, et donc, qu'il est fortement dominé.

En première approche, on peut accepter qu'un tronçon homogène intercepte un ou plusieurs affluents dont la largeur est inférieure au dixième de sa propre largeur. Au-delà, il faut considérer que le tronçon perd son homogénéité au droit de la confluence, et segmenter en deux tronçons, de part et d'autre de cet endroit.

En deuxième approche, l'examen des débits moyens, lorsqu'ils sont disponibles, permet d'affiner ce premier diagnostic.

3.1.6. la géologie

Les structures géologiques peuvent être à l'origine de morphologie particulière de la vallée :

- a) présence de verrous dus à un banc plus dur correspondant à une étroitesse puis à une zone large à l'amont occupée parfois par un marais comme c'est le cas à Bourges sur l'Yevres ;
- b) présence de hauts fonds provoqués par les parties dures des niveaux : ceci est très fréquent en Loire où ils sont à l'origine de seuils et où le déficit en transport solide a vidangé les alluvions entre celles-ci comme dans la région d'Orléans ;
- c) interférence avec les mouvements récents du socle (néotectonique) qui sont à l'origine d'encaissement se traduisant par des absences d'inondation en lit majeur sur certains secteurs, c'est le cas sur la Claise affluent de la Creuse ou au contraire de vaste étendue d'expansion de la crue.
- d) interactions fortes avec le sous sol (la nappe ou les vides sous jacents) du fait d'une forte porosité de fracture, comme en milieu karstique par exemple, où certains tronçons subissent alternativement selon les conditions hydrologiques des phénomènes de capture ou de contribution quantitativement importante .
- e)

3.2. Singularités et sections de contrôle

Un aménagement ponctuel et durable du cours d'eau à un endroit provoque, en amont et en aval, une adaptation de la dynamique du cours d'eau à ce facteur contraignant. Les modifications de la géométrie qui s'ensuivent sont différentes vers l'amont et vers l'aval, si bien que la singularité suffit souvent à délimiter nettement deux tronçons homogènes distincts qu'on aurait cru ne faire qu'un à l'examen superficiel des seuls facteurs morphologiques.

3.2.1. les ouvrages de franchissement

Il faut distinguer deux types d'influence des ouvrages de franchissement de cours d'eau.

En lit mineur, seules les piles et les culées (en basses eaux), et le tablier du pont (en hautes eaux) peuvent constituer un obstacle aux écoulements. Pour peu qu'elles occupent une fraction non-négligeable de la section d'écoulement, et que leurs formes soient anguleuses ou tortueuses, les piles et les culées peuvent provoquer, en régime fluvial, un exhaussement conséquent de l'ensemble du profil de la ligne d'eau en amont, et ralentir assez les écoulements pour que des sédiments s'y déposent, tandis qu'à l'aval immédiat, l'accélération puis la décélération rapides de l'écoulement peuvent former une fosse sous l'effet de tourbillons de recirculation qui agitent localement la masse liquide.

Ces phénomènes ne constituent une singularité propre à séparer effectivement deux tronçons homogènes distincts que s'ils se manifestent avec une intensité forte. Il faut pour cela que les piles soient spécialement massives, avec des voûtes basses, ou encore soient pourvues de dispositifs de renforcement massifs tels que rideaux de palplanches, enrochements, etc. Les vieux ponts maçonnés correspondent à cette condition, tandis que la très grande majorité des ouvrages de conception moderne, en béton armé, métalliques ou mixtes, n'a généralement qu'un impact limité.

Un indice suffisant de l'effectivité de la séparation de deux tronçons homogènes distincts par un ouvrage de franchissement est la forme des écoulements à proximité immédiate des piles. Lorsque la ligne de mouillage de la maçonnerie par l'écoulement est continue,

sans se décoller de l'ouvrage, et sans écume, mais avec néanmoins un bourrelet bien visible en amont et un sillage agité de tourbillons qui bombent doucement l'aval, l'ouvrage a une influence limitée dans un bief homogène qui l'englobe de part et d'autre. Par contre, lorsque cette ligne fait un ourlet dans les premiers décimètres de la partie amont de la pile, suivi d'une écume qui prolonge l'ourlet vers la partie aval de la pile et qui s'étire puis se contracte périodiquement, et qui crache en aval de la pile un sillage tendu de tourbillons qui éclatent à la surface, l'ouvrage marque la séparation de deux tronçons distincts.

En lit majeur, les ouvrages de franchissement sont prolongés par les ouvrages d'accès, souvent des remblais, parfois des viaducs. Les remblais constituent un obstacle au passage des écoulements en lit majeur, qu'ils forcent à franchir l'ouvrage via le lit mineur, accentuant encore l'influence des piles, des culées et du tablier. Les ouvrages de décharge qui les perforent par intermittence, de la simple buse au petit pont cadre, permettent de limiter ce report de débit du lit majeur au lit mineur. A l'extrême, les accès par petits viaducs constituent l'optimum de transparence d'un ouvrage de franchissement.

En hautes eaux, la transparence des ouvrages d'accès atténue souvent l'influence diagnostiquée pour le seul lit mineur, et peut conduire à « fusionner » deux tronçons qui étaient effectivement distincts en basses eaux. Par contre, des remblais d'accès faiblement déchargés aggravent le diagnostic pour les piles et culées en lit mineur, éventuellement au point de trouver deux tronçons distincts là où, en basses eaux, il n'en apparaissait qu'un seul. Ceci ne doit cependant être envisagé, en première analyse, que si le diagnostic du seul lit mineur conduisait à un doute entre les interprétations des « symptômes » (apparition ponctuelle d'un petit ourlet crachant un tourbillon éclatant contre la pile, etc.).

3.2.2. les ouvrages de contrôle des niveaux

L'exploitation de la force hydraulique, avant même la navigation fluviale, a conduit l'homme à domestiquer les cours d'eau. Il n'y a plus guère de cours d'eau en France qui n'ait subi au moins une tentative de contrôle de ses niveaux par un ouvrage transversal, généralement désigné sous le nom de seuil ou de barrage.

La majorité de ces ouvrages, lorsqu'ils ont été en exploitation dans les cinquante dernières années, est repérée sur les cartes de l'IGN au 1/25 000^{ème}, sous la désignation barrage (« Bge ») ou moulin. Quand ils sont trop petits ou partiellement en ruine faute d'exploitation (et d'entretien) récente, ils peuvent échapper à la vigilance des cartographes, mais l'hydraulicien peut néanmoins retrouver facilement leur trace.

En effet, obstruant le cours d'eau, ils sont généralement doublés d'un bras d'usinage, d'un bras de décharge de crues ou encore d'un ouvrage de franchissement de chute pour les bateaux ou les poissons. Si le lit mineur, ailleurs assez régulier et peu sinueux, présente localement une ramification sur quelques dizaines de mètres, créant une ou plusieurs petites îles que la dynamique morphologique naturelle n'explique pas, il s'agit vraisemblablement d'un aménagement de chute pour contrôler les niveaux.

Cet indice peut être complété par plusieurs autres : sur des photographies aériennes, on ne peut manquer le sillage d'écume qui se forme nécessairement en aval de la chute ; la toponymie garde souvent une trace de la fonction de l'aménagement (« rue du moulin », lieu-dit « le moulin machin », etc.) ; un noyau d'occupation du voisinage immédiat de ces îles présente un groupement isolé de petites maisons et souvent d'une grande minoterie ; un lavoir peut annoncer la présence d'un ouvrage de contrôle de niveaux en aval, mais cela n'est pas systématique. L'examen de plans d'archive datant de l'époque ou l'aménagement hydraulique des cours d'eau était un défi technique relevé par les ingénieurs (de 1500 à 1900 environ), permet également de retrouver les emplacements d'ouvrages tombés en désuétude... ou de leurs vestiges !

3.2.3. les sections de contrôle

D'une manière générale, on peut définir les sections de contrôle comme les sections de cours d'eau où on est capable de déterminer une correspondance univoque entre les niveaux d'eau et les débits, par étalonnage ou par calcul direct.

Il s'agit toujours d'une section réglée, aux caractéristiques géométriques finement connaissables et stables, qui concentre tout le débit du cours d'eau. Souvent, un ouvrage de l'un ou l'autre des types de singularités hydrauliques constitue une section de contrôle.

Un calcul hydraulique peut être mené de proche en proche en s'appuyant sur une telle section de contrôle pour établir, dans les tronçons homogènes qui y aboutissent, les valeurs des niveaux et vitesses de l'écoulement. Il suffit généralement d'étalonner une loi hydraulique à partir de quelques informations fiables couplant niveaux et débits.

La section de contrôle la plus intéressante correspond au passage d'un écoulement lent (fluvial) à un écoulement rapide (torrentiel), même très localisé. L'écoulement y prend alors les caractéristiques du régime critique, accessibles par un calcul direct.

Si les sections de contrôle sont toujours intéressantes ne serait-ce que pour caler un calcul hydraulique d'ensemble, les sections de contrôle à régime critique constituent une séparation physique entre méta-tronçons solidaires. Les caractéristiques hydrauliques de chacun de ces ensembles de tronçons de part et d'autre de la section à régime critique ne dépendent pas de celles de son vis-à-vis. Seul le débit qui passe de l'un à l'autre établit un lien hydraulique entre eux.

Une étude hydraulique peut se limiter au tronçon de vallée compris entre deux sections de contrôle à régime critique sans aucun préjudice de la qualité des résultats. Un soin particulier doit être apporté à l'identification de ces sections particulières, afin de limiter l'étude hydraulique aux seules portions de vallée significatives pour le secteur où des résultats sont attendus (zone d'objectifs).

3.2.4. les aménagements hydrauliques

On désigne ici par «aménagements hydrauliques» des actions de remodelage conséquent de la vallée et du cours d'eau visant à exploiter les propriétés hydrauliques de motricité (moulins à eau, micro-centrale hydroélectrique), d'assainissement (refroidissement ou évacuation d'effluents industriels) et de flottabilité (flottage de trains de bois, navigation, de protection des biens et des personnes (endiguement, ralentissement dynamique)).

Dans la grande majorité des cas, ces aménagements, réalisés entre le 16^{ème} et le 19^{ème} siècle, sont tombés en désuétude. La compréhension de la ou des fonctions affectées à l'aménagement permet de deviner l'organisation des composantes de l'aménagement, et donc, d'émettre des hypothèses pertinentes quant à l'emplacement supposé des composantes attendues, où l'on peut trouver, sur le terrain, des indices ou des vestiges.

D'une manière générale, les traces (ouvrages, digues, canaux, etc) de l'action anthropique dans un secteur d'étude doivent toujours faire l'objet d'une analyse rétrospective afin de retrouver l'ensemble de la logique d'aménagement qui a perturbé l'agencement naturel de la vallée du cours d'eau.

Par exemple, un moulin au fil de l'eau se compose généralement d'un ensemble vannage (pour réguler la charge hydraulique amont), pertuis (pour évacuer le trop plein du bief) et prise(s) d'eau (pour envoyer l'eau vers la machine hydraulique) dans l'axe du cours d'eau (pour profiter au maximum de la vitesse d'arrivée), et d'un déversoir longitudinal placé quelques dizaines de mètres en amont de cet ensemble, déchargeant les eaux de crue vers un bras de dérivation court-circuitant l'installation du moulin.

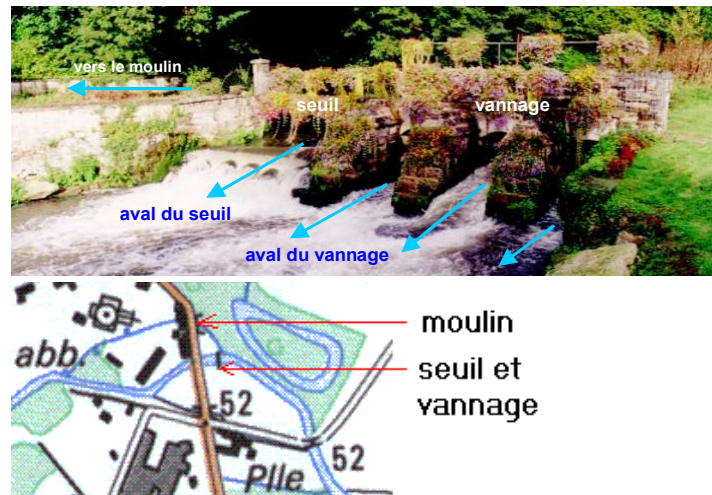


Figure 38 – Moulin de Braine (extrait du SCAN25 de l'I.G.N.)

Un autre type d'aménagement de moulin (dit « en dérivation ») consiste en une prise d'eau à l'endroit d'un ouvrage répartiteur de débits, suivie d'un canal d'amenée de l'eau jusqu'au moulin muni d'un pertuis latéral permettant d'évacuer les eaux de trop-plein du bief en cas de crue submergeant l'ouvrage répartiteur.

Le bief d'amenée est généralement de faible pente. La restitution des eaux dérivées se fait quelques mètres en aval de la chute.

Ci-contre, un bel exemple de la complexité des moulins en dérivation.

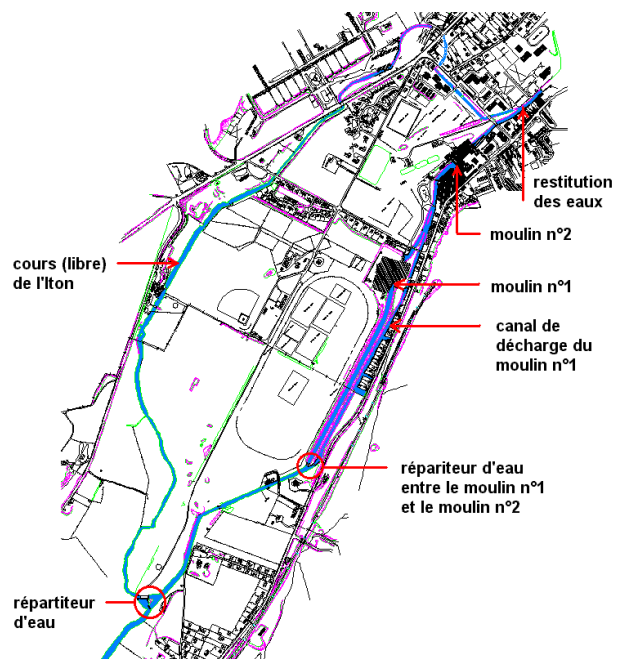


Figure 39 – Plan du double-moulin en dérivation des usines Navarre sur l'Iton (fonds de plan de la DDE de l'Eure)

Une prise d'eau à fins d'alimentation d'étangs de pêche, de soutien d'étiage, de canal de navigation ou d'exploitation industrielle (papeterie, par exemple) se présente comme un vannage latéral condamnant un pertuis à large voile anti-submersion (évitant d'introduire dans le bief un surplus d'eau menaçant sa stabilité). La restitution des eaux excédentaires ou simplement stockées peut se faire à plusieurs kilomètres du lieu de la prise d'eau. Souvent, un seuil fixe ou un barrage de régulation barre le cours d'eau quelques dizaines de mètres en aval de la prise d'eau afin d'assurer une charge stable à l'amont de la prise, et donc, une entrée d'eau régulière.

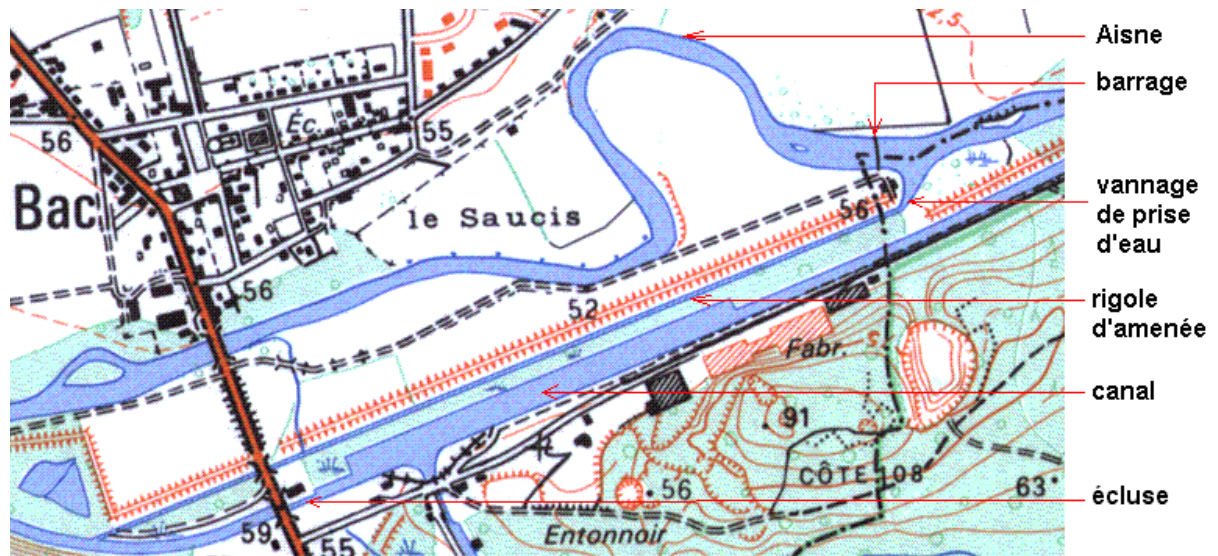


Figure 40 – Prise d'eau d'hydroélectricité et de navigation de Berry-au-Bac (extrait de SCAN25 de l'I.G.N.)

Une écluse à bateaux ou à trains de bois consiste en un ouvrage de retenue d'eau permettant de maintenir un mouillage suffisant ou l'accumulation des flottants, à côté d'une écluse à sas (pour faire passer les bateaux en deux temps) ou simple (permettant de chasser les flottants vers l'aval à l'ouverture). L'écluse est parfois construite en dérivation, et alors, elle est souvent insubmersible.

Ces aménagements peuvent également être perceptibles dans le lit majeur. Un corridor en dépression dans le champ d'expansion permet de faire transiter un débit important en lit majeur lors des crues importantes.

Les cartes d'archives (Etat-major, Cassini, levés des Ponts et Chaussées) constituent une aide précieuse pour la recherche d'indices sur l'usage passé de la vallée et de son cours d'eau.

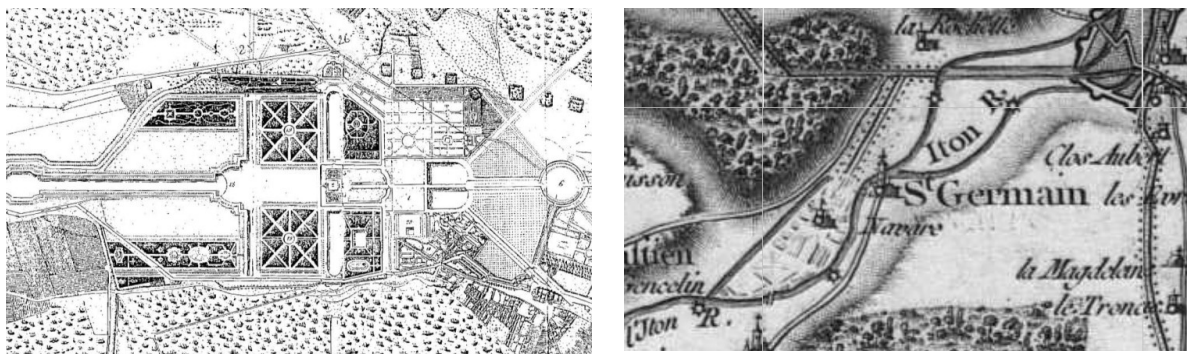


Figure 41 – Plan d'archive de l'ancien château de Navarre et carte de Cassini de l'Iton au même endroit (remarquer combien l'organisation du système actuel de dérivation des moulins de Navarre, Figure 39 –

Plan du double-moulin en dérivation des usines Navarre sur l'Iton (fonds de plan de la DDE de l'Eure) hérite de l'organisation des jardins du château de Navarre, détruits sous la Révolution Française)

La toponymie fournit souvent des indices à ne pas négliger : noms de rues (rue du Moulin, rue du Gué, etc.), noms de lieu-dits (le Moulin de Haute pisse, les Sablons, etc.).

3.3. Schématiser la topologie en branches, mailles, nœuds, casiers et nappes

Le fruit de l'analyse de la topologie du secteur d'étude est un premier diagramme synoptique des écoulements.

Il s'agit tout simplement de représenter chaque tronçon homogène par un segment. Les singularités sont figurées par un trait arrêtant le tronçon immédiatement en amont (en régime fluvial) ou en aval (en régime torrentiel). Les confluences sont représentées par un nœud qui joint les extrémités des segments figurant les tronçons y affluant.

Les extrémités libres de ce diagramme, qui ne sont liées ni à un nœud, ni à un segment consécutif, doivent nécessairement correspondre à des sections de contrôle. En traits pointillés, on pourra relier ces sections de contrôle aux limites de l'étude hydrologique.

Les segments comportant des parties de la zone d'objectifs peuvent comporter une signalétique particulière pour les « verrouiller ».

Pour simplifiée qu'elle soit inévitablement, il ne faut pas négliger, dans cette représentation schématique, de distinguer ce qui relève des basses et des hautes eaux. Les liaisons de type « conditionnel », c'est-à-dire qui ne s'établissent que sous la condition d'atteindre certaines caractéristiques hydrauliques, doivent apparaître clairement.

Ce premier schéma constitue l'ossature de base de l'analyse, que des examens approfondis permettront d'étoffer.

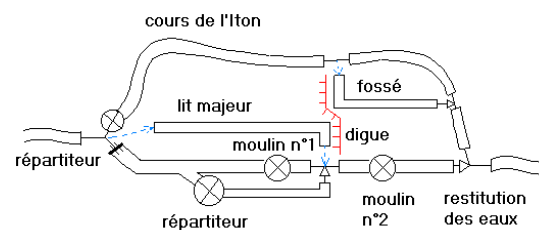
Canal, rigole (selon largeur)		Ecluse	
Rivière, ruisseau (selon largeur)		Vannage	
Confluence (B l'affluent, A le cours principal)		Déversoir	
Marais (ou zone humide) drainé(e)		Pont	
Etang, gravière		Siphon	
Liaison hydraulique		Ligne structurante	
Liaison hydraulique conditionnée		Ouvrage de décharge	

Figure 42 – Légende indicative pour la schématisation de la topologie hydraulique (librement inspirée d'un rapport d'étude de la SoGreAH)

La mise en œuvre de cette signalétique doit privilégier naturellement la compréhension du fonctionnement hydraulique.

Figure 39 – Plan du double-moulin en dérivation des usines Navarre sur l'Iton (fonds de plan de la DDE de l'Eure)

Un exemple d'application sur le secteur des anciens jardins de Navarre traversés par l'Iton (cf. Figure 39 – Plan du double-moulin en dérivation des usines Navarre sur l'Iton (fonds de plan de la DDE de l'Eure)) permet de démystifier cette étape.



4. Les cheminements préférentiels

4.1. Les pentes d'écoulement principal

De par sa simplicité graphique, le profil en long de la ligne d'eau d'un cours d'eau est l'élément le plus souvent disponible pour l'analyse des écoulements. Il s'agit du report des cotes altimétriques atteintes par l'eau en divers points de son cours pour un régime donné.

L'intérêt de ce type de profil en long est de fournir des indications quantitatives sur les pentes de ligne d'eau, qui sont directement traduisibles en termes de vitesse et de débit. La pente du cours d'eau traduit une dynamique hydraulique réelle mieux que toutes les analyses a priori de la géomorphologie du lit. Et surtout, les changements de pente sont le reflet sans ambiguïté de changements réels de dynamique hydraulique. Ils devraient donc correspondre à la plupart des singularités hydrauliques identifiées comme le début ou la fin de tronçons homogènes, mais aussi, disqualifier par leur absence les autres segmentations supposées.

Cette simplicité masque souvent au profane la complexité conceptuelle du profil en long. En effet, dès que la portion de cours d'eau ainsi représentée dépasse quelques kilomètres, il ne faut pas oublier que le profil en long des niveaux maximum atteints n'est qu'une ligne virtuelle, enveloppe des lignes d'eau réelles qui ont successivement subi l'influence du passage de l'onde de crue. D'autre part, tirer un trait droit entre deux points mesurés est déjà un acte de modélisation qui suppose que le cours d'eau ne subit pas, entre ces deux points, l'influence décisive et localisée d'une singularité hydraulique. Enfin, la distance qui sépare le report de deux altitudes mesurées en deux points distincts est mesurée sur un axe curviligne qui doit épouser au mieux le cheminement de l'écoulement principal, ce qui peut devenir délicat lorsque celui-ci n'est pas facilement identifiable.

Lorsque le cours d'eau reste dans son lit (mineur), l'axe du cheminement principal est aisément identifiable, aux mailles constituées par des bras parallèles près. Mais lorsque le cours d'eau déborde, l'écoulement principal peut emprunter des chemins de traverse qui court-circuitent des méandres ou réoccupent des lits délaissés plus longs, si bien que les pentes subissent ces modifications de longueur de cheminement principal. Il faut donc se garder de superposer plusieurs profils en long de ligne d'eau d'un cours d'eau, sans s'être assuré préalablement de la compatibilité des conditions de cheminement principal, et au moins, d'une égale longueur de cheminement entre points de comparaison.

A contrario, la superposition brutale de plusieurs profils en long correspondant à des conditions hydrologiques sensiblement différentes peut permettre de détecter, en faisant l'hypothèse initiale d'un même axe de cheminement principal, les variations de pente qui traduisent soit une modification de la dynamique hydraulique en fonction des variations des conditions hydrologiques (influence d'une gorge fermant une vallée, noyage d'un seuil, mouvements de fonds mobiles pendant les fortes crues et pas pendant les crues moyennes, etc.), soit une erreur dans l'hypothèse initiale, c'est-à-dire, une variation du cheminement principal selon les conditions hydrologiques. Un tel diagnostic ne permet toutefois pas seul de localiser et d'identifier précisément ces variations.

Un profil en long de la ligne d'eau à l'étiage est idéal pour repérer les singularités hydrauliques, car elles sont, dans ces conditions, au maximum de leur influence. Elles forment dans le profil en long une « marche d'escalier » dont la hauteur ira ensuite en s'atténuant lorsque le débit augmentera. En amont de ces « marches d'escalier », la ligne d'eau est plate sur une certaine longueur avant de retrouver une certaine pente. Le point de cassure entre le plateau quasi-horizontale et la zone de pente traduit la longueur d'influence maximum de la singularité. Sa détermination nécessite donc d'être préalablement très vigilant à l'égard de la façon dont les points réels ont été reliés entre eux pour former un profil en long : un point de cassure apparent peut n'être dû qu'à un trop faible nombre de points de construction du profil en long.

Les profils en long lors des crues permettent, en plus de ce que leur analyse comparative donne à comprendre de la dynamique globale et de ses variations, de saisir les éventuelles

influences de freins hydrauliques pouvant avoir une influence décisive sur les écoulements : mise en charge d'ouvrages de franchissement, engorgement d'ouvrages de décharge, encombres flottantes obstruant un débouché hydraulique, etc. L'apparition de petites marches d'escalier, précédées en amont d'un court (et parfois, imperceptible) plateau quasi-horizontale, à des endroits où il n'y en avait pas à l'étiage, trahit ce type de freins en crue.

4.2. Les pentes de la vallée

Il est rare que les cours d'eau étudiés aient un caractère totalement sauvage, c'est-à-dire, que ni leurs berges, ni leur cours, ni leurs eaux, n'aient subi au moins une tentative de domestication, fut-elle lointaine et dont l'influence résiduelle peut être difficile à déceler.

Le profil en long de la vallée peut être instructif à ce sujet, encore qu'il soit souvent très théorique faute d'élément structurant clairement identifié dans le sens longitudinal qui permettrait de mesurer une pente moyenne.

On peut imaginer par exemple de relier les points bas de la vallée (hors le lit du cours d'eau) sur une ligne épousant à peu près la direction moyenne de la vallée si celle-ci est bien dessinée, mais cela nécessite une abondance de points topographiques de la vallée que seule permet une photogrammétrie du secteur d'étude. Encore faut-il disposer d'outils d'analyse de ces données assez puissants pour digérer le volume de données et assez fins pour faire émerger des tendances claires sur des quantités aussi sensibles que des pentes moyennes. Si de tels outils et données topographiques sont disponibles, l'analyse ne pourra se limiter à la pente de la vallée, mais devra s'attacher à identifier les cheminements préférentiels latéraux en lit majeur (se reporter à cette rubrique).

Il faut privilégier des voies plus réalistes, nécessairement plus schématiques. Lorsque d'anciennes données d'études antérieures sont disponibles sous forme de profils en travers, il peut être instructif de sélectionner, dans chaque profil, le point le plus bas de la vallée inondable (à l'exclusion du lit mineur), et de reconstituer ainsi un profil en long de la vallée. Il faut bien entendu veiller à sélectionner ces points bas, en excluant ceux qui ne sont pas représentatifs du terrain naturel (fonds de gravières, déblais routiers, plate-forme remblayée en prolongement de terrasse alluviale, etc.), ce qui complique singulièrement l'analyse. Les documents cartographiques et photographiques peuvent pallier une connaissance insuffisante du terrain.

Une autre possibilité est de recourir à des courbes de niveau de l'Institut Géographique National. Les pentes longitudinales calculées à partir de ces données sont exploitables bien qu'à prendre plutôt comme des ordres de grandeur. Par contre, ces courbes de niveau peuvent donner une information qualitative complémentaire au niveau d'un découplage entre la pente longitudinale du cours d'eau et la pente longitudinale de la vallée. Ainsi, la distorsion des courbes de niveau en deux endroits au moins entre les lignes de niveaux marquant les coteaux de la vallée, dont un coïncidant évidemment avec le lit mineur, peut trahir, si elle se répète de proche en proche le long du cours d'eau, l'existence d'au moins un cheminement longitudinal latéral dans le terrain naturel de la vallée.

Ces pentes calculées dans la vallée peuvent expliquer des modifications significatives de comportement hydraulique des écoulements lors de grands débordements, et modifier le diagnostic hydraulique établi à l'aide du seul lit mineur. Lorsqu'elles sont plus fortes que celles du lit mineur (dans le cas d'une dérivation du cours d'eau le long du coteau pour préserver son énergie hydraulique potentielle en vue de turbinage, par exemple), elles ont tendance à rendre le diagnostic basé sur le seul lit mineur un peu pessimiste. Dans le cas contraire (lorsque le cours s'enfonce dans la terrasse alluviale), les inondations seront sans doute plus graves que ce que le profil en long du seul lit mineur laisse entrevoir.

Lorsque le secteur d'étude recouvre un ou plusieurs confluent, il est intéressant de reporter, sur le même profil en long que le cours principal, ceux (simplifiés) des affluents. Les courbes de niveaux de l'IGN font parfaitement l'affaire. Lorsque, comme c'est souvent le cas, on manque d'informations sur les crues subies par ces affluents, cette superposition permet

d'appréhender facilement sur quelle longueur d'affluent les crues du cours principal vont faire sentir leur influence, et de plus, de ne pas « oublier » les inondations et autres impacts dans ces zones plus écartées du cours principal mais hydrauliquement connectées à lui par l'intermédiaire des affluents.

4.3. Les éléments structurants du champ d'expansion

La difficulté même de déterminer et d'exploiter une pente moyenne de vallée en dehors du lit mineur du cours d'eau provient en fait de la fragilité de ce concept. Pour qu'une pente de vallée soit comparée à la pente moyenne du cours, encore faut-il qu'un écoulement continu puisse s'établir de proche en proche entre les points bas identifiés dans la vallée.

Les éléments structurants du champ d'expansion désignent tous les éléments qui contrecarrent justement l'hypothèse d'un tel écoulement continu dans le lit majeur, ou qui le restreignent à des zones nettement identifiables. Une définition positive pourrait être que tout élément topographique émergeant significativement au-dessus du terrain naturel dans le champ d'expansion des crues est potentiellement un élément structurant du champ d'expansion.

Il s'agit souvent d'éléments d'origine anthropique, qui forment une saillie nette lisible sur les cartes 1/25 000^{ème} de l'IGN : talus, endiguements, routes, voie ferrée, remblaiements, merlons, signalés en traits tiretés du côté du point bas.

Généralement, s'ils sont de taille suffisante pour être marqués comme talus sur les cartes de l'IGN, ces éléments forment effectivement un obstacle à l'écoulement des eaux sans qu'il soit besoin de vérifier leur hauteur effective sur le terrain. L'écoulement en lit majeur est souvent trop lent pour franchir l'obstacle, et s'orientera donc fréquemment de manière à le contourner. On peut donc considérer, dans l'analyse du fonctionnement hydraulique, que l'écoulement en lit majeur est contraint de contourner au moins en grande partie ces éléments structurants.

L'information complémentaire des éléments structurants est donc celle des débouchés hydrauliques de décharge, par lesquels l'écoulement dévié pourra passer en aval de l'obstacle. Il peut s'agir tout simplement d'une discontinuité dans le linéaire de l'obstacle, d'un point bas, d'une ouverture pratiquée dans l'obstacle (buse, petit pont, etc.), ou, plus rarement, d'un ouvrage hydraulique de décharge (seuil, vanne, clapet anti-retour, etc.).

La plupart des débouchés hydrauliques de décharge sont de taille trop réduite pour figurer sur les cartes de l'IGN, hormis les vannages ou les ponceaux. Les buses, qui constituent la forme la plus fréquente de ces débouchés hydrauliques de décharge, ne peuvent être identifiées qu'au moment d'une visite de terrain. De même, tous ces petits débouchés hydrauliques sont vulnérables au risque d'obstruction, qu'elle soit ponctuelle, par accumulation de flottants de grande taille (troncs d'arbres, véhicules, etc.) en travers de sa section d'entrée, ou plus durable, par accumulation de sédiments et débris laissés par une précédente crue et consolidés par le temps et la végétation. Leur efficacité est directement affectée par ce genre d'obstruction, et il conviendra de statuer sur ce sujet au moment de l'étude.

Un autre type d'éléments structurants, moins « durs » que les précédents, est celui des obstacles végétaux. Une végétation dense et de hauteur au moins égale à celle de l'écoulement qui tente de s'y frayer un chemin oppose une forte résistance à l'écoulement. Les tables usuelles de rugosité permettent de déterminer la valeur (forte) affectée à ce type de zone lorsqu'elle occupe tout le lit majeur, mais généralement, une fraction seulement de la plaine inondable est concernée. Au niveau de l'analyse du fonctionnement hydraulique, il est pertinent de considérer ces zones comme des obstacles perméables qui provoquent un contournement similaire à celui provoqué par un obstacle « dur ».

Il est difficile d'estimer la densité végétale à partir de laquelle on doit considérer la zone comme un obstacle effectif. Une simple clôture grillagée surchargée de débris végétaux

peut devenir un obstacle sérieux, alors qu'une haie d'arbres espacés de plus d'un mètre sur une seule rangée peut n'opposer qu'une modeste résistance à l'écoulement. Les cartes de l'IGN et les photographies aériennes permettent facilement de localiser les zones boisées, où l'on peut estimer que l'écoulement est très fortement ralenti dans son mouvement d'ensemble. Les champs cultivés ne doivent pas être oubliés dans ce recensement. Les cultures de céréales, lorsqu'elles ont atteint quelques décimètres de hauteur, s'opposent significativement à l'écoulement. Par contre, une fois fauchées, elles constituent en quelque sorte un débouché hydraulique de décharge

4.4. Des dépressions aux cheminements secondaires

Le lit majeur est souvent le siège d'écoulements assez hétérogènes. En moyenne assez lents, ceux-ci peuvent localement se renforcer en empruntant des cheminements secondaires.

Les dépressions de terrain dans la vallée inondable sont autant de points d'attraction pour l'écoulement (toutes proportions gardées, on pourrait parler de drains). Pour peu qu'elles soient mises en communication avec le cours d'eau, elles peuvent drainer une fraction de débit qui vient remplir la dépression et diminuer de la sorte le potentiel d'attraction de la dépression, à moins qu'une autre dépression en lit majeur, voisine de la précédente, et « connectée » à elle via un col du terrain naturel, ne draine à son tour le débit dévié du cours principal

Des chapelets de dépressions peuvent générer, lors d'un débordement conséquent, des circulations d'eau non-négligeables et de vitesse supérieure à celle de l'écoulement global en lit majeur. Il peut même arriver que ces chapelets de dépressions finissent par retrouver une connexion avec le cours principal, restituant alors le débit prélevé.

L'identification de tels cheminements secondaires commence donc par celle des dépressions et de leurs éventuelles connexions. L'hydrogéomorphologie fournit des outils d'analyse utiles. Photographies aériennes et approche historique de l'occupation des sols permettent notamment de reconnaître d'anciens bras de cours d'eau délaissés au long de la divagation. Les limites communales ou cadastrales se sont souvent appuyées sur un tracé de cours d'eau qui a pu évoluer depuis. Les bois et autres zones humides à proximité immédiate du cours principal prospèrent aisément dans des secteurs en légère dépression que sont les lits comblés des bras délaissés.

Un deuxième type de matériel permet de compléter ou d'affiner le diagnostic précédent : les photographies (droites ou obliques) prises lors des crues peuvent dévoiler des secteurs où l'écoulement est sensiblement plus intense que dans les secteurs voisins du lit majeur. Les signes de reconnaissance sont du même ordre que ceux qui ont permis, au début de l'analyse, l'identification des tronçons à tendance lente et ceux à tendance rapide. Il s'agit de corréliser les hétérogénéités d'aspect de la surface de l'eau avec les hétérogénéités de vitesses. Un filon d'eau plus rapide que l'étendue d'eau dans laquelle il se déplace génère une agitation en surface, parfois trop modeste pour être perceptible sur une photographie, mais aussi, des turbulences marquées à l'interface entre eaux rapides et eaux lentes. Ces turbulences forment des tourbillons, de l'écume, qui marquent sensiblement les contours des zones rapides. Lorsque le filon rapide retrouve une zone lente, il disperse son énergie cinétique dans des remous également assez prononcés, qui forment une « barre » délimitant la fin du filon, et qu'il ne faut pas confondre avec une limite latérale.

Le paragraphe 7. Annexes Exemple d'application présente une mise en œuvre de ces principes pour tenter de déterminer les cheminements principaux et secondaires dans un cas concret.

Un troisième type de matériel peut fournir des indications encore plus précises, mais sa disponibilité relève plus du cas singulier que de la généralité : les données photogrammétriques proviendront probablement d'une étude antérieure ou d'une autre

activité du maître d'ouvrage, récupérées d'une étude antérieure, ou, lorsque l'étude le justifie (délimitation de zones inondables, etc), d'une commande préalable de topographie par photogrammétrie (se reporter au chapitre concernant les données topographiques). Il faut alors mettre en œuvre des outils d'analyse de données topographiques puissants et précis, pour dégager des semis de points et autres lignes de rupture, les courbes de niveau permettant de repérer les distorsions locales trahissant les dépressions et les cheminements continus. Il faut cependant avoir l'œil plus acéré que l'outil, en imaginant les cheminements là où l'outil, faute de disposer de point topographique exactement dans les cols et dépressions, ne voit pas de continuité.

Ces interprétations devront être confirmées à l'aide d'autres matériels ou, idéalement, à l'aide d'une visite sur le terrain.

L'élaboration d'un Modèle Numérique de Terrain et la visualisation 3D d'un jeu de données photogram--métriques met en évidence les lieux de cheminements secondaires potentiels.

Une analyse plus fine des courbes de niveaux permet de préciser ces cheminements potentiels (mais cela relève alors véritablement de l'étude elle-même).

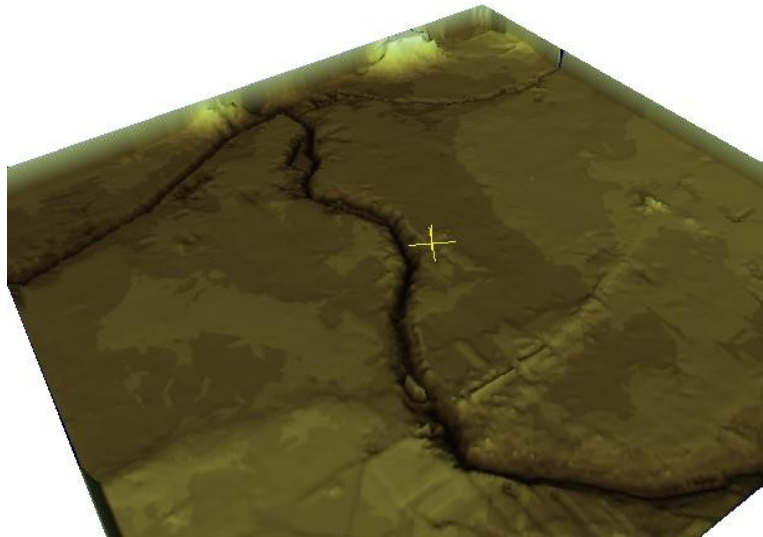


Figure 43 – Vue en perspective des données de photogrammétrie de la plaine de l'Aveyron à Albi (les zones de dépression apparaissent en brun foncé, les zones en léger surplomb apparaissent en brun clair)

En pratique, on sélectionne un sous-secteur de lit majeur de sorte que la dénivellée moyenne entre la bordure amont et la bordure aval ne dépasse pas un mètre environ (pour 16 classes horizontales d'analyse et une inondation jusqu'à 2 mètres au-dessus du terrain naturel de lit majeur). Autrement dit, on s'arrange pour que les tranches horizontales d'analyse ne dépassent pas une vingtaine de centimètres. Plus épaisses, elles ne permettent plus de capter les cheminements secondaires potentiels. Plus fines, elles ne sont plus en rapport avec la précision des données et peuvent donner une influence décisive aux points « erronés » (au sens où ils sont donnés à l'écart type près).

4.5. Concentration ou diffusion des écoulements

L'identification des chemins que peut emprunter l'écoulement ne suffit pas à donner une idée quantitative de la répartition des flux entre différents cheminements concurrents. A ce stade, l'analyse du fonctionnement hydraulique atteint un niveau difficilement accessible sans calcul.

Il est toutefois possible de prédire quelques tendances de concentration ou de diffusion des écoulements.

En régime fluvial, une réduction du tiers ou plus de la largeur d'écoulement suffit à provoquer une concentration sensible des flux. Les vitesses ne seront toutefois pas augmentées en amont du lieu de concentration au-delà d'un demi-cercle de diamètre basé sur le débouché hydraulique. L'augmentation sera bien plus perceptible à l'aval, dans un cône délimitant une zone de mélange des eaux accélérées et des eaux plus

tranquilles en aval, par l'apparition de tourbillons, d'une turbidité renforcée, voire d'écume.

En régime torrentiel, une réduction du tiers ou plus de la largeur d'écoulement provoque un ralentissement conséquent des flux, et une surélévation de niveaux en conséquence (cf. définition de la charge hydraulique spécifique). Le risque est bien entendu de voir apparaître un ressaut hydraulique dont l'effet érosif est encore plus important que celui de la seule vitesse d'écoulement torrentiel.

L'analyse des cheminements secondaires, que ce soit pour préparer la modélisation ou repérer les zones d'érosion potentielle, doit donc étaler vers l'aval ou vers l'amont, selon le régime hydraulique prévisible, le secteur sensible à l'accélération ou au ralentissement.

5. Les connexions hydrauliques

5.1. Confluence de cheminements

A l'issue de l'analyse des cheminements hydrauliques, on dispose d'une carte schématique présentant les chemins susceptibles d'être empruntés par les écoulements durant les crues. Il reste à établir les connexions entre ces voies, en se posant, pour chacune d'elles, la question fondamentale : d'où vient cette eau et où va t'elle ?

Il ne serait pas satisfaisant de laisser s'arrêter la schématisation du fonctionnement hydraulique du cours d'eau à la fin du stade précédent, avec des chenaux de vitesse signalés localement, mais aucune cohérence d'ensemble établie.

Cet exercice est toutefois déjà un acte de modélisation en soi, et il ne faut pas s'y risquer sans en mesurer la difficulté réelle. Au stade de l'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude, il est vraisemblablement trop tôt pour affirmer l'existence, la nature et les conditions de toutes les connexions.

Par contre, les pétitionnaires à l'appel d'offres ne manqueront pas de faire cet exercice pour mesurer la complexité du secteur d'étude et proposer une solution technique appropriée, dès la rédaction des offres. Il importe donc que celui qui va lancer et juger l'appel d'offres soit pleinement conscient de la complexité potentielle que recèle l'étude qu'il demande, pour provisionner un montant adapté et accueillir correctement les argumentaires techniques des offres.

Il faut donc, dès l'analyse du fonctionnement hydraulique préparatoire de la rédaction du cahier des charges de l'appel d'offres, tenter de deviner les connexions potentielles qui peuvent s'établir, en laissant aux bureaux d'études le soin de conforter ou de rectifier l'analyse au moment de la remise des offres, et ultérieurement, pour le titulaire du marché, celui d'affiner et de quantifier ces liaisons.

On désignera ces confluences de cheminements hydrauliques sous le terme de nœuds. La propriété simple de ces lieux est d'illustrer la loi de continuité : la somme des débits qui le quittent est égale à la somme des débits qui y convergent.

5.2. Nature et conditions des connexions

Une version simpliste de nœud est la jonction linéaire entre deux tronçons homogènes. Si cette vérité topologique ne nous apporte rien pour ce qui est de l'identification des nœuds qui nous intéressent véritablement, elle permet de caractériser facilement la nature des connexions à rechercher (se reporter au paragraphe en question). Les singularités hydrauliques qui séparent deux tronçons homogènes peuvent souvent en séparer trois ou plus.

Il faut toutefois pousser plus loin l'analyse, en précisant la nature des échanges hydrauliques hébergés par le nœud, et notamment, les conditions qui fournissent les clefs de ses gammes de fonctionnement. La liste suivante évoque les points à examiner pour chaque connexion.

5.2.1. confluences

La connexion la plus simple et la plus naturelle reste la confluence entre les chemins hydrauliques. L'un des flux, souvent moins important que l'autre, est désigné comme affluent de l'autre, désigné comme cours principal. Le rapport de force entre cours principal et affluent façonne la zone de confluence, en fonction de la régularité de son occurrence.

Les confluences de cours d'eau à régime fluvial régulier au cours de l'année sont des équilibres de lits mineurs imbriqués de sorte que le niveau moyen au débouché de l'affluent est sensiblement égal à celui du cours principal. La zone de lit majeur comprise entre les deux lits à l'amont immédiat de la confluence est souvent une zone humide de faible surplomb par rapport aux berges, régulièrement brassée par les crues déphasées de l'un et l'autre cours. Ces zones de mélange d'eaux génèrent une simple perte de charge hydraulique qui peut être calculée à partir de tables de référence ou de données hydrométriques disponibles dans la zone, et ne posent pas de difficulté particulière.

Les confluences de cheminements hydrauliques plus épisodiques, qu'il s'agisse de torrents interceptés par le cours principal ou de bras secondaires remis en eau lors des crues du bras principal, sont plus marquées par le traumatisme morphodynamique subi.

Dans le premier cas, une chute d'eau ou un ressaut hydraulique chahute la confluence, qui conserve sa propriété de continuité des débits, mais constitue en fait une discontinuité hydraulique qui découple le fonctionnement hydraulique de l'affluent de celui du cours principal. Le cône torrentiel qui se forme généralement dans cette zone avertit le modélisateur.

Dans le second cas, l'écoulement secondaire est souvent noyé par le cours principal à la jonction aval. La continuité hydraulique est alors à peu près assurée. La principale difficulté consistera à établir si les niveaux sont différents dans le bras secondaire et dans le bras principal, auquel cas la confluence amont montrera une hétérogénéité dans la répartition des vitesses, avec une accélération vers le bras le plus bas, ou si les niveaux resteront sensiblement égaux, auquel cas les deux bras ne constituent en fait qu'une répartition homogène de flux dans une section à deux chenaux.

5.2.2. seuils et vannages

Qu'il s'agisse de vestiges d'anciens contrôles de dérivations de moulins, ou d'ouvrages de gestion des crues et de régulation de la ressource en eau, les seuils et vannages fonctionnent selon le même principe. Constituant un obstacle à l'écoulement des eaux, ils ralentissent le cours d'eau en amont en même temps qu'ils franchissent l'obstacle, soit par surverse, soit à travers un orifice (en position d'une vanne de contrôle) en charge, l'écoulement reprendant de la vitesse.

Ce raccordement est parfois si « abrupt » que l'écoulement franchit localement la hauteur critique et se trouve, sur quelque distance, en régime torrentiel, analogue, dans la discontinuité hydraulique que cela crée, à une chute d'eau. Le fonctionnement hydraulique du tronçon en amont ne dépend alors plus du tout du fonctionnement hydraulique du tronçon en aval, mais seulement de la configuration géométrique du débouché hydraulique. On parle de dénoyage du seuil ou du vannage. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si le raccordement entre l'amont et l'aval de l'ouvrage s'effectue suffisamment graduellement pour que les vitesses demeurent inférieures à la vitesse critique, le niveau d'eau à l'aval influence le niveau amont en complément de la configuration géométrique du débouché hydraulique.



Figure 44
franchissen

Si la détermination du rôle exact joué par l'ouvrage vis-à-vis des niveaux du tronçon en amont relève clairement et uniquement du modélisateur, il est important de pouvoir statuer dès le stade de l'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'études sur le noyage (ou le dénoyage) d'un tel ouvrage lorsqu'il assure la connexion entre différents cheminements. En effet, lorsqu'un segment libre rejoint le cours principal via un ouvrage dénoyé, il est inutile de le modéliser avec le reste du cours principal : son comportement hydraulique est déconnecté et doit faire l'objet, le cas échéant, d'une autre étude. Seul le débit apporté par ce segment doit être ajouté à celui du cours principal.

5.2.3. remblais déversants

Les éléments structurants du champ d'expansion des crues ne sont pas toujours assez émergents, lors des crues, pour s'opposer totalement à l'écoulement des eaux. Débordés par l'inondation, ils deviennent, au niveau de leurs points bas, de véritables seuils déversants.

De telles submersions, forcément conditionnées par la hauteur à franchir par l'écoulement, peuvent générer de nouveaux points d'attraction de flux, et donc, de nouveaux cheminements secondaires que l'analyse topographique du lit majeur ne permettait pas de prévoir.



Figure 45 – Déversement des eaux de l'Oise (à droite) par-dessus une route qui la longe latéralement

L'analyse avant calcul ne peut statuer sur la réalité de telles liaisons « devinées » qu'avec la confrontation entre des laisses de crues, des profils en long de ligne d'eau en crue, et des informations altimétriques concernant la route, ou encore, des témoignages visuels d'un tel fonctionnement lors d'un événement passé.

Le déversement sur les remblais submergés est généralement dénoyé, ce qui simplifie sa prise en compte dans l'analyse du fonctionnement hydraulique (cf. paragraphe précédent), mais complique les scénarios d'analyse par le fait que la violence des courants en aval immédiat des remblais conduit le plus souvent à son érosion rapide. Si elle n'est pas contrecarrée, cette érosion forme une brèche dans le remblai, qui s'agrandit jusqu'à ce que les vitesses de franchissement de l'écoulement dans la brèche soient inférieures à la limite d'érosion des matériaux remblayés. Cela correspond généralement à l'instauration d'un régime fluvial dans la brèche agrandie, et donc, au noyage de l'orifice ainsi formé. La prise en compte de l'influence entre l'aval et l'amont doit alors être prise en compte explicitement dans la modélisation.

5.3. Déconnexions et discontinuités

En pratique, pour chaque connexion identifiée ou soupçonnée, il convient d'examiner les scénarios probables de fonctionnement, et surtout, les éléments déterminants qui permettront de statuer sur les scénarios à retenir.

A part les niveaux moyens ou d'étiage, faciles d'accès, l'analyse doit se porter sur les conditions hydrauliques particulières, en imaginant notamment des combinaisons autres que la plus contraignante a priori : la crue généralisée sur le cours principal et les affluents. Il se peut que des déphasages entre ondes de crues des différents affluents faisant confluence génère des situations localement plus critiques pour les connexions entre tronçons.

Il est inutile de modéliser tous les tronçons qui subissent une déconnexion hydraulique d'avec le cours principal étudié et notamment de la zone d'objectifs. Seuls les débits transitant dans ces connexions doivent être pris en compte, selon la forme de modélisation, comme apport ou soutirage de débit évalué par ailleurs.

Le cas d'un lit perché est à ce titre révélateur : un lit mineur perché en bordure de vallée (dérivé à fins de préservation de son énergie hydraulique pour un moulin plus en aval) peut être déconnecté du lit majeur centré dans la vallée au fond de laquelle se trouve l'« ancien » lit mineur. Les écoulements dans le fond de vallée et dans le lit mineur dérivé sont alors indépendants, au débit transitant dans les connexions près.

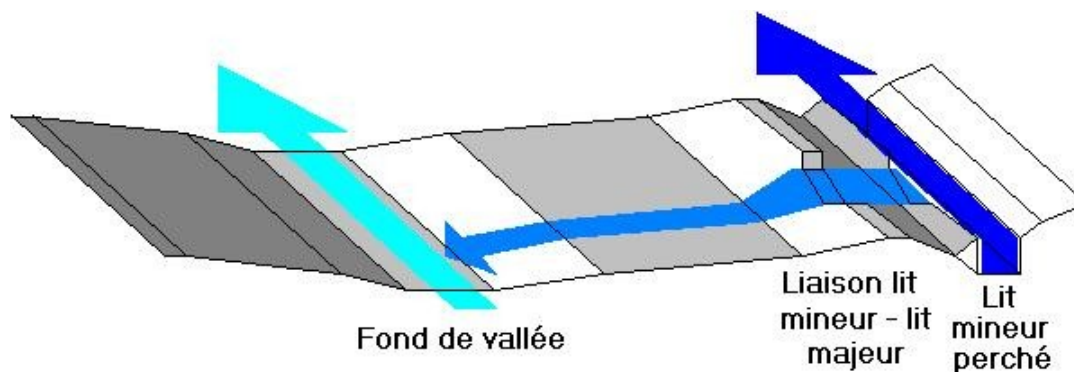


Figure 46 – schéma de fonctionnement classique d'une connexion ponctuelle entre lit mineur perché et fond de vallée

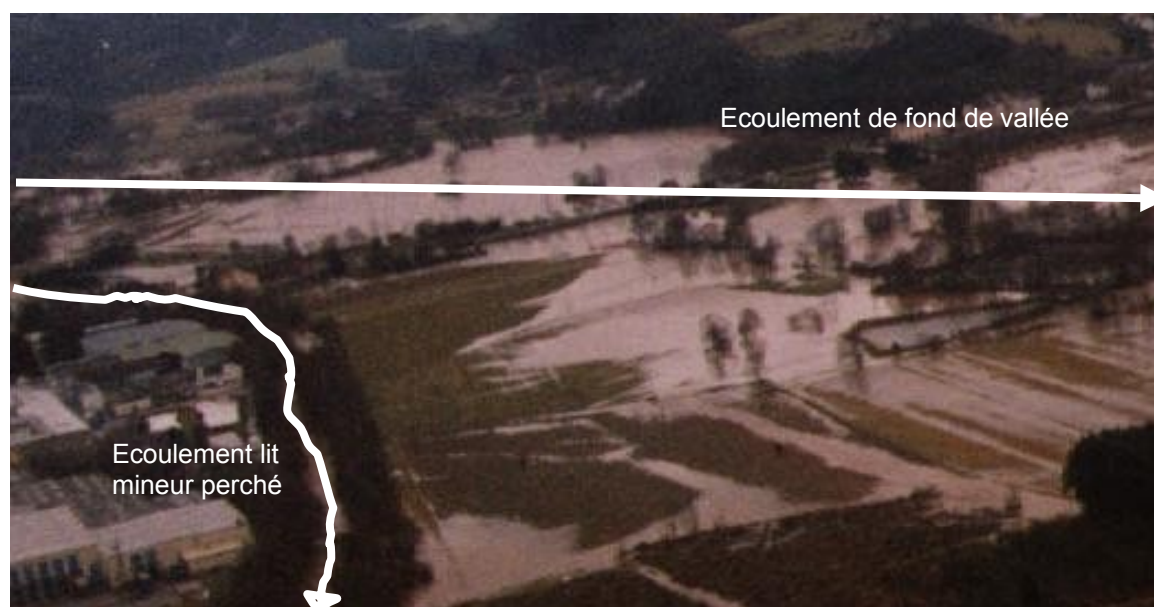


Figure 47 – vue aérienne d'écoulements de crue dans un lit perché contre le flanc de vallée

Quand bien même le prestataire tiendrait à modéliser explicitement les déconnexions hydrauliques, il devra prendre bien soin de ne pas s'en tenir à une simple intégration de la géométrie de connexion dans le modèle en espérant que le calcul tiendra tout simplement compte des phénomènes afférents (cf. le chapitre sur la modélisation numérique). L'analyse des discontinuités hydrauliques permet de pointer clairement les zones où l'expertise du prestataire doit compléter le systématisme du logiciel.

Signalons enfin que l'identification d'une déconnexion hydraulique en un point du lit majeur ne suffit pas à sortir toute la zone voisine du lit majeur du secteur d'étude. L'attraction hydraulique de la déconnexion n'entraîne tout l'écoulement que si la structuration du lit oblige toute la fraction de l'écoulement débordant à emprunter ce

cheminement. Sinon, il suffit généralement que quelques dizaines de mètres séparent la déconnexion hydraulique et un autre cheminement secondaire pour que celui-ci maintienne sa débitance.

5.4 Limite aval

La zone d'étude hydraulique doit couvrir la zone d'objectifs. Comme il vient d'être évoqué, il n'est pas intéressant de prolonger le secteur d'étude hydraulique en aval de la zone d'objectifs au-delà de la première déconnexion hydraulique pérenne rencontrée. Toutefois, cette première déconnexion peut se trouver loin en aval, ou dépendre de conditions hydrauliques de noyage / dénoyage qui nécessitent de calculer également les paramètres hydrauliques en aval de la connexion pour statuer sur son état.

La limite aval de la zone d'étude hydraulique ne doit pas nécessairement coïncider avec un nœud topologique tel qu'issu de l'analyse morphologique et hydraulique. Il suffit en fait qu'on puisse y disposer de données hydrauliques fiables pour former une limite aval convenable.

L'idéal est évidemment de disposer d'une station hydrométrique où une courbe de tarage est établie. Quand bien même cette précieuse courbe ne serait pas établie, le prestataire pourra toujours en construire une à partir des mesures de niveaux disponibles et de quelques informations complémentaires : un profil en amont, un autre en aval, un profil en travers à l'endroit de la station hydrométrique même.

Il n'est pas rare que la première station de mesures en aval de la zone d'objectifs se situe à l'aval d'une discontinuité hydraulique. Le prestataire devra alors établir la loi hydraulique liant les hauteurs et les débits à cet endroit.

Un autre cas de figure assez courant est l'absence de déconnexion hydraulique entre la zone d'objectifs et la première station hydrométrique assez éloignée. Il n'est alors ni judicieux, ni économique, de modéliser toute cette zone uniquement pour ramener au niveau de la zone d'objectifs l'information aval qui fait défaut. Il est préférable de stopper la modélisation de la géométrie réelle entre un et dix kilomètres (grosso modo, l'inverse de la pente moyenne exprimée en mètres par kilomètre) de l'aval de la zone d'objectifs, jusque dans une partie assez homogène de cours d'eau pour supposer la prépondérance d'une condition hydraulique de type « normal », c'est-à-dire déterminée par la pente moyenne et la géométrie supposée uniforme de la rivière en aval. Une section de géométrie réglée (pont, notamment) sera particulièrement prisee.

5.5. Limite amont

En régime torrentiel, une information de niveau d'eau doit être fournie en amont du secteur d'étude hydraulique. Pour ce faire, on procèdera de même que pour la limite aval, en raisonnant à contre-courant.

En régime fluvial, il est inutile de calculer les paramètres hydrauliques en amont de la zone d'objectifs, puisqu'ils n'auront aucune incidence sur les seuls paramètres hydrauliques qui nous intéressent : précisément, ceux de la zone d'objectifs.

Seuls les débits arrivant dans le secteur d'étude hydraulique sont intéressants. Ils doivent donc préalablement être déterminés aux points d'exutoire où des stations hydrométriques sont disponibles, de préférence, ou, à défaut, aux points de confluence entre affluents et cours principal. La zone d'étude hydrologique doit donc s'étendre depuis ces stations amont jusqu'à la zone d'objectifs, voire encore plus en aval, jusqu'à la station hydrométrique suivante pour recouper les extrapolations.

Il faut en effet déterminer les débits aux endroits où l'hydrométrie ou l'hydrographie permettent de raisonner, mais rapporter ces informations au niveau de l'amont de la zone d'étude hydraulique en tenant compte des phénomènes de laminage ou de concentration liés à la propagation de l'onde de débit.

La zone d'étude hydrologique englobe donc nécessairement toute la zone d'étude hydraulique.

6. La topologie hydraulique dans la commande

6.1. Tâches incombant à l'assistant au maître d'ouvrage (ou au maître d'œuvre)

L'analyse de la topologie hydraulique fait appel à un éventail assez large et graduellement complexe d'outils conceptuels que seule une pratique avérée permet de maîtriser parfaitement. Il n'est donc pas question d'attendre du maître d'ouvrage débutant qu'il se livre à l'ensemble de l'exercice dès son premier coup d'essai.

Pour autant, il lui est recommandé de mener cette réflexion aussi loin que possible à chaque fois qu'il en aura l'occasion, afin d'aiguiser son sens critique lors de la lecture d'offres techniques basées sur des outils qui sont plus ou moins adaptés en fonction de la topologie hydraulique. Il y parviendra d'autant mieux qu'il réclame, dans son cahier des charges, la formalisation d'une telle réflexion de la part du prestataire.

Au niveau de l'appel d'offres, il peut demander aux pétitionnaires qu'ils esquissent rapidement une ébauche de topologie hydraulique, une amorce de réflexion sur la nature et la répartition des écoulements dans la vallée à étudier, afin de justifier du choix de son outil de calcul. Il ne peut toutefois pas exiger une analyse complète, qui relèverait déjà du niveau de la prestation, sans rémunérer cette démarche intellectuelle par un marché de définition, par exemple.

Au niveau de la prestation elle-même, il est recommandé de demander au prestataire une première analyse du fonctionnement hydraulique affirmée par l'analyse des données existantes, archives, études précédentes, lasses de crues et autres matériels d'information hydraulique, avant toute tentative de calcul ou de modélisation. Le choix de l'outil adéquat devra en découler, et non l'inverse.

A l'issue du calcul ou de la modélisation, cette analyse devra trouver sa forme finale, rectifiée et ajustée à l'aide des données quantitatives obtenues.

6.2. Eléments pour la rédaction du cahier des charges et l'estimation financière

L'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude, quand bien même elle doit avoir été préalablement menée par le maître d'ouvrage, doit être conduite par le prestataire de l'étude, et doit constituer un résultat de l'étude (donc être partie intégrante de la commande et de la rémunération).

Il paraît opportun de réclamer une première esquisse de cette formalisation dès le stade de la commande de topographie particulière. Elle serait basée sur l'intégration des clefs de l'analyse des données récoltées dans la trame des remblais, voiries et digues bien connus et éventuellement des données topographiques déjà disponibles à ce stade de l'étude : les données photogrammétriques commandées par anticipation sur le secteur d'étude pour lesquelles le prestataire hydraulique n'apporte aucune plus-value « métier ». Elle permettrait notamment d'expliquer les choix de topologie du modèle. Une restitution définitive, rectifiant au besoin cette première esquisse grâce aux résultats de la modélisation, doit conclure l'étude.

La formalisation de l'analyse peut être une restitution sur carte, ou un schéma fléché sur lequel toutes les informations correspondant aux questions posées précédemment, doivent être reportées, et la cohérence générale, visualisable. Les cheminements hydrauliques sont représentés, toutes les zones constatées ou supposées en eau doivent être expliquées qualitativement (d'où vient cette eau ?), les connexions hydrauliques doivent être explicitées (buses, passages sous remblai, seuils, etc) et les fonctionnements

« conditionnels » (déversement à partir d'une certaine cote, donc d'un certain débit, mise en eau si tel autre lieu l'est déjà, etc) sont matérialisés par une symbolique convenue avec le maître d'ouvrage.

Il n'appartient pas au CCTP de l'appel d'offres de spécifier les modalités pratiques et détaillées du travail d'enquête sur le terrain qui dépend beaucoup de la personnalité des chargés d'études, et qui ne posent en soi que rarement des problèmes. Il faut simplement veiller à ce que l'enquête de terrain soit prise au sérieux par les candidats de l'appel d'offre autant que par le titulaire qui l'emporte, en allouant explicitement à ce poste un prix dans le bordereau, détaillé en nombre de jours prévus et coût journalier (pour information, la journée d'ingénieur est facturée entre 600 et 1200 €, et la journée de technicien est facturée entre 200 et 500 € en 2003).

La rémunération de ce poste – dont la consistance peut être révélatrice du sérieux dont compte faire preuve le candidat, par rapport à des offres concurrentes – sera faite sur visa des compte-rendus d'entretiens et coordonnées des personnes rencontrées. Ces éléments ne sont toutefois pas cantonnés à une fonction comptable de marché, mais permettent également de capitaliser les informations recueillies par le bureau d'études lors de son enquête, et dont on perd trop souvent la trace faute de restitution propre.

Le CCTP peut utilement préciser les zones d'ombre dans les informations disponibles, connues des services, sur lesquelles un complément d'information est particulièrement attendu. Il doit également mentionner toutes les incohérences apparentes déjà connues, et réclamer du prestataire une analyse critique comparée qui permette de lever au maximum les incertitudes. Cela ne consiste pas nécessairement à disqualifier certaines données au bénéfice d'autres, mais de retrouver une explication pertinente de l'écart entre données qui ne devraient pas être incohérentes (cf. chapitre sur les données hydrauliques). L'analyse critique des données disponibles doit constituer un résultat de l'étude.

7. Annexes

7.1. Données d'archives

Les informations historiques peuvent fournir des informations très précieuses pour des événements antérieurs à la mise en place des réseaux de mesure. La lecture de la dynamique hydraulique n'est plus quasi-continue, mais limitée à quelques événements saillant de la mémoire collective. Ces informations discrètes permettent de mettre utilement en perspective les appréciations issues des sources récentes.

Les cartes anciennes (Cassini, état major, IGN) permettent d'identifier de potentiels bras morts à sec et autres chenaux d'écoulements préférentiels en lit majeur. Elément important de la stratégie défensive des 17^{ème}, 18^{ème} et 19^{ème} siècles, l'hydrographie est une composante à part entière des archives militaires. L'interprétation d'une dynamique hydraulique à partir d'informations cartographiques en plan demeure toutefois un exercice périlleux s'il n'est pas croisé avec une approche altimétrique. Les cartes de Cassini peuvent être consultées ou téléchargées par pavés sur le site de la bibliothèque nationale de France : <http://gallica.bnf.fr/> dans la rubrique « rechercher », en tapant, comme nom d'auteur « Cassini », et comme mot du titre, le nom d'une ville (sous-préfecture) à proximité de la zone d'étude.

Les rapports de crues des ingénieurs des ponts et chaussées et autres archives de services de l'Etat (souvent versées en vrac, mais comprenant les projets d'aménagements des voies d'eau, les dossiers d'instruction d'autorisations de droit d'eau de moulins, etc.), disponibles dans les archives départementales, contiennent de précieuses informations qualitatives (les informations quantitatives étant plus délicates à exploiter).

Les archives de journaux (disponibles aux archives départementales, à la bibliothèque nationale ou dans les archives propres des journaux anciens) fournissent une approche événementielle intéressante au plan des indications chronologiques qui peuvent en être extrapolées (reconstitution d'hydrogrammes ou de limnigrammes pour les crues lentes, notamment), mais qui nécessite une extrême vigilance de la part de l'hydraulicien qui doit veiller à recouper toutes les informations et à les replacer dans le cadre sensationnel du travail journalistique.

Les archivistes savent guider le chercheur d'information, et il faut faire appel à eux autant que possible. Cependant, il ne faut pas négliger le temps et le coût nécessaires pour sortir un document des archives !

Il ne faut surtout pas négliger de rechercher des sources bibliographiques locales (monographie d'une ville, cartes postales anciennes, archives d'évêché, sociétés locales d'amateurs en histoire, écologie, ...), qui résument une certaine mémoire de la commune (fut-elle de taille modeste). Ne pas oublier de consulter les inondations en France depuis le 6^{ème} siècle jusqu'à nos jours, Maurice Champion, Victor Dalmont et Dunod éditeurs, 1859. Ce guide a été réédité par le Cemagref et est disponible à sa librairie. Les notaires disposent parfois d'informations relatives à la cession de terrains sinistrés, avec des témoignages précis. Les déclarations de sinistres en mairie (depuis au moins 1800) fournissent également des informations. Les assureurs tiennent à jour une base de données des sinistres depuis 1989. Cette liste est non exhaustive. Il existe le site <http://www.prim.net/> et de nombreux sites internet etc....

L'hydroélectricité est par contre une source très variable d'informations. Les grands aménagements hydroélectriques font l'objet d'une conception et d'un suivi hydraulique méticuleux qui laisse de nombreuses empreintes écrites disponibles auprès d'EDF, mais les très nombreuses unités hydroélectriques au fil de l'eau cessent d'être exploitées dès que la chute est insuffisante... c'est-à-dire dès que l'hydrologie atteint la crue annuelle.

Les archives des projets de chemins de fer (disponibles à la gare Saint Lazare ou à la Société hydrotechnique du Midi à Toulouse, par exemple) comportent toujours, au niveau des ouvrages d'art au moins, des indications des Plus Hautes Eaux Connues pour les 19^{ème} et 20^{ème} siècles.

Les archives de la batellerie – dont l'activité est on ne peut plus étroitement liée aux crues – peuvent également s'avérer précieuses, mais il faut les chercher dans les musées (pour les cours d'eau flottables ou déclassés) ou à Paris au CNBA.

Les universités produisent souvent de bonnes études académiques sur le sujet des cours d'eau, de leur aménagement, de leurs crues et des risques qu'elles induisent. Ces études comportent généralement un volet d'étude de cas pour lequel un effort important de collecte et de critique de données est fourni. Il est donc recommandé, lorsque l'étude projetée est d'une certaine ampleur, de consulter l'université la plus proche pour avoir accès à ces travaux de DEA (Diplôme d'Etudes Approfondies) ou de thèse.

Attention cependant ! Une apparente redondance d'informations historiques peut n'être qu'un bouclage des archives entre elles, chacune étant la source d'une autre qui la cite, sans qu'aucune ne comporte de preuve de l'information [cf. exemple de la laisse de crue fantôme de Chartres, dans le GT4 – données hydrauliques].

Les photographies aériennes obliques, difficilement exploitables pour obtenir de l'information altimétrique, doivent être soigneusement référencées ; elles fournissent des informations sur les cheminements hydrauliques, les vitesses, très intéressantes y compris pour les crues moyennes. Le cadrage doit éviter d'inclure l'horizon (inexploitable et nuisible à la lisibilité). La mention du niveau d'eau à l'une des échelles voisines de la zone photographiée, ainsi que la date précise du cliché, sont des conditions sine qua non d'exploitation de ces informations.

Les partenariats à rechercher peuvent aller de l'allocation d'un financement à programmer (agences de l'eau, DIREN) à la mise à disposition de campagnes autonomes de la sécurité civile ou de l'armée.

Les documents vidéo de journalisme et autres rushs sont jugés chers et peu exploitables.

Les vidéo amateurs fournissent des informations intéressantes, mais d'un niveau de détail déjà précis.

La bibliographie des études antérieures sur tout ou partie du bassin versant fournit les analyses des prestataires sur le fonctionnement du cours d'eau et sa complexité notamment, mais aussi sur les données ayant existé (profils en travers, rapports, données hydrologiques, etc.). Elle doit être soigneusement inventoriée, et attentivement lue avant d'aller sur le terrain.

Les contradictions entre différentes sources d'informations bibliographiques doivent être identifiées. Leur analyse pourra être confiée à l'AMO ou au prestataire.

7.2. Données de terrain

L'enquête de terrain vise à restituer des informations concernant les particularités locales et réelles du fonctionnement hydraulique du cours d'eau : les « anciens » (agents en poste depuis plusieurs années), les maires, les services « police de l'eau », les pêcheurs, les riverains sont autant de sources auprès desquelles glaner de la mémoire manquant dans la bibliographie (embâcles, encombres, mise en charge d'ouvrages, influence d'une confluence, rupture d'ouvrages, submersion de routes, actions localisées de lutte contre l'inondation).

Les particularités locales sont des zones où le fonctionnement hydraulique est réputé pour n'être plus homogène, ou encore des zones où l'information n'est pas disponible dans les services. Il n'est pas inutile de rappeler qu'il est préférable de valoriser les réflexions du

prestataire concernant les choses méconnues plutôt que de rémunérer passivement les constats convenus de choses connues.

7.3. Fiche de visite

Cette fiche est à établir pour chaque station pertinente, représentative d'un tronçon homogène ou d'une singularité incluse dans un tronçon homogène, ou délimitant deux tronçons homogènes.

[nom du cours d'eau]	[identification station]	[date de l'observation]
LIT MINEUR	ASPECT ÉCOULEMENT	SINGULARITÉS
<i>Largeur au miroir</i>	<i>Eau lisse, effet miroir</i>	<i>Ouvrages franchissement</i>
FORME DES BERGES	<i>Bouffées tourbillonnantes</i>	<i>Ouvrages régulation</i>
<i>Micro-falaise à pic</i>	<i>Eau agitée, écume locale</i>	<i>Section de contrôle</i>
<i>Forte inclinaison</i>	MATÉRIAUX DU LIT	<i>Aménagement hydraulique</i>
<i>Pente douce</i>	<i>Vases, limons, boues</i>	LIT MAJEUR (occupation)
<i>Risberme plate</i>	<i>Sables homogènes</i>	<i>Dense et continue</i>
<i>Lèvre</i>	<i>Sables hétérogènes</i>	<i>Moyenne et continue</i>
OCCUPATION DES RIVES	<i>Graviers</i>	<i>Faible et continue</i>
<i>Nues</i>	<i>Blocs</i>	<i>Dense et discrète</i>
<i>Végétation humide</i>	<i>Substratum</i>	<i>Faible et discrète</i>
<i>Végétation sèche</i>	STYLE FLUVIAL	[photographie du site]
<i>Artificielles</i>	<i>Lit rectiligne naturel</i>	
TRANSPARENCE DE L'EAU	<i>Lit rectiligne artificiel</i>	
<i>Eau claire – fond visible</i>	<i>Lit en tresses</i>	
<i>Eau trouble – fond masqué</i>	<i>Bras multiples</i>	
<i>Eau très turbide, colorée</i>	<i>Méandres</i>	

7.4. Exemple d'application

L'exemple ci-après est tiré d'une étude de détermination de l'influence d'une infrastructure routière et de ses ouvrages de décharge dans une plaine inondable où les écoulements sont vraisemblablement complexes.

7.4.1. Délimitation du secteur d'étude

Notre étude ne consiste pas à remettre en question les hypothèses fondamentales sur lesquelles est basée la cartographie des risques d'inondations. Celles ayant trait à l'hydrologie et aux caractéristiques de la crue de 1930, prise comme événement de référence, sont notamment reprises telles quelles et nous dispensent de la réalisation d'une étude hydrologique spécifique.

Le secteur d'étude se limite donc à la zone englobant les lieux où l'autorité administrative soupçonne une modification du risque d'inondations, telle que les conditions hydrauliques aux limites soient assez bien connues pour servir de données d'entrée pour le modèle numérique.

Les lieux dont il est question sont les hameaux compris entre la Route Nationale n°20 ou la ligne ferroviaire, et l'infrastructure autoroutière n°20. On citera notamment ceux de La Treille et des Bicoux, respectivement en rive droite et en rive gauche de l'Aveyron.

L'abondance de laisses de crues dans le secteur de Réalville à Albi et au-delà permet de choisir des limites amont et aval de secteur d'étude selon des critères de modélisation sans biais. A l'amont, les remblais de la RN 20 et du RFF constituent une ligne structurante significative qui impose les caractéristiques de l'écoulement de l'Aveyron au droit des franchissements. A l'aval, la vallée n'est pas contrainte par une ligne structurante équivalente, et le choix de la limite aval du secteur d'étude se porte à l'endroit où le tracé de la vallée paraît localement rectiligne, et où l'on dispose d'une laisse de crue pour les deux crues historiques de 1930 et 1981.

7.4.2. Eléments d'hydrographie et d'hydromorphologie

Dans le secteur d'étude, l'Aveyron recueille les eaux de quelques ruisseaux sans importance, et surtout, en rive droite en aval de l'infrastructure autoroutière, celles de la Lère.

Les deux cours d'eau sont pourvus d'un lit relativement profond aux berges abruptes.

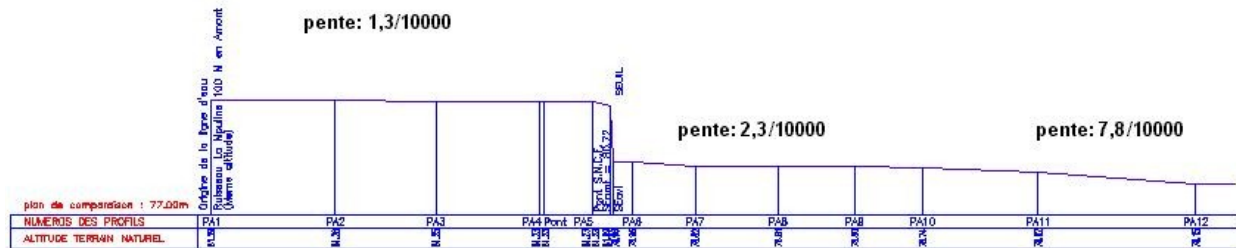
La vallée de l'Aveyron

Le lit majeur de l'Aveyron est une vaste plaine sans relief marqué, stoppée au nord et à l'ouest par des coteaux très prononcés, et à l'est, entre Aveyron et Lère, par une terrasse surplombant légèrement la vallée.

Bien que la plaine de l'Aveyron présente, plus en amont et en aval de notre secteur d'étude, les traces plus ou moins marquées d'anciens méandres abandonnés lors de la divagation du cours, rien d'aussi net n'est visible dans notre secteur d'étude. L'occupation du sol notamment ne présente aucun signe d'une éventuelle adaptation aux caprices supposés du tracé de l'Aveyron. Cette stabilité apparente est sans doute en grande partie due à l'aménagement ancien de la rivière.

Depuis plus d'un siècle et demi, en effet, un seuil barre l'Aveyron au droit d'Albi, pour desservir les installations hydrauliques d'un ancien moulin qui n'est plus en activité de nos jours, mais a été transformé en logements d'habitation. Un seuil équivalent barre le cours à quelques kilomètres en amont, et de même en aval. Ces aménagements stabilisateurs ont permis la construction des ponts de la ligne de chemin de fer et du remblai routier, qui ne présentent pas de signes d'affouillement ou d'érosion de berges qui trahiraient une tendance de contournement de ces points durs par l'écoulement.

Le lit de l'Aveyron, dans les trois kilomètres en aval du seuil d'Albias, comporte plusieurs îles largement colonisées par la végétation et qui semblent très stables. La répartition visiblement hétérogène des écoulements dans les bras qui les contournent conduit à un comblement (ou tout au moins un encombrement significatif) du bras le moins actif.



On peut donc décrire le cours de l'Aveyron dans le secteur d'étude comme celui d'une rivière aménagée et partiellement maîtrisée, sage et stable, disposant d'un large champ d'expansion de crues bien délimité par le relief, mais peu structuré si bien que les brusques changements de direction ont toutes les chances d'y induire des écoulements secondaires complexes lors des fortes crues.

La vallée de la Lère

La Lère quant à elle descend directement du relief nord-est dans une vallée étroite encadrée en rive droite par les coteaux prononcés et en rive gauche par la terrasse. Son cours assez raide (entre 1% et 1%0) est maîtrisé par plusieurs seuils dont la plupart sont à l'état d'abandon. Le lit présente donc des alternances de rapides et de mouilles propices à une certaine richesse écologique, bien que la forte déconnexion avec le milieu terrestre et l'érosion généralisée des berges par sape en pied et effondrement appauvrissent vraisemblablement le milieu aquatique. Le moulin de Sadoul est le dernier seuil sur la Lère avant que la rivière ne rejoigne l'Aveyron. Il est en activité, muni de plusieurs vannes de décharge. Globalement, on peut décrire la Lère comme une rivière à forte capacité érosive qui demeure toutefois enserrée dans une plaine inondable étroite et relativement rectiligne.

La confluence

La zone de confluence entre la Lère et l'Aveyron est une zone d'accès difficile. L'ensemble des informations disponibles montre et confirme ce qu'un constat visuel laborieux permet de deviner, à savoir que l'Aveyron contrôle le fonctionnement hydraulique de la confluence. Cependant, il apparaît nettement qu'en rive gauche, en vis-à-vis de débouché de la Lère, la plaine alluviale de l'Aveyron est surélevée par rapport à la plaine de la confluence. Des merlons artificiels ajoutés en bordure de rive gauche augmentent encore cette surélévation qui sera préjudiciable à l'évacuation des débits concomitants des deux cours d'eau.

7.4.3. Topologie des écoulements

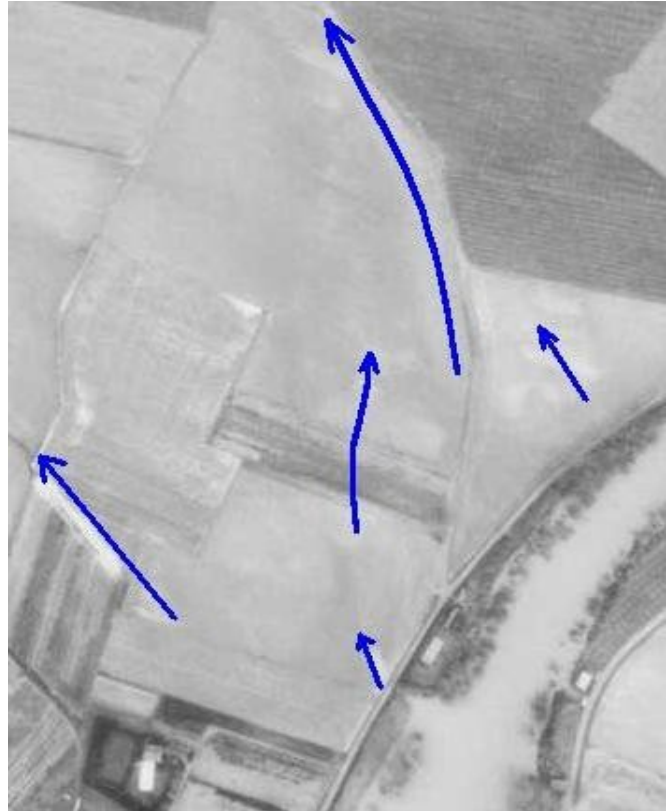
Le cours principal de l'Aveyron est homogène en aval de la confluence avec la Lère. Par contre, en amont immédiat de cette confluence, trois îles morcellent le cours et scindent l'écoulement en plusieurs bras encombrés de végétation et d'encombres flottants. De l'amont de ces trois îles à l'île du moulin d'Albias, l'Aveyron présente un tronçon homogène. Les photographies aériennes prises durant la crue de 1981 permettent de deviner des écoulements secondaires significatifs dans la plaine d'inondation de l'Aveyron. Cette méthode s'appuie sur les traces blanches laissées par l'érosion localisée due à des courants forts. Ces écoulements ne sont souvent pas assez concentrés pour marquer le terrain, et seule une analyse du contraste de la photographie permet alors de déceler une modification localisée du terrain naturel par les écoulements.

Par exemple :



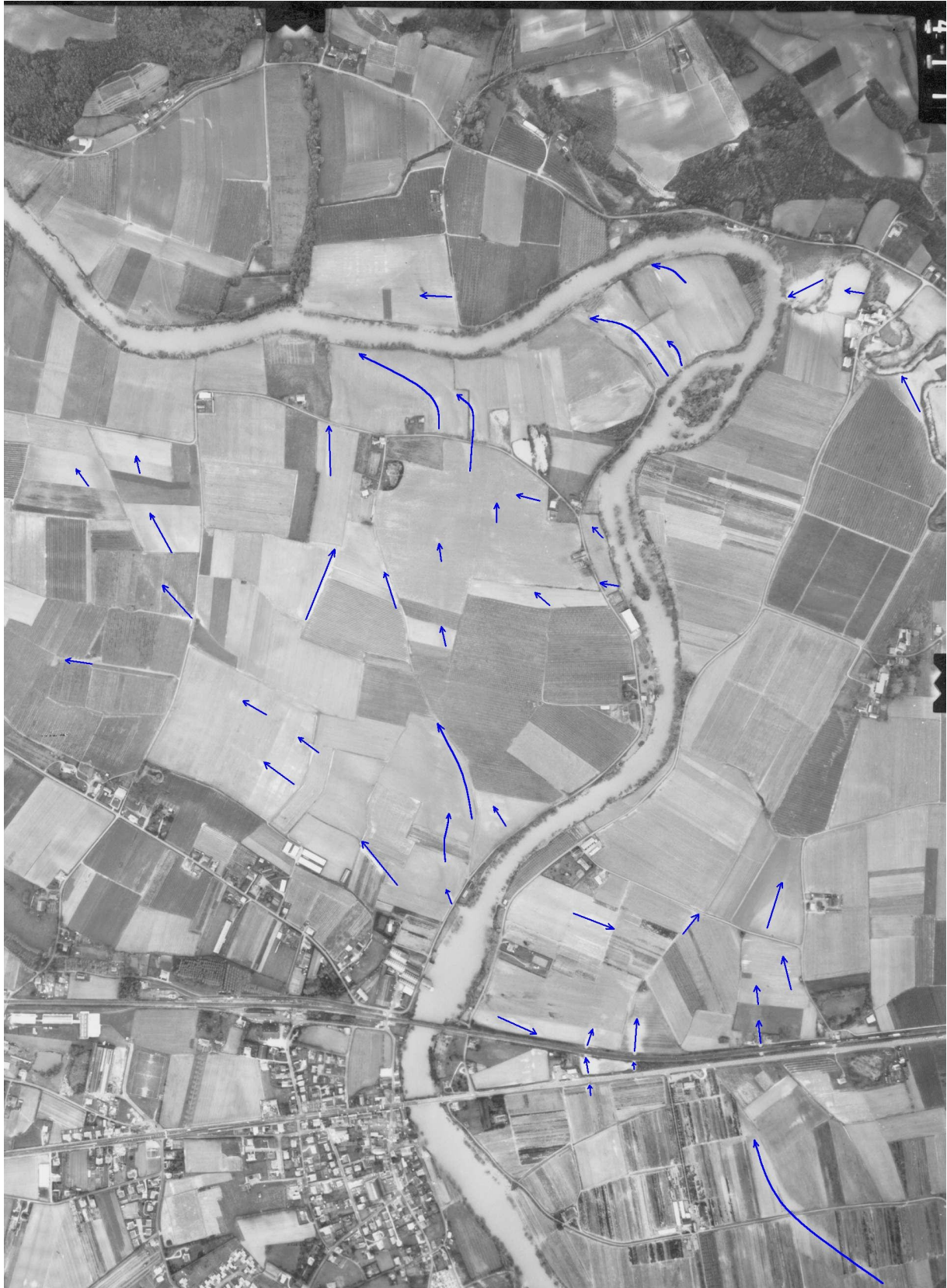
Ci-dessus : flux concentrés au droit des ouvrages de décharge de la RN 20 et du remblai RFF

Ci-contre : flux locaux de l'écoulement débordant en rive gauche



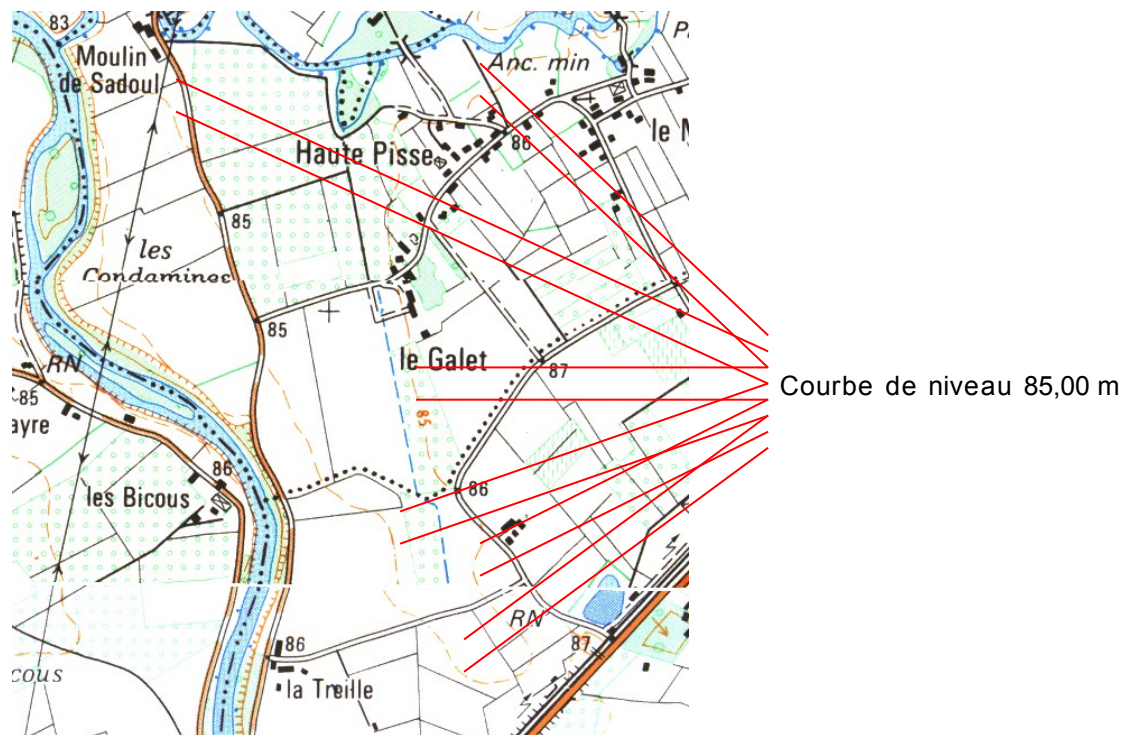
Un premier écoulement secondaire peut être deviné en coupure du méandre de la confluence. Il déborderait en rive gauche de l'Aveyron en amont de la terrasse légèrement surélevée de l'intrados du méandre, pour rejoindre l'Aveyron à quelques dizaines de mètres de là.

Un deuxième écoulement secondaire peut être deviné en coupure de ce même méandre, mais selon une corde plus longue. Il déborderait en rive gauche au niveau de l'île du moulin d'Albias, et rejoindrait le cours de l'Aveyron plusieurs centaines de mètres plus loin, en coupant à travers la plaine.

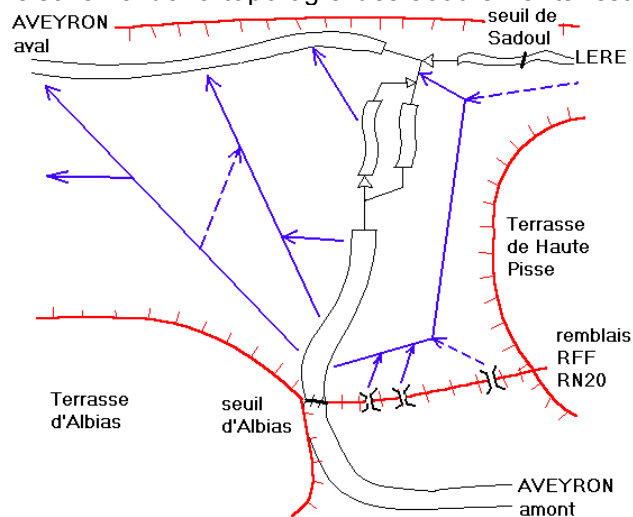


Un troisième écoulement secondaire peut être deviné à partir des courbes de niveau de la vallée de l'Aveyron en rive droite et des flux intenses qui ont laissé des traces sur les photographies aériennes. Les données topographiques disponibles confirment la présence d'une légère dépression discontinue dans ce secteur, susceptible de conduire un écoulement secondaire non-négligeable en parallèle à l'écoulement principal, jusqu'à la zone de la

confluence avec la Lère. L'alimentation de ce troisième écoulement secondaire peut provenir des débordements de l'Aveyron en rive droite à l'aval immédiat du moulin d'Albias et des flux traversant les ouvrages de décharge de la Route Nationale n°20 et le remblai ferroviaire.



Le schéma de la topologie des écoulements résultant de cette analyse est donc :



Il est manifeste qu'un tel schéma topologique est complexe et nécessitera des outils de calcul adaptés à cette complexité.

7.5. Crédits photographiques

David GOUTX

Jean-Claude JOUANNEAU

Pierre PACAUD

Benoît RACQUET

Annexe 3

Données hydrologiques

Table des matières

1. Introduction.....	2
1.1. Quels sont les objectifs initiaux ?.....	2
1.2. Quelles sont les données disponibles ?.....	2
1.3. Quelle cohérence entre les objectifs et les données disponibles ?.....	3
2. Les données.....	3
2.1. Le terrain, les enquêtes, la recherche de documents et d'archives.....	3
2.1.1. La nécessité de l'enquête historique (archives, témoignages, ...)	4
2.1.2 - Le rôle primordial de l'enquête de terrain	5
2.2 - La disponibilité des études et données existantes.....	5
2.2.1 - Réutilisation d'études antérieures.....	5
2.2.2 - Les données et les fournisseurs :.....	7
2.3 - Analyse critique et validité des données.....	9
2.3.1 - Deux exemples.....	9
2.3.2 - Validité des chroniques hydrométriques.....	10
2.3.4 - Les jaugeages	11
2.3.5 - Les courbes de tarage	11
2.3.6 - De la mesure de hauteur à la fourniture d'une valeur de débit.....	12
2.3.7 - Les données sur la station.....	12
2.4 - La réactualisation des données	13
2.4.1 - Les données de terrain : traces et repères de crue, témoignages, archives, parcellaire et réseau hydrographique.....	13
2.4.2 - Chroniques hydrométéorologiques.....	13
2.5 - L'exploitation des chroniques hydrométriques et leur nécessaire intégration dans des approches combinées (hydroclimatique, morphologique, hydraulique,).....	13
3 - Quel événement hydrologique utiliser ?.....	16
3.1 - Introduction.....	16
3.2 - La période de retour.....	16
3.2.1 - Événement réel et période de retour	16
3.2.2 - Concomitance.....	17
3.2.3 - Hydrogramme synthétique mono-fréquence.....	17
3.3 - Incertitudes, intervalles de confiance et sensibilité.....	18
3.4 - Conclusion.....	20
4 - Les méthodes de l'hydrologie opérationnelle.....	20

Table des figures

Figure 1 - Antzora Erreka, Sud-Ouest du samedi 27 août 1983.....	4
Figure 2 - débordement de l'Urabia à Bidart en bordure de la RN 10, 24 septembre 1959 (source: subdivision de l'équipement).....	4
Figure 3 - Station de Rispe sur le Cern	11
Figure 4 – courbes de tarage (le Suran à Pont d'Ain).....	12
Figure 5 – hydrogrammes de crue : même débit de pointe mais volumes différents.....	17

1. Introduction

Sous le vocable "données hydrologiques", on se réfère aux données limnimétriques, hydrométriques et pluviométriques, qu'elles soient issues de mesures locales ou d'analyses régionales.

L'étude hydrologique se situe en amont de la phase d'élaboration de l'étude hydraulique. Sa zone d'étude sera en général plus large que celle de l'étude hydraulique, souvent limitée à un tronçon de cours d'eau, alors que l'étude hydrologique pourra concerner jusqu'à l'ensemble du bassin.

Pour la réalisation de l'étude hydrologique, on pourra suivre le questionnement suivant :

1.1. Quels sont les objectifs initiaux ?

Le volet hydrologie est destiné à fournir les données d'entrée d'une étude hydraulique. Il n'a donc pas pour but la connaissance en tant que telle de l'hydrologie du bassin versant dans lequel prend place cette étude : d'où l'élimination a priori de certains aspects (exemple trivial : l'étude des étiages si le but est un aménagement de protection contre les crues; encore qu'il s'agisse d'une vision réductrice, le type d'aménagement ayant une influence sur le régime hydraulique et sédimentologique).

Les objectifs généraux de l'étude hydraulique doivent être au préalable clairement définis (projet local, aménagement de bassin, atlas de zone inondable, application du droit des sols, environnement,...). Ceux-ci déterminent en effet les moyens de calcul mis en œuvre.

D'où la formulation suivante : de quelles variables hydrologiques le modèle hydraulique a-t-il besoin et avec quelle précision : débit de pointe de période de retour donnée ou d'un événement particulier, jeu d'hydrogrammes observés ou synthétiques, apports en volume, durées caractéristiques, localisés en un point ou multiples (affluents et problèmes de concomitance, apports diffus par ruissellement) selon l'extension de la zone d'étude,...

Le cahier des charges devra donc clairement définir ce qui est attendu de l'étude hydrologique.

1.2. Quelles sont les données disponibles ?

On peut les regrouper en données hydrométriques, physiques (bassins versants) et climatologiques (essentiellement pluviométrie).

Il faut distinguer à ce niveau les données initiales (mesures et observations directes : hauteur, traces et repères de crue, limnigramme, géométrie et vitesse notamment en jaugeage, pluviométrie...) et les données agrégées ou calculées (débit, courbe de tarage, hydrogramme, traitements statistiques, débit fréquentiel, lame d'eau, courbe intensité-durée-fréquence, coefficient de Montana,,,...), que celles-ci soient issues de banques de données ou d'études particulières.

Il en est de même en ce qui concerne les caractéristiques physiques des bassins versants lorsque celles-ci seront utilisées dans une formule ou un modèle pluie-débit.

Par ailleurs il s'agit de savoir si l'on a affaire à des données locales ou régionales, à des données ponctuelles, à des séries continues, à des données reconstituées.

Enfin, la qualité de ces données doit pouvoir être appréciée, en particulier pour les variables résultant d'étapes successives, de la donnée brute de terrain à la forme finale élaborée.

De la disponibilité et de la qualité de ces données vont dépendre les méthodes utilisées pour calculer et fournir les paramètres d'entrée au modèle hydraulique.

En l'absence de données locales, on peut envisager, de façon exceptionnelle des campagnes de mesures (jaugeages, pose et lecture d'échelle, ...) sur un ou plusieurs cycles hydrologiques. L'expérience montre parfois que la durée sur laquelle se déroulent de nombreux projets (délais administratifs, validations) aurait souvent largement permis et

valorisé une phase précoce d'instrumentation que l'on regrette toujours par la suite. Enfin, une station de mesure peut permettre de suivre les impacts de l'aménagement.

Les résultats seront plus utilisables si on s'intéresse à des données d'étiage plutôt qu'à des données de crues, qui doivent être collectées sur plusieurs années pour être exploitées de façon pertinente. Néanmoins, il vaut mieux parfois quelques données que rien du tout.

Attention : on ne s'improvise pas gestionnaire de station de mesure du jour au lendemain ! Il est donc préférable de s'appuyer sur les compétences de gestionnaires de réseau.

1.3. *Quelle cohérence entre les objectifs et les données disponibles ?*







De la disponibilité des données ou de leur précision peut dépendre une réévaluation des objectifs du volet hydrologique lui-même et par voie de conséquence du projet hydraulique.

En effet il est inutile de chercher à établir un résultat très précis si on n'a pas les moyens (et notamment les données) de vérifier sa pertinence. Il est souhaitable que ces objectifs et résultats attendus soient rediscutés avec le chargé d'étude au cours de la phase de démarrage au vu des données effectivement disponibles. En particulier le degré de sophistication du volet hydraulique doit se justifier non seulement par rapport à l'objectif de l'étude mais aussi en fonction des données d'entrée hydrologiques disponibles.

2. Les données

Il y a les données aisément disponibles (banques) et celles qu'il faut aller chercher dans les archives et sur le terrain (relevés de crue, sédimentologie, géomorphologie, enquête historique, etc.....). Les premières sont déjà des données souvent agrégées et élaborées dans le cadre de l'hydrologie statistique, les secondes sont indispensables pour permettre la validation ou la réinterprétation des précédentes et asseoir la perception physique du fonctionnement hydrologique du bassin étudié.

Six rubriques seront abordées :

-  Le terrain y compris les archives
-  Les études
-  Les données et les fournisseurs
-  L'analyse critique et la validité
-  La mise à jour
-  L'exploitation des données hydrologiques

2.1. *Le terrain, les enquêtes, la recherche de documents et d'archives*

Cette étape qui vise à recueillir des informations hydrologiques, sera l'occasion de glaner des informations hydrauliques. Elle devra donc être coordonnée entre l'hydrologue et l'hydraulicien (souvent la même personne pour de petites études).

Cette étape est parfois considérée comme un simple préalable destiné à caler une modélisation des écoulements. Il s'agit en réalité du cœur de la démarche; c'est elle qui décide de la plus ou moins grande qualité de l'exploitation des données collectées et de l'éventuelle modélisation.




Cette approche du terrain est d'autant plus indispensable que les banques de données dont nous disposons (Banques Hydro, Pluvio, par exemple) ne prennent en compte la plupart du temps qu'un nombre limité de données, les plus récentes. Il en résulte que leur exploitation statistique conduit parfois à des propositions très éloignées de la réalité.

Il est clair qu'en dehors du cas (rare en réalité) où l'on ne dispose pas de repères de terrain ce volet doit précéder et orienter celui d'une modélisation.



2.1.1. La nécessité de l'enquête historique (archives, témoignages, ...)

Il s'agit ici de l'enquête historique au sens large, c'est-à-dire aussi bien par rapport aux évènements anciens dont les témoins directs ont disparu que des plus récents. Les sources sont connues et largement détaillées dans nombre de documents méthodologiques; encore faut-il les exploiter...

Trois domaines:

-  La documentation écrite.
-  Les témoignages oraux
-  Les documents photos et vidéos

Et deux étapes:

-  La collecte (fig.1).
-  L'exploitation, avec ici aussi l'analyse, la comparaison, la critique et la cohérence de documents et témoignages d'autant plus intéressants qu'ils sont diversifiés (fig.2).

Deux morts, cinq disparus

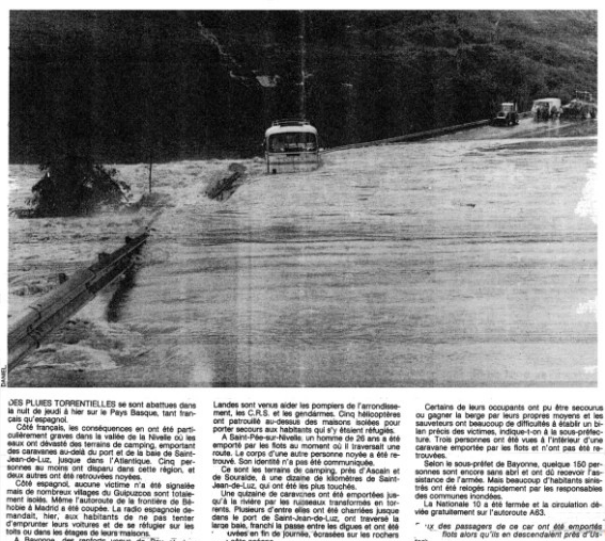


Figure 1 - Antzora Erreka, Sud-Ouest du samedi 27 août 1983



Figure 2 - débordement de l'Urabia à Bidart en bordure de la RN 10, 24 septembre 1959 (source: subdivision de l'équipement)

Avertissement sur l'utilisation de données sur les dommages : il n'y a pas de relation déterministe entre l'aléa (ici la pluie ou le débit) et les dégâts provoqués. Ceux-ci dépendent, pour une même valeur de l'aléa, de l'occupation du sol. Inversement des dégâts équivalents peuvent être provoqués par des aléas de valeurs très différentes.

2.1.2 - Le rôle primordial de l'enquête de terrain

L'importance et le temps accordé à cette étape, tant par le maître d'ouvrage que par le bureau d'études, peut influencer sur la pertinence et la qualité des résultats des modélisations. Au minimum, il faudrait que l'hydrologue aille voir les stations de mesure, les sites de jaugeage, ainsi que le cours d'eau de part et d'autre pour se faire une idée des conditions d'écoulement et de débordement. Une visite du bassin versant (surtout quand il est petit) peut s'avérer instructive sur la nature et l'occupation du sol, les ouvrages hydrauliques, ...

2.2 - La disponibilité des études et données existantes

2.2.1 - Réutilisation d'études antérieures

La prise en compte et l'analyse des études préexistantes, dont le recensement doit se faire dans le cadre de la bibliographie, fait partie intégrante de l'étude. Les éléments qui suivent ne sont pas propres au volet hydrologie mais s'y appliquent.

L'état des lieux commence par celui de la recherche de la documentation accessible et des études antérieures. Les maîtres d'ouvrages n'ont, la plupart du temps, pas fait ce travail qui pourtant devrait être un préalable au lancement même de l'étude, ne serait-ce que pour établir un cahier des charges cohérent et réaliste. S'il n'en ont pas les moyens humains en interne, on ne peut donc que leur recommander de recourir à une ATMO (Assistance Technique à Maîtrise d'Ouvrage) pour réaliser cette prestation ainsi que la partie technique du cahier des charges.

Cette étape s'identifie en partie à une recherche bibliographique, mais pas seulement, car elle enclenche déjà un processus d'enquête de terrain. Celui-ci sera indispensable pour le contrôle et l'exploitation des documents existants d'abord, puis l'acquisition des données nouvelles nécessaires à l'étude.

La deuxième étape concerne l'exploitation de cette documentation afin de cerner la limite entre la réutilisation d'éléments ou de résultats préexistants et la reprise pure et simple de l'étude à zéro.

Dans tous les cas on n'échappe pas à un examen un peu détaillé de l'existant. En effet :

- * *La reprise en compte d'éléments antérieurs suppose leur contrôle et leur validation. Or contrairement à l'aspect parfois trompeur ou à la réputation de certaines études, une analyse détaillée et un contrôle de terrain conduisent parfois à remettre en cause des résultats, ce qu'une lecture trop superficielle n'aurait pas permis.*

- * *on rencontre fréquemment des études successives sur un même sujet réalisées par différents maîtres d'ouvrages, souvent de façon anarchique et sans cohérence, ou à l'inverse, en se recopiant sans aucun esprit critique, ce qui a parfois pour effet de donner une crédibilité à des valeurs, dont on ne sait même plus sur quoi elles reposent.*

Autant il importe de ne pas inutilement refaire ce qui a été fait correctement, mais, si cela est justifié, la reprise totale d'une étude peut s'avérer nécessaire.

Dans la pratique on se heurte à trois écueils:

- * *La difficulté à se procurer les documents nécessaires, et en particulier les pièces "annexes" des rapports, telles que les levés topographiques.*

- * *Le contenu même des rapports avec l'absence des éléments permettant de vérifier et d'en recouper les résultats.*

- * *On ne dispose pas nécessairement des mêmes outils de calcul (logiciels).*

Compte tenu du surcroît de temps passé à cette première phase, ceci débouche fréquemment sur la reprise complète de l'étude.

Il en résulte pour le chargé d'études qu'il devra lui-même veiller à ce que son propre travail ne connaisse pas la même destinée que celle de ses prédécesseurs.

Cela doit se traduire à deux niveaux:

- * *Le contenu du rapport, qui est du ressort direct du chargé d'études.*

C'est non seulement le rapport stricto sensu mais également ses pièces annexes: levés topo, références des chroniques, mesures et notes de terrain, et plus généralement tous éléments et documents permettant à quelqu'un d'extérieur de reprendre l'étude, d'en reproduire les résultats et de la poursuivre (Ce n'est d'ailleurs rien d'autre que le schéma classique de toute démarche et travail scientifique). On veillera à une mise à disposition aussi bien sur support papier qu'informatique.

- * *La pérennité de la disponibilité et de l'intégrité de ces documents.*

Si c'est le commanditaire de l'étude qui en est de fait responsable, le chargé d'études peut toutefois en faciliter largement la maîtrise en s'assurant par exemple de l'archivage complet et systématique dans la structure d'études (DDE, CETE,..), d'autant que l'expérience montre que ce sont les services de l'Etat qui sont dans la pratique les archivistes et la mémoire des études faites pour les collectivités.

Plus généralement se pose le problème de la conservation et de la valorisation de toute la littérature grise. Prévoir sa mise en forme en prévision d'une exploitation sur le réseau serait judicieux.

Ces quelques considérations pratiques concernent en priorité la disponibilité des documents antérieurs.

Il importe maintenant de revenir sur leur analyse. La démarche à suivre est la même que pour réaliser une étude, à ceci près qu'il suffit dans un premier temps de vérifier la cohérence interne des résultats et conclusions, et les ordres de grandeur. Si l'un de ces éléments laisse planer un doute il faudra décortiquer plus avant le document, ce qui implique soit de disposer des données initiales, soit de les restituer.


Il faut d'abord s'assurer de l'objectif de l'étude, analyser la démarche suivie ainsi que les hypothèses retenues, dégager les résultats et apprécier la pertinence des conclusions qui en découlent. Il faut en particulier faire la différence entre ce qui relève de l'acquisition simple de

données (levé topographique, données météorologiques et hydrographiques, documents photographiques, bibliographiques, coupures de presse, etc.) et ce qui est propre à l'étude (calculs, analyse et interprétation).

2.2.2 - Les données et les fournisseurs :

Il s'agit ici plus particulièrement des données fournies par les systèmes d'acquisition (photo aériennes, imagerie spatiale) et les réseaux de mesures (météorologie, hydrométrie).

Il ressort de certains écrits que le terrain n'intervient que pour valider des documents aériens. Si l'importance de ces derniers s'est imposée depuis longtemps comme moyen privilégié de couvrir et d'analyser un territoire il n'en demeure pas moins qu'ils doivent être étalonnés. Par ailleurs leur disponibilité n'est pas toujours assurée et le coût d'acquisition est souvent élevé. Télédétection et couverture aérienne ne peuvent donc pas dispenser de l'enquête terrain de même que cette dernière est nécessaire pour se rendre compte de ce que l'on peut faire avec des chroniques hydrologiques.

 *Données cartographiques, cadastre, levés topographiques, photographies aériennes et imagerie spatiale*

L'échelle du 1/25 000 est en général bien adaptée à l'approche hydrologique générale. A l'interface avec le volet hydraulique, du 1/25 000 au 1/10 000 on se situe au niveau atlas de zones inondables.

Sur des projets d'aménagement, les variables hydrologiques sont abordées à l'échelle du bassin versant mais leur prise en compte dans le projet se traduit en termes hydraulique et géométrique de façon beaucoup plus fine et nécessite de passer à l'échelle du levé géomètre et du plan d'exécution des ouvrages.

Tout ce qui concerne l'occupation du sol est avantageusement traité par photographie aérienne en comparant les missions à quelques dizaines d'années d'intervalle et en les référant par exemple au RGA (Recensement Général Agricole). Les modifications du réseau hydrographique (recalibrage, remembrement, drainage, barrages et retenues) seront mieux cernées en ayant recours à la fois aux couvertures aériennes et au cadastre.

Chaque projet doit donc faire l'objet d'une analyse propre afin de préciser dans le cahier des charges le type et l'échelle des documents nécessaires au volet hydrologique.

Les fournisseurs et prestataires de services sont l'IGN, des sociétés comme SPOT-IMAGE, SPHAIR, les services du cadastre et les géomètres.

L'utilisation de l'imagerie spatiale reste réservée à des cas très particuliers.

 *Recueil des données météorologiques*

Il s'agit principalement des données pluviométriques qui sont utilisées dans les transformations pluie - débit.

La donnée la plus répandue est la pluie journalière, mais l'étude détaillée de la transformation pluie -débit impose d'avoir les enregistrements à un pas de temps beaucoup plus faible pouvant descendre jusqu'à quelques minutes en hydrologie urbaine. Le choix du pas de temps à utiliser est fonction du temps de concentration et donc de la taille du bassin versant étudié. Pour les stations équipées en pluviographes, Météo-France peut fournir les pluies au pas de 6 minutes. Diverses procédures permettent de fournir des données agrégées ou dérivées déjà traitées statistiquement (coefficients de Montana, courbes I-D-F).

Pour mémoire, on rappelle que les images radar et leurs traitements associés permettent d'obtenir une pluie spatialisée utilisée en entrée de modèles de prévision. Actuellement Météo-France réalise ces images radars au pas temporel de 5 minutes et spatial de 1km².

Les principaux fournisseurs de données pluviométriques sont Météo France, les services d'Hydrométrie (DIREN, DDE, SN, Météo), EDF et les sociétés d'aménagement (CACG, CNR, BRL, VNF ...). D'autres structures possèdent aussi quelques stations comme certains organismes de recherche (INRA, ONF, Universités, CNRS, CEMAGREF...), les Chambres d'Agriculture, les services techniques des collectivités locales, les aéroports. Des particuliers enfin, comme les agriculteurs, effectuent parfois des relevés réguliers.

*Données hydrométriques

A la base il s'agit très souvent de chroniques de hauteurs d'eau. Celles-ci sont traduites en chroniques de débit par l'intermédiaire des courbes de tarage. Divers traitements, notamment statistiques, peuvent être associés. Les relevés de jaugeage comportent souvent des informations utiles sur les plan hydraulique et sédimentologique, mais quasiment jamais exploitées (comme la vitesse ou l'évolution du lit dans la section de mesure).

En France la majeure partie des données hydrométriques récentes est accessible par la banque HYDRO - sous responsabilité du MEDD - qui rassemble les principaux gestionnaires de stations hydrométriques. Il faut cependant signaler qu'une partie seulement des données existantes est accessible par la banque HYDRO, soit qu'elles n'aient jamais été intégrées (cas de nombreuses données anciennes, notamment des SPC) soit qu'elles nécessitent une demande directe au niveau du gestionnaire (en effet, sur les stations "ne dépendant pas du MEDD", seuls les débits journaliers sont fournis).

En dehors de l'accès automatisé à la banque HYDRO, les organismes suivants sont susceptibles de fournir des données : DIREN, Agences de l'eau, DDE(SPC), DDAF, EDF, Sociétés d'aménagement, Organismes de recherche (Universités, CNRS, CEMAGREF, VNF, ...), services techniques des collectivités locales.

Données hydro-pédologiques

Sous cette appellation il faut comprendre les éléments permettant de caractériser l'état hydrique du sol. Ceux-ci interviennent explicitement dans certains types de relation pluie-débit. Ceci inclut donc des caractéristiques pédologiques et hydrodynamiques (nature du sol, perméabilité, piézométrie,...). Mais dans la pratique le degré de saturation des sols est souvent estimé à partir des variables pluie et évapotranspiration.

Des organismes comme le BRGM ou l'INRA, sont susceptibles de fournir des données localisées. Les chambres d'agriculture avec leurs conseillers agricoles disposent en général de beaucoup d'informations.

Dans certains cas exceptionnels, il peut être utile de connaître les appareillages et systèmes employés ainsi que les méthodes de calcul et de traitement utilisés avec leur mode de calage et leur sensibilité.

La plupart de ces données sont payantes et leur acquisition peut représenter - comme pour les levés topographiques - une part non négligeable dans le coût d'une étude.

2.3 - Analyse critique et validité des données

Les précautions à prendre dans l'utilisation et l'exploitation des données climatologiques ou hydrométriques sont théoriquement connues. Mais l'intégration de plus en plus fréquente des procédures de calcul aux bases de données, comme HYDRO avec la procédure CRUCAL, conduit de façon insidieuse à abandonner toute réflexion et esprit critique, du fait de la rigueur attribuée aux procédures de traitement automatisées et de la confiance attribuée a priori aux organismes qui commercialisent ces données.

Soyons clairs: il n'est pas question ici de nier les avantages de l'automatisation de l'acquisition et du traitement des mesures, mais il y a au moins deux bonnes raisons pour être vigilant:

- L'automatisation éloigne l'utilisateur de la réalité physique du phénomène qu'il est sensé appréhender et constitue un écran supplémentaire dans la validation des données.
- Elle conduit celui-ci à se dispenser d'une réflexion qu'il aurait autrefois été obligé de mener lui-même sur la base de données brutes.

Les quelques exemples suivants illustrent l'attention que doit porter l'utilisateur d'une part à ce qu'il fait (erreur de paramétrage, assimilation incomplète du fonctionnement de la banque de données) d'autre part aux limitations ou parfois aux ambiguïtés de la banque elle-même.

2.3.1 - Deux exemples

Sur les DEBITS:

Sur les procédures CRUCAL de la banque HYDRO, l'affichage "Maximum connu" ne concerne souvent que le maximum **enregistré** et non la plus grande crue historique qui souvent se trouve en dehors de la période figurant dans la base.

Mais plus paradoxalement, à l'intérieur même de l'échantillon, ce "maximum connu" peut être inférieur à une valeur de débit si celle-ci a été reconstituée (estimée). Il importe donc de bien examiner l'ensemble des valeurs de l'échantillon lui-même.

Par exemple, sur la Station de Rieulhès (Hautes-Pyrénées) sur le Gave de Pau le "maximum connu" indiqué sur une procédure CRUCAL est de 324 m³/s pour le 5 Oct. 1992, alors que dans l'échantillon des valeurs maximales annuelles retenues et validées "bonnes" on trouve le 28 Nov 1974 (354 m³/s), le 1er Juin 1979 (497 m³/s), le 8 Nov 1982 (402 m³/s), le 9 nov 1984 (338 m³/s).


Enfin, au nombre des crues historiques (nécessairement absentes de la station puisque antérieures à sa création), on peut mentionner celle du 11 juin 1885 et surtout du 27 Octobre 1937 qui a approché les 1000 m³/s à Lourdes. Il est bien évident que la prise en compte de cette dernière modifie sensiblement l'ajustement fréquentiel.




Sur les PLUIES:

Les ajustements de pluies fournis par Météo-France, sont établis en utilisant la méthode dite du "renouvellement" : Ce mode de traitement fait que "le plus souvent les observations les plus fortes sont au-dessus de la droite [d'ajustement] pour les durées de retour élevées". Une comparaison, avec l'utilisation classique de la loi de Gumbel sur un échantillon de max. annuels, a montré que pour la durée 24h et la période de retour 10 ans, les écarts, sur 110 postes pluviométriques, étaient compris entre -35 % et +15%. Pour la pluviométrie de période de retour 100 ans en 24h, les écarts sont encore plus forts et on trouve par exemple, dans le cas de la station de Biarritz-Anglet : 135 mm pour la méthode du renouvellement et 186 mm pour un ajustement de Gumbel.

Il importe donc, surtout si l'on utilise les procédures de calcul mises à disposition par les banques de données, de vérifier un minimum de points, d'autant qu'il subsiste parfois des erreurs et que les méthodes de traitement influencent les résultats.

On cherchera par conséquent à utiliser judicieusement ces données en examinant:

 Durée et époque de la chronique de mesures.

-  Qualité de la donnée (mesure, calcul ou restitution).
-  Homogénéité.
-  Méthode d'ajustement utilisée (débit-fréquence).

2.3.2 - Validité des chroniques hydrométriques

Lorsque l'enjeu de l'étude le justifie, une étude préalable dont l'objectif est précisément d'établir et de fournir des données validées est souhaitable.

La validité d'une station et des données doit donc être vérifiée, à travers l'analyse de certains indices "objectifs" (cf. encadré ci-après), mais également à travers le témoignage du gestionnaire de la station dont le recueil doit être systématique. Cette vérification doit toujours être faite même pour les données issues d'une banque de données.

Dans le cas de données reprises d'une étude antérieure, le chargé d'étude doit s'assurer que la critique des données a bien été réalisée, ce qui implique que :

- * Les résultats de cette critique soient disponibles (recommandation générale de traçabilité).

- * Qu'il prenne en compte la durée écoulée depuis l'étude antérieure et justifie la façon dont il le fait (reprise sans changement, incorporation de nouvelles données, etc.)

Les indices d'une invalidation (totale ou partielle des données) d'une station peuvent être recherchés dans :

- * *des erreurs liées au matériel utilisé ou à son changement*
- * *les données de jaugeage (détarage éventuel de la station), y compris les courbes de tarage périmées conservées par le gestionnaire (même si cela ne paraît pas évident, il faut encourager le gestionnaire à conserver ces données qui brossent un historique local de la morphodynamique du cours d'eau),*
- * *l'évolution du bassin versant (urbanisation, bouleversements de l'occupation ou de l'usage des sols, aménagements lourds, ...),*
- * *l'évolution du réseau hydrographique,*
- * *la non stabilité de la relation pluies-débits,*
- * *l'hétérogénéité de l'échantillon*
- * *une hétérogénéité au niveau régional*

Les principes d'échantillonnage devront être vérifiés. Dans le cas d'une analyse saisonnière pour un débit de projet, il convient préalablement de procéder à une identification des segments hydrologiques de variations saisonnières homogènes sans trop compartimenter l'échantillon, et d'encadrer la saison "cible" par un (voire deux) mois avant et après, afin d'assurer une certaine homogénéité climatique de la "sous-saison" considérée.

Remarque : Il faut bien cerner la relation entre détarage et non-stationnarité des données.

- * *Le détarage d'une station peut correspondre à :*
 - *une modification localisée du lit*
 - *une modification régionale du réseau hydrographique*
- * *La non-stationnarité des données peut être liée à :*
 - *une modification de l'occupation du sol (sans forcément de modification de la courbe de tarage)*
 - *une modification du réseau hydrographique*
 - > *au voisinage de la station , ce qui entraîne un détarage local*
 - > *générale, qui peut éventuellement entraîner un détarage local*
 - *une modification liée au changement climatique*

Autrement dit un détarage ne traduit pas forcément un changement de régime hydrologique et si la station est bien suivie la chronique de débit peut être tout à fait correcte. A l'inverse une station stable n'est pas synonyme de stationnarité des données puisque le fonctionnement

hydrologique du bassin versant peut évoluer sans que la qualité et la fiabilité de la station hydrométrique soient mises en cause.

Ceci signifie que ces questions doivent être systématiquement posées, ce qui ne signifie pas que l'on ait (toujours) les moyens de les résoudre...

2.3.4 - Les jaugeages

Si nécessaire, les fiches de jaugeages peuvent être consultées auprès du gestionnaire de la station. Elles peuvent s'avérer fort intéressantes non seulement pour apprécier la fiabilité de la courbe de tarage mais aussi pour sa validation et comme aide à l'extrapolation aux forts débits. On peut en principe en tirer les informations concernant le champ de vitesse, la géométrie de la section, le moment du jaugeage (montée, étale, ou descente de crue).

De la comparaison des profils on aura une certaine idée de l'évolution locale du lit.

Du mode de calcul (intégration, coefficients de berge, pondération,...) on pourra apprécier un biais éventuel sur le calcul d'un débit ou d'un ensemble de débits.

2.3.5 - Les courbes de tarage

La relation hauteur-débit qui permet le passage des limnigrammes aux hydrogrammes est susceptible de varier dans le temps et la courbe de tarage doit être régulièrement contrôlée (fig.3). Des courbes de tarage successives sont ainsi établies et applicables à des périodes différentes. On vérifiera que la bonne courbe soit utilisée et qu'il n'y ait déjà pas d'erreur à ce niveau [9].



Figure 3 - Station de Rispe sur le Cern

Le déplacement et le dépôt de matériaux en crue (en particulier sous l'arche rive gauche) rend la station instable et le suivi régulier de la courbe de tarage nécessaire. En outre des travaux de recalibrage ont largement modifié le lit sur plusieurs km en 1978

On appréciera la sensibilité de la courbe de tarage et sa fiabilité, d'une part à l'étiage, d'autre part en crue. Ce dernier point pose la question fondamentale de l'extrapolation aux forts débits pour lesquels on ne dispose la plupart du temps pas de jaugeages.

Or les ajustements statistiques sont très sensibles aux valeurs extrêmes. Comme on le verra plus loin, l'intervalle de confiance ne rend compte que de l'incertitude lié à l'échantillon pour une loi d'ajustement donnée, mais pas du mode d'extrapolation, et a fortiori pas des incertitudes ou erreurs liées au mode de dépouillement du jaugeage ou à l'emploi du matériel. C'est dire s'il faut être vigilant et essayer de cerner et réduire, autant que faire se peut, l'incertitude à chaque étape qui mène de la mesure à l'estimation des valeurs de débit de fréquence faible.

Il y a diverses méthodes de validation et d'extrapolation d'une courbe de tarage : il faut toutes les utiliser et confronter leurs résultats pour proposer non pas une extrapolation "juste" mais "plausible", si possible avec une fourchette qui elle-même sera soumise aux mêmes interrogations irréductibles. La Figure 4 montre comment l'extrapolation de la courbe a été modifiée au cours du temps (sans que la section n'ait évolué pendant cette période)

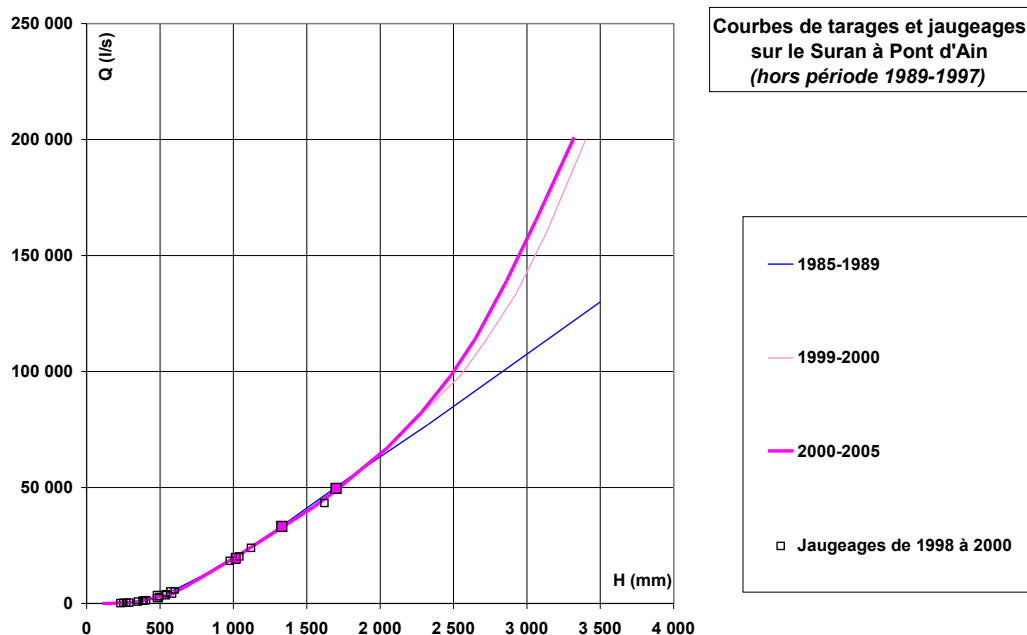


Figure 4 – courbes de tarage (le Suran à Pont d'Ain)

Ces approches font appel à la fois à des considérations hydrologiques par comparaison avec des stations voisines permettant un encadrement des résultats extrapolés, à des raisonnements et calculs hydrauliques, à une réflexion sur la vraisemblance physique d'un phénomène extrême, ... (En complément, se référer à l'annexe 2 - Données hydrauliques)

Il ne faut pas oublier que dans le couple débit - cote NGF qui sera fourni en entrée au modèle hydraulique, ce sera le débit qui la plupart du temps portera la plus grande incertitude. La cote observée à l'échelle, complétée par l'ensemble des autres repères de crue est plus facilement contrôlable : c'est la donnée brute, géométrique; le débit par contre, résulte d'un processus de calcul qui, introduisant une ou plusieurs étapes complémentaires, génère de ce fait d'autres incertitudes.

2.3.6 - De la mesure de hauteur à la fourniture d'une valeur de débit





Le lecteur est invité à se référer au guide Cemagref (Recommandations pour le calcul des aléas hydrologiques dans le cadre des PPRI – MEDD-DPPR), qui récapitule les différentes sources d'erreur dans la chaîne qui permet de passer de la hauteur au débit.

2.3.7 - Les données sur la station

Il faut insister auprès du gestionnaire pour qu'il suive l'évolution de sa rivière et consigne systématiquement tous les événements pouvant modifier la dynamique du cours d'eau et donc fausser l'exploitation des chroniques.

Mais il faut évoquer un autre aspect lié au contrôle du système de mesure lui-même, c'est celui de l'échelle et de son zéro dont les modifications sont fréquemment mal renseignées.

Pour mémoire, plusieurs situations peuvent se rencontrer :

-  L'échelle est emportée (ou changée) et mal replacée : son zéro change d'altitude,
-  Le zéro de l'échelle est nivelé sans indication du repère NGF et de sa cote (date et référence IGN),
-  Le nivellement est erroné,
-  Un changement de zéro est mentionné avec une nouvelle cote NGF sans qu'il soit indiqué s'il s'agit d'un déplacement physique de l'échelle, d'un nouveau nivellement "plus précis" que le précédent, ou d'un recalage par l'IGN de ses propres repères.

La pratique montre que ces sources d'erreur ne sont pas marginales et que leur vérification fait partie intégrante de la validation des chroniques avant traitement.

2.4 - La réactualisation des données

C'est l'analyse critique des documents préexistants qui doit orienter la réactualisation éventuelle des données, que celles-ci concernent les observations de terrain ou les chroniques de mesures.

2.4.1 - Les données de terrain : traces et repères de crue, témoignages, archives, parcellaire et réseau hydrographique

L'expérience montre que faute de temps ou en raison de contraintes financières ce type de données est généralement sous-exploité. C'est donc déjà en soi une raison pour essayer de les compléter.

Sans refaire les enquête de terrain et sous réserve de s'assurer qu'elles aient été correctement réalisées, il est toutefois indispensable de vérifier si des aménagements ont modifié le comportement hydrologique du secteur d'étude (drainage agricole, modification des pratiques et productions, retenues, urbanisation)

2.4.2 - Chroniques hydrométéorologiques

La courte durée de la plupart des chroniques conduit fréquemment à les compléter et surtout à y intégrer les derniers évènements majeurs (que ce soit en terme de crue comme d'étiage sévère par exemple).

Les indices minimum d'une péremption de données nécessitant une mise à jour de données synthétiques existantes sont :

** des contradictions flagrantes dans les ordres de grandeur de quantiles estimés par deux sources différentes,*

** un taux (p/n) de nouvelles données (p) rapportées aux données (n) ayant servi à établir la synthèse préexistante supérieur à 30%.*

2.5 - L'exploitation des chroniques hydrométriques et leur nécessaire intégration dans des approches combinées (hydroclimatique, morphologique, hydraulique,)

Avant toute utilisation pour l'analyse fréquentielle des crues il importe de s'assurer de 2 choses:

1 - La stabilité de la station hydrométrique (détarage)

2 - L'évolution du bassin versant (stationnarité des chroniques)

La première condition est en principe plus facile à apprécier et le suivi hydrométrique régulier de la station permet de recalibrer les valeurs de débits et de s'affranchir d'une dérive de la courbe de tarage.

Par contre la seconde est beaucoup plus exceptionnelle et délicate à prendre en compte, mais tout aussi importante, faute de quoi l'ajustement d'une loi de distribution aux débits de crue n'a aucun sens, et les conclusions tirées de la valeur identique de 2 crues à 30 ans d'intervalle, complètement différentes.

Il importe de ne pas oublier que l'exploitation des données hydrométriques est à replacer dans un cadre plus général :

La détermination des débits à des périodes de retour données, résulte d'une double approche : hydrologique et hydraulique.

Dans le détail, la démarche est fonction des données disponibles et de leur qualité:

- * Dispose-t-on de données hydrométriques sur le réseau hydrographique?*
- * Dispose-t-on de données pluviométriques sur le bassin?*
- * De quels niveaux de crue référencés ou référençables dispose-t-on sur le terrain, (dans le temps: fréquence expérimentale) et dans l'espace (lignes d'eau)?*

1 - Si l'on dispose de données hydrométriques (banque Hydro) à proximité de la zone d'étude:

- * Analyse critique et exploitation directe des débits maxima instantanés.*
- Durée de la chronique de mesure.*
- Homogénéité.*
- Qualité de la donnée (mesure, calcul ou restitution).*
- Comblement de lacunes et reconstitution*
- Méthode d'ajustement utilisée (débit-fréquence).*
 - * Comparaison des débits spécifiques avec ceux de stations proches (sur le même bassin ou sur des bassins voisins): analyse de cohérence (topographie, occupation du sol, hydrographie, substrat, lois de variation débits spécifiques / surface, etc...).*
 - * Redressement éventuel des valeurs de débits à partir du gradex des précipitations.*
 - * Recherche des événements historiques et réexamen des ajustements précédents.*

2 - Dans tous les cas, utilisation des données pluviométriques des stations météo les plus proches:

2.1 - Analyse de la pluviométrie.

- * Analyse critique et exploitation des tableaux intensité-durée-fréquence fournis par Météo-France:*
- Durée de la chronique de mesure.*
- Méthode d'ajustement utilisée (renouvellement / Gumbel).*
- Corrections de Weiss.*
- Formulations de Montana*
 - * Comparaison avec les stations voisines (zones d'influence, gradients pluviométriques).*
 - * Passage des pluies locales aux lames d'eau moyennes sur le bassin.*

2.2 - Utilisation des données pluviométriques pour l'estimation des débits de crue.

- * Méthodes ponctuelles: SOGREAH, CRUPEDIX, Rationnelle, SCS.*
- * Dans certains cas, construction de pluies de projets (hyétogrammes) pour simulation d'hydrogrammes de ruissellement (TERESA, PYPYRUS).*

3 - Comparaison des valeurs de débits fournies par les stations hydrométriques avec celles déduites de calculs hydrologiques.

4 - Approche hydraulique: estimation des débits de pointe à partir des niveaux d'inondation constatés avec prise en compte des enregistrements hydrométriques lorsque ceux-ci existent. Classement et fréquence expérimentale des crues majeures à partir des seuls éléments d'enquête terrain. Cette étape est fondamentale: c'est elle qui permet d'intégrer les événements majeurs dont la trace n'existe pas en tant que données structurées dans une chronique.

5 - Confrontation des valeurs de débit et fréquence issues des étapes 1 et 2 avec celles issues de l'étape 4.

6 - Choix final des débits à des périodes de retour donnée:

Les valeurs retenues pour les débits à des périodes de retour données (par exemple 10 et 100 ans) résulteront en dernier lieu de la confrontation des approches précédentes et des ajustements destinés à leur assurer le maximum de vraisemblance.

Même si l'approche complète dite hydrogéomorphologique n'est pas possible, on dispose toujours de quelques observations morphologiques, même éparées, qui permettent de réajuster ou de nuancer les résultats.

** L'analyse fréquentielle des pluies ne doit pas être confondue avec celle des débits. La première est indépendante de la structure du bassin: la pluie tombe sans se préoccuper de son destin ultérieur. Les débits dépendent par contre non seulement des pluies mais aussi du bassin et de son état susceptible de varier (saisonnalité, tendance à long terme ou perturbation marquée).*

Il ne faut enfin pas oublier que dans une étude hydro-hydraulique il s'agit bien souvent en fait d'allers et retours entre les approches hydrologique et hydraulique de façon à obtenir des valeurs plausibles et cohérentes entre elles (coefficient de Strickler, hauteur d'eau, débit, fréquence expérimentale). En outre que l'on se retranche derrière l'application triviale et arbitraire d'une règle mathématique ou que l'on fasse une pondération plus ou moins subjective entre diverses valeurs que l'on arrondit ensuite (éventuellement "dans le sens de la sécurité") ne change pas fondamentalement le fait qu'il subsiste une incertitude souvent importante. En tout état de cause la démarche suivie doit servir au moins à éviter les erreurs grossières et à légitimer en quelque sorte l'incertitude sur les résultats.

3 – Quel événement hydrologique utiliser ?

3.1 - Introduction

Pour un PPR inondation, on parlera d'aléa de "référence", défini comme la "plus forte crue connue et dans le cas où celle-ci serait plus faible qu'une crue de fréquence centennale, on garde cette dernière.

Pour un dimensionnement d'ouvrage (route par exemple), on parlera de "crue de projet" (souvent prise égale à la crue centennale) et on ajoutera la notion de "crue de sécurité" pour laquelle l'ouvrage doit résister, même s'il est en charge, de façon à ne pas ajouter un risque technologique à un risque naturel.

3.2 - La période de retour

3.2.1 - Événement réel et période de retour

On n'est pas obligé de qualifier statistiquement les événements ou les types d'interférence (concomitance de crues sur des bassins voisins par exemple). Par ailleurs cette qualification peut être difficile voire impossible surtout si l'on s'intéresse à plusieurs variables simultanément. Mais la notion de risque donc de période de retour reste toutefois sous-jacente à tout projet d'aménagement. On a donc le choix soit de retenir un événement particulier comme référence soit de tenter de quantifier l'aléa au travers d'une approche fréquentielle.

La notion de période de retour concerne la valeur d'une variable (ou éventuellement d'une combinaison de variables) dans une distribution statistique donnée (débit instantané, débit moyen ou volume écoulé sur une durée choisie, durée de débordement, durée pendant laquelle le débit est supérieur à un seuil ou à une fraction du débit de pointe, hauteur d'eau, etc...).

Une crue réelle fût-elle "historique" est un événement unique et complexe dans sa forme et son déroulement. On peut chercher à la caractériser de multiples façons par les variables précédentes, lesquelles n'auront pas le même période de retour pour cet événement. Une crue n'a donc pas de période de retour en tant que telle.

Dans la pratique lorsque l'on parle - par abus de langage ou simplification - de période de retour d'une crue, il importe donc de bien préciser la variable qu'on considère. Le plus souvent il s'agit du débit maximum instantané (cf. Figure 5 sur laquelle il apparaît clairement que pour un même débit de pointe les volumes écoulés peuvent être très différents. Par conséquent la période de retour d'un débit de pointe n'a aucune chance d'être le même que celui d'un volume moyen de crue écoulé.). Ceci ne signifie pas pour autant qu'il ne faille pas inciter le projecteur à s'intéresser aux autres variables (durée, vitesse de montée, volume écoulé, ...).

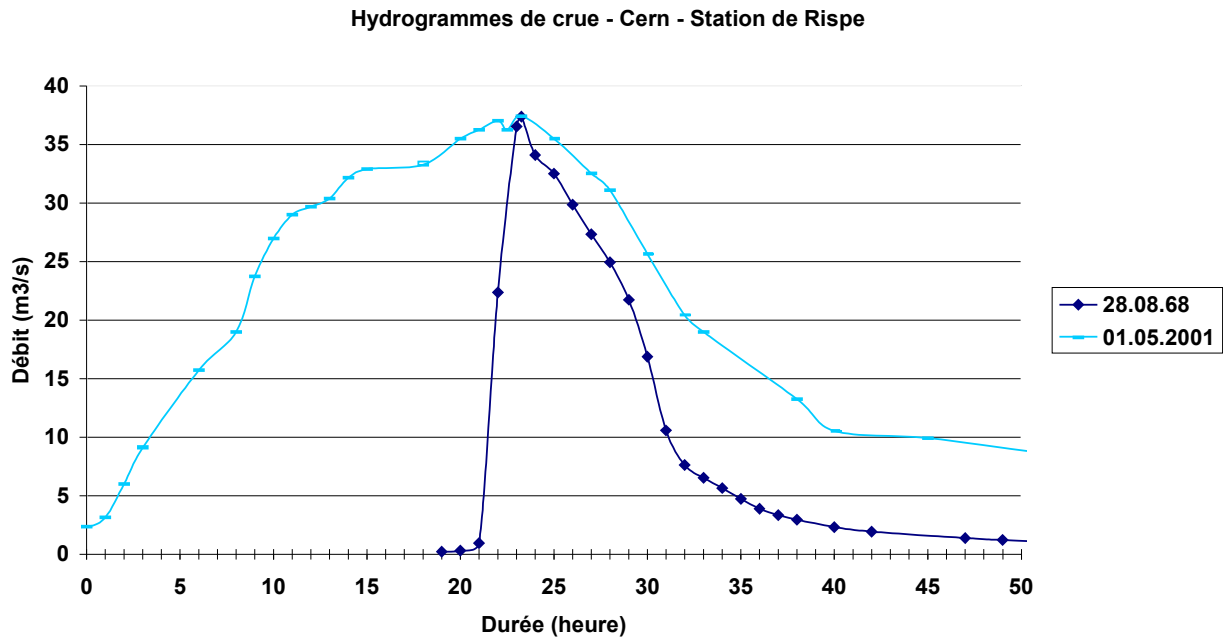


Figure 5 – hydrogrammes de crue : même débit de pointe mais volumes différents

La comparaison faite entre "crue centennale" et "plus forte crue connue" auxquelles fait parfois référence la réglementation appelle trois remarques. La première c'est que l'on rapproche deux événements de nature totalement différente : l'un réel avec sa complexité, l'autre théorique, réduit à une variable unique. La seconde c'est que l'on suppose implicitement que l'on va pouvoir estimer le période de retour des crues sur le secteur concerné et en rapprocher l'événement historique. La troisième c'est que la valeur calculée (le débit de pointe par exemple) - pour une période de retour fixé - peut être très largement fluctuante selon l'échantillon et la méthode d'estimation utilisée et donc conduire à un classement des deux événements sujet à retournement.

3.2.2 - Concomitance

Toutefois la notion de concomitance est un point essentiel à examiner sur des bassins versants importants où peuvent se dérouler des scénarios hydrologiques très différents. Comme le disait Pardé «L'hypothèse catastrophique d'un gros flot de la Garonne supérieure (crue en général de type océanique) rejoignant celui du Tarn (crue type cévenol du Tarn provenant d'affluents comme l'Agout), n'échappe pas absolument au domaine du possible ».

Différents scénarios hydrauliques peuvent ainsi se produire en rendant caduque la notion de période de retour. L'étude hydrologique peut éventuellement conduire à sélectionner plusieurs crues de projet dans un cas de concomitance, suivant la variable prioritaire dans le cadre de l'étude.

La notion de concomitance apparaît comme spontanément importante mais délicate à manier. Ainsi si l'on travaille sur des données hydrométriques d'une station située à l'aval de la confluence de deux sous-bassins, la question de la concomitance par rapport au risque se dissout dans l'analyse statistique de la chronique puisque celle-ci est la résultante de tout ce qui s'est passé à l'amont, quelle que soit la genèse particulière des événements qui ont produit telle hauteur d'eau ou tel débit à la station étudiée. Par contre si l'on part de l'étude de 2 stations situées chacune à l'amont de la confluence des sous-bassins en question, on n'échappe pas à l'étude explicite de la concomitance des événements si l'on s'intéresse à l'aval. .

3.2.3 - Hydrogramme synthétique mono-fréquence

On ne devrait pas toujours seulement dimensionner un ouvrage pour un débit de pointe mais pour une crue de projet, donc prendre en compte à la fois le débit et le volume de la crue; et cela pour différentes périodes de retour. Cela implique généralement de faire une étude hydraulique en transitoire. En effet si on n'utilise que le débit de pointe en régime permanent on va aboutir à un dimensionnement trop pessimiste qu'on assimile souvent à une marge de sécurité laquelle est illusoire car inconnue et non explicite.

La méthode QDF permet par exemple de construire un hydrogramme synthétique mono-fréquence, i.e. qui a la même période de retour pour le débit de pointe que pour le volume, quelque soit la durée sur laquelle on le calcule. (se référer au guide Cemagref «Recommandations pour le calcul des aléas hydrologiques dans le cadre des PPRI – MEDD-DPPR»)

On pourra aussi appliquer d'autres approches semi-quantitatives comme l'appréciation de similitude entre hydrogrammes de projet et observés.

3.3 - Incertitudes, intervalles de confiance et sensibilité

Il importe de connaître le degré de fiabilité que l'on peut attribuer aux valeurs déduites de l'analyse hydrologique. Pour permettre la réalisation d'une étude de sensibilité du modèle hydraulique aux variations des entrées hydrologiques, il est nécessaire que la phase hydrologie fournisse ses résultats (débits, hydrogrammes, ...) assortis d'une incertitude dont la valeur doit être justifiée par le chargé d'étude.

Cette notion trop souvent oubliée sinon ignorée est pourtant fondamentale. Il y a en effet deux aspects sous-jacents :

- * **l'incertitude** elle-même sur la valeur d'une variable (donc sa précision),
- * la **sensibilité** d'une formule ou d'un modèle hydrologique.

Ces deux aspects sont fréquemment confondus lorsque l'on parle de fiabilité ou d'incertitude sur le résultat final. Il est pourtant essentiel de les distinguer.

Par exemple et pour simplifier:

1- Une formule qui fait intervenir différents paramètres peut être très sensible à l'un d'entre eux. Autrement dit : une faible variation de la valeur de ce paramètre va entraîner une importante variation du résultat final du calcul. Si ce paramètre est réellement connu avec une grande précision, l'incertitude finale restera probablement limitée; par contre si celui-ci n'est connu qu'à 50% près l'incidence finale sera peut être de plusieurs centaines de %.

2 - Inversement, pour un paramètre dont la variation n'affecte pas trop le résultat de la formule, l'incertitude sur sa valeur peut être importante, cela n'aura qu'une influence marginale sur le résultat final.

Ainsi la notion d'incertitude est à relier non seulement à la précision de chaque paramètre pris individuellement, mais aussi au type de formule ou de représentation retenu dans un modèle. C'est dire qu'il faut d'un côté admettre a priori comme normal des écarts de 1 à 3 par exemple sur l'estimation d'un débit centennal selon différentes approches, d'un autre côté tester des approches multiples pour tenter de réduire cette incertitude quand on le peut, en particulier en utilisant des méthodes parfois rustiques mais robustes, et en dernière analyse en retenant les résultats et leur incertitude associée en privilégiant la cohérence, la plausibilité et le maximum de conformité avec les données d'observations de terrain.

"Il est impossible de se fier aux résultats d'une étude hydrologique si ceux-ci ne sont pas étayés d'une enquête de terrain (à l'inverse, une expertise basée sur la seule enquête de terrain est en général fiable, sinon précise)".

Comité Français des Grands Barrages (1994) : Les crues de projet des barrages : méthode du gradex.- Barrages et réservoirs - 18ème congrès CIGB/ICOLD - N°2 Novembre 1994

La **sensibilité** est par définition mathématiquement cernable. Il suffit de faire varier un paramètre de 5, 10, 20, ou 100% (à relier le cas échéant à l'incertitude sur ce paramètre) et d'observer le résultat. Il n'en est pas de même pour l'**incertitude** sur l'estimation d'un paramètre.

On ne peut pas toujours donner une fourchette mais il est toujours nécessaire de recommander un calcul de sensibilité du modèle hydraulique aux variations des données hydrologiques.

Après un examen des différents types d'incertitudes rencontrées dans l'estimation de la probabilité d'un débit de crue, J. MIQUEL conclut :

"Les incertitudes qui viennent d'être examinées se conjuguent pour produire une incertitude globale sur l'estimation de la probabilité d'un débit de crue. Quelle est-elle?"

Il faut dire clairement que ce problème n'est pas résolu à l'heure actuelle, d'abord parce que certaines incertitudes ne sont pas calculables, ensuite parce que la combinaison des incertitudes entre elles est très complexe.

Compte tenu de ces limitations, la validation d'une estimation comprend deux étapes :

- un pari : il concerne les hypothèses et les incertitudes non calculables. Au moindre doute il faut avoir recours aux tests classiques dont quelques-uns ont été fournis dans ce guide. En cas de difficulté il faut annoncer que l'estimation sera douteuse. Seule une analyse de sensibilité, quand elle est possible, peut redonner consistance à l'estimation.

- une évaluation chiffrée : l'intervalle de confiance (à 70 % en général) qui fixe la qualité optimale de l'estimation, et le niveau d'extrapolation possible, les autres étant supposées parfaitement contrôlées."

MIQUEL, Jacques (1984) : Guide pratique d'estimation des probabilités de crues.- Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'Electricité de France, N°53.

Comme le précise par ailleurs J. MIQUEL, la notion classique d'intervalle de confiance ne traduit en effet que l'incertitude liée à la loi d'ajustement statistique employée et à la taille de l'échantillon. Elle n'intègre donc pas les autres incertitudes (métrologie, stationnarité, inadéquation de la loi, erreurs, etc...).

Par ailleurs autant le choix du seuil de confiance, qu'ensuite celui d'une valeur donnée dans l'intervalle de confiance peut être largement psychologique et intégrer une sensibilité du corps social.

Il est donc a minima recommandé :

- de tester et d'indiquer la sensibilité des méthodes employées
- d'analyser, ne serait-ce que qualitativement les sources d'incertitude dans l'ensemble du processus hydrologique conduisant à "la" valeur ou aux divers éléments proposés en entrée du modèle hydraulique.
- de voir l'incidence du choix de la valeur dans l'intervalle de confiance sur le résultat de l'étude (par exemple : faible ou forte variation du champ d'inondation, ou de l'ouverture d'un ouvrage, ou même du coût de celui-ci)
- donc d'encadrer un calcul effectué sur la valeur moyenne ("celle qui a la plus forte probabilité d'être plausible") par un raisonnement sur une fourchette.

En bref, raisonner par sensibilité et fourchette.

il importe de se rappeler que la confrontation en retour des éléments hydrauliques sur les estimations (fréquentielles) hydrologiques peut se faire par exemple à partir d'une valeur de débit calculée par simulation hydraulique ou à partir de la fréquence empirique du niveau des laves de crues. La reprise dans la littérature de valeurs de débit calculées sans qu'on en connaisse la méthode et les sources est à prendre avec précaution ne serait-ce qu'en raison des modifications de l'occupation des bassins versants et du réseau hydrographique lui-même. Ceci rejoint d'ailleurs dans l'analyse de sensibilité (autant hydrologique qu'hydraulique) les tests faits en modifiant l'occupation du sol des bassins versants ou la géométrie du réseau hydrographique (pente, enfoncement, recalibrage, etc...)

3.4 - Conclusion

La vérité (la précision?) n'est pas visée par l'hydrologie : seuls comptent la cohérence, la plausibilité, l'ordre de grandeur et l'incertitude associée.

“ Les mathématiques sont une chose secondaire en hydrologie. Et là où elles servent, elles donnent des renseignements de toute façon seulement approximatifs et qui n'ont point une supériorité décisive ou même sensible sur les résultats que donnent les bons hydrologues non mathématiciens. Puis, les mathématiciens mauvais hydrologues peuvent commettre de grosses erreurs qu'un bon hydrologue, c'est à dire un bon géographe, évitera. Bien entendu, il peut arriver qu'un mathématicien ou physicien génial trouve, presque sans culture hydrologique et peu d'observations, des résultats extraordinaires ; mais la chose serait difficilement vérifiable avant quelques années ou quelques siècles. ”

Lettre du professeur Pardé à René Frécaut (23 avril 1958); in “ l'eau, la terre et les hommes ” aux Presses Universitaires de Nancy (1993), 25 rue du baron Louis (200f)

Cette citation peut être considérée comme excessive ou reflétant une vieille opposition entre géographes et mathématiciens. Elle a toutefois le mérite de mettre le doigt sur ce que rappelle le Comité Français des Grands Barrages dans son bulletin de novembre 1994 (cf citation supra), le rôle fondamental du terrain en hydrologie.

Approche scientifique ne signifie pas nécessairement mathématique, mais raisonnement et démarche logique et intégrée, cohérence, analyse critique, vraisemblance. Les mathématiques en hydrologie ne créent pas de connaissance mais visent à la structurer, à la rendre plus opérationnelle, à tester comparativement les conséquences d'aménagements, à orienter la prévision et les démarches prospectives.

4 – Les méthodes de l'hydrologie opérationnelle

Le lecteur est invité à se référer au guide Cemagref « Recommandations pour le calcul des aléas hydrologiques dans le cadre des PPRI – MEDD-DPPR » pour le détail des différentes méthodes existantes.

Annexe 4

Choix de la modélisation

Table des matières

1. Introduction.....	3
2. Concepts de base et terminologie.....	3
2.1. Notion de modèle.....	3
2.2. Calage.....	4
3. Modèles simplifiés.....	4
3.1. Modèles à réservoirs.....	4
Principe.....	4
Contraintes , données nécessaires , précision.....	5
Variantes.....	5
Réservoir linéaire.....	5
Modèle de Muskingum.....	5
Retenue avec ouvrage.....	6
Applications - exemples.....	6
3.2. Modèle de l'onde diffusante.....	6
Principe.....	6
Contraintes , données nécessaires , précision.....	6
Variantes.....	6
Modèle de Hayami.....	6
Onde cinématique.....	7
3.3. Modèles d'ouvrages.....	7
Principe.....	7
Contraintes , données nécessaires , précision.....	7
Variantes.....	8
Applications - exemples.....	8
4. Modèles de Saint-Venant.....	8
4.1. Principes généraux.....	8
4.2. Modèle de Saint-Venant 1D (avec direction privilégiée).....	8
Contraintes et hypothèses de base.....	8
Données nécessaires.....	10
Géométrie.....	10
Pertes de charge par frottements.....	11
Pertes de charge singulières.....	12
Conditions aux limites.....	12
État initial.....	12
Précision du modèle.....	13
Variantes.....	13
Permanent vs. transitoire.....	13
Topologie du réseau.....	14
Modèles à lits composés.....	14
Modèles avec casiers.....	15
Échanges latéraux.....	15
Applications - exemples.....	15
4.3. Modèle de Saint-Venant 2D (sans direction privilégiée).....	17

Contraintes , données nécessaires , précision	17
Variantes	17
Applications - exemples	17
5. Comment choisir entre une modélisation 1D et une modélisation 2D ?.....	18
5.1. Critère « variables à calculer »	19
5.2. Critère « couverture des phénomènes à représenter »	19
6. Modèles détaillés (3D à surface libre).....	20
6.1. Principe	20
Contraintes, données nécessaires, précision	21
6.2. Variantes	21
6.3. Applications - exemples	21
7. Modèles de transport-dispersion de polluant.....	22
7.1. Principe	22
Contraintes, données nécessaires, précision	22
7.2. Variantes	23
2D plan	23
3D	23
7.3. Applications - exemples	23
8. Quel modèle pour quelle application.....	23
8.1. Quelques questions importantes pour choisir un modèle	23
8.2. Quelques situations à problème.....	24
Saint-Venant 1D et marée	25
Débordement par dessus une digue.....	25
Bourrelet de berge	26
Recoupement de méandre	26
Lit perché	28
Bief contrôlé par un ouvrage de régulation.....	28
9. Bibliographie.....	30
10. Annexes.....	31
10.1. Définitions de base de l'hydraulique à surface libre	31
10.2. Quelques valeurs typiques du coefficient de Strickler.....	33
10.3. Équations de Barré de Saint-Venant	34
Formulation complète en 1D.....	34
Principales méthodes de résolution.....	34
10.4. Équation de l'onde diffusante	35
10.5. Équation de convection-diffusion pour la dispersion de polluant	36
10.6. Equations de Navier-Stokes	36
10.7. Quelques exemples de schémas numériques	37
Schéma de Preissmann	37
Schéma décentré amont pour l'équation de convection-diffusion.....	38

1. Introduction

Ce chapitre se veut une revue des différents modèles utilisables dans le champ de la simulation des écoulements de rivières. On se concentrera surtout sur les modèles de Saint-Venant sans toutefois négliger les modèles simplifiés (Hayami ou modèles à compartiments) ni les modèles les plus détaillés comme ceux basés sur les équations de Navier-Stokes tridimensionnelles.

Pour chaque modèle on indiquera les hypothèses de base, les contraintes (calage, charge de calcul, ...) et les données nécessaires (géométrie, occupation du sol, ...). On s'intéressera bien entendu au traitement numérique de chaque modèle, à la précision des résultats que l'on peut attendre et à ce qui fait la qualité du modèle. On donnera ensuite une liste d'applications, avec des exemples, pour lesquelles le modèle est bien adapté. On terminera chaque présentation de modèle par une revue des variantes existantes. Une bibliographie en fin de chapitre fournit une liste de documents susceptible de compléter l'information du lecteur souhaitant aller plus loin.

On ne trouvera pas ici de liste de logiciels car cela supposerait un travail de d'enquête et de comparaison qui sort du cadre de ce guide. Par ailleurs les rédacteurs seraient juges et parties dans la construction d'un tel catalogue. Enfin ce n'est pas parce qu'un logiciel n'est pas connu qu'il est mauvais ni parce qu'il est connu qu'il ne l'est pas ou qu'il est adapté à l'usage envisagé. En revanche on espère que les informations et conseils dispensés par ce guide fourniront au lecteur les moyens de tracer de façon adéquate les contours de la question à traiter, de poser des contraintes judicieuses et de se faire une opinion éclairée sur les propositions de solutions qui lui seront faites.

La présentation des modèles est précédée d'un chapitre sur les concepts de base de l'hydraulique et la terminologie utilisée. Le dernier chapitre se veut une aide pour répondre à la question de savoir quel modèle choisir pour une application donnée.

Enfin on a reporté dans les annexes les détails techniques comme les équations et autres formules de perte de charge qui alourdiraient trop la lecture. Ceux qui en auraient besoin ou sont intéressés, n'auront pas à chercher trop loin pour les trouver.


2. Concepts de base et terminologie

2.1. Notion de modèle


On confond souvent plusieurs entités sous le terme de modèle ; par exemple quand on parle d'un modèle Saint-Venant, il peut être question d'un code de calcul qui résout une certaine version des équations de Saint-Venant pour l'hydraulique à surface libre. Il peut aussi s'agir du modèle mathématique lui-même, c'est à dire une formulation des équations, assortie des hypothèses sous lesquelles ces équations sont une représentation acceptable de la réalité. Enfin cela peut aussi être un paquet de données associées à un logiciel qui produit des simulations d'écoulement sur un tronçon de rivière déterminé (modèle du Rhône entre le Léman et Lyon par exemple). Pour être en mesure de faire des choix de modélisation éclairés, il convient donc de distinguer :



Le modèle mathématique : ce sont les équations assorties des hypothèses qui en fixent le cadre de validité. Il y a toutes sortes d'équations possibles, équations aux dérivées partielles (Saint-Venant), équations différentielles, équations algébriques (le bon vieux polynôme par exemple). On en trouvera un échantillon en annexe.

 Le code de calcul : il réalise le traitement numérique du modèle mathématique, c'est à dire la résolution approchée des équations. Généralement ce traitement repose sur des choix techniques et des simplifications qui relèvent de l'expertise du concepteur du logiciel. Selon les choix qui auront été faits, on obtiendra un code de calcul qui résout une sous-classe plus ou moins large des équations d'origine.

En général un tel code de calcul est générique au sens où il n'est pas dédié à un jeu de données particulier. Par exemple un même code qui résout les équations de Saint-Venant peut être utilisé pour simuler différentes rivières. Bien entendu on peut implémenter dans un même logiciel la résolution de plusieurs modèles mathématiques différents, par exemple les équations de Saint-Venant et l'équation de convection-diffusion, à charge pour l'utilisateur de faire son choix.

 Le modèle numérique : c'est le regroupement d'un modèle mathématique, d'un code de calcul capable de « jouer » ce modèle (résoudre les équations) et d'un ensemble de données statiques. Ces données sont qualifiées de statiques par opposition aux données dynamiques qui sont celles qui vont changer au cours de l'exploitation du modèle. Par exemple on peut considérer que, dans une problématique de cartographie de zones inondées, la géométrie et l'occupation du sol sont des données statiques alors que les apports de débit aux frontières de la zone d'étude sont des données dynamiques car on va exploiter le modèle en jouant différents scénarios de crue.

Dans la suite on s'intéressera à la fois au choix du modèle mathématique et au choix des contraintes à imposer au code de calcul de façon à obtenir un modèle numérique aussi fidèle que possible aux aspects de la réalité étudiés.

2.2. Calage

Dans la plupart des modèles, une part des données est mesurable (ou considérée comme telle) et l'autre ne l'est pas. C'est typiquement le cas des équations de Saint-Venant dans lesquelles la géométrie est en général considérée comme mesurable alors que les paramètres des lois de perte de charge (coefficients de Manning ou de Strickler dans la loi de Manning-Strickler, coefficient de Chézy), sont difficilement accessibles, d'autant plus que dans leur utilisation concrète on leur assigne un rôle plus large que ne le prévoit la théorie.

Ces paramètres sont des paramètres de calage, c'est à dire qu'on les obtient comme on peut sous la contrainte de minimiser l'écart entre le résultat d'une ou plusieurs simulations et les observations que ces simulations sont censées reproduire.

3. Modèles simplifiés

3.1. Modèles à réservoirs

Principe

Dans un modèle à réservoirs la rivière est découpée en tronçons assimilés à des réservoirs dont le fonctionnement est basé sur l'équation de conservation du volume (ie de la masse avec l'hypothèse d'incompressibilité de l'eau) : le taux de variation du volume V stocké dans le réservoir est égal au bilan de débit (différence entre le débit d'entrée $Q_{entrant}$ et le débit de sortie $Q_{sortant}$).

$$\frac{dV}{dt} = Q_{entrant}(t) - Q_{sortant}(t)$$

A l'équation de conservation du volume on ajoute une relation entre le volume stocké et le débit ; on obtient alors une équation différentielle ordinaire sur le débit que l'on peut

résoudre avec les techniques numériques classiques. Si nécessaire, une loi de tarage permet ensuite de déduire la cote de l'eau dans chaque réservoir.

Contraintes , données nécessaires , précision

La résolution complète, en débit et niveaux d'eau, d'un modèle à réservoirs suppose l'existence d'une relation univoque entre le débit et la hauteur d'eau. On ne pourra donc pas utiliser ce modèle dans les cas où une telle relation n'existe pas ; par exemple dans les cas où le niveau est contrôlé par des ouvrages de navigation.

De plus ce type de modèle ne permet pas, à strictement parler, de propager des ondes de crue de façon à rendre compte de leur amortissement. Ce n'est possible que grâce à la diffusion numérique inhérente aux méthodes numériques d'approximation (Cunge 1969). L'adéquation de cette diffusion à la diffusion réelle fait intervenir des paramètres de calage .

De façon générale ces modèles dépendent de paramètres de calage qui sont intimement liés aux grandeurs caractéristiques de l'écoulement, en particulier au débit ; en conséquence un nouveau calage sera nécessaire si l'on veut utiliser le même modèle dans un régime de fonctionnement différent.

Variantes

Réservoir linéaire

On suppose que le volume stocké est proportionnel au débit sortant, le rapport de proportionnalité étant la « constante de temps » du réservoir. Le débit sortant au pas de temps $n+1$ s'exprime alors comme une combinaison linéaire du débit entrant au pas de temps $n+1$ et des débits entrant et sortant au pas de temps n (modèle autorégressif moyenne mobile ARMA) (voir Précis d'hydrologie par ???).

En général, pour les rivières, on utilise le réservoir linéaire avec temps mort de façon que les variations du débit entrant ne jouent sur le débit sortant qu'avec un certain délai. Ce paramètre comme la constante de temps sont des paramètres de calage.

On peut encore généraliser en considérant que ces paramètres sont variables dans le temps.

On obtient la formulation ARMA générale, avec Q le débit, C_n et C_{n+1} les coefficients de pondération :

$$Q_{\text{sortant}}^{n+1} = C_n Q_{\text{sortant}}^n + C_{n+1} Q_{\text{entrant}}^{n+1} + C_n Q_{\text{entrant}}^n$$

Enfin on peut ajouter la modélisation des débordements et celle des échanges avec la nappe.

On peut montrer que les coefficients C_n dépendent du débit ; en conséquence on ne pourra pas utiliser les mêmes valeurs de coefficient en crue et en étiage.

Modèle de Muskingum

Dans le modèle de Muskingum (Cunge, 1969), on suppose que le volume V stocké dans le réservoir dépend linéairement d'un bilan pondéré des débits Q entrant et sortant.

$$V(t) = k \cdot [\gamma Q_{\text{entrant}}(t) - (1 - \gamma) Q_{\text{sortant}}(t)]$$

On peut faire sur le modèle de Muskingum les mêmes remarques que pour le réservoir linéaire.

Retenue avec ouvrage

Dans ce type de modèle le réservoir est constitué par une retenue dont la géométrie est décrite par une relation donnant son volume ou sa surface en fonction du niveau. Le débit de sortie est contrôlé par une loi d'ouvrage (vannes, seuils, orifice, ...). La connaissance du niveau dans la retenue permet d'utiliser les lois d'ouvrages classiques et même, quand il y a plusieurs retenues en série, d'obtenir une représentation des influences aval en permettant aux ouvrages de fonctionner en régime noyé.

Applications - exemples

Modèle du bassin de la Seine à l'amont de Paris (Bceom, Cemagref ; 1994) utilisé pour l'optimisation de la gestion coordonnée des barrages -réservoirs des Grands Lacs de Seine (IIBRBS).

3.2. Modèle de l'onde diffusante

Principe

L'équation de l'onde diffusante est une simplification des équations de Saint-Venant, obtenue en supposant qu'il n'y a pas d'apports ou pertes latéraux (pas d'échange avec la nappe en particulier) et que les termes d'inertie sont négligeables devant les termes de gravité. On obtient alors une équation de convection-diffusion non-linéaire sur le débit Q :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C(Q, Z, x) \frac{\partial Q}{\partial x} + D(Q, Z, x) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0$$

La célérité C et la diffusion D sont reliés au débit Q et au niveau Z à travers la fonction de perte de charge linéaire. En utilisant la fonction de Manning-Strickler et en faisant des hypothèses sur le forme du profil en travers de la rivière, on peut obtenir des expressions analytiques plus ou moins approchées. Une formulation classique est une expression de C et D par des puissances de Q .

Contraintes , données nécessaires , précision

Si l'on ne s'intéresse qu'au débit on a un modèle bien adapté à la propagation de crue, du fait de la présence du terme de diffusion que l'on n'est plus obligé de produire grâce à un artefact numérique.

La résolution complète, en débit et niveaux d'eau, d'un modèle basé sur l'équation de l'onde diffusante, suppose l'existence d'une relation univoque entre le débit et la hauteur d'eau. On ne pourra donc pas utiliser ce modèle dans les cas où une telle relation n'existe pas ; par exemple dans les cas où le niveau est contrôlé par des ouvrages de navigation.

La précision du modèle numérique final dépend, comme toujours, de la qualité du calage. Comme les paramètres de calage (C et D) sont des fonctions directes du débit, un jeu de paramètres n'est valable que pour la gamme de débits sur laquelle il a été établi.

Variantes

Modèle de Hayami

Le modèle de Hayami est obtenu par linéarisation de l'équation de l'onde diffusante autour d'une valeur de débit de référence ; c'est à dire qu'on fixe les valeurs de C et D à

celles correspondant au débit de référence choisi. Dans ce cas l'équation admet une solution analytique pour des hydrogrammes entrants de formes simples (échelons ou rampes).

Onde cinématique

On suppose le terme de diffusion négligeable et on obtient un simple transfert de débit, quoique encore non-linéaire dans sa forme générale. Cette hypothèse n'est pas réaliste dans le cas d'un bief de rivière.

3.3. Modèles d'ouvrages

Principe

Les modèles d'ouvrage sont des modèles simplifiés destinés à modéliser le fonctionnement des ouvrages en travers ou latéraux qui interfèrent avec l'écoulement naturel de la rivière. En général ils sont utilisés pour relier entre eux des tronçons dans lesquels l'écoulement est considéré comme naturel.

On peut distinguer trois types de modèles d'ouvrage.

- Les ouvrages qui représentent une perte de charge (dite alors singulière par opposition à la perte de charge linéaire due au frottement sur le fond et les berges) sont représentés par une fonction qui exprime le débit à travers l'ouvrage en fonction des niveaux amont et aval, et des caractéristiques géométriques de l'ouvrage. En général un coefficient de débit permet de caler la loi de fonctionnement sur des données d'observation.
- Les ouvrages les plus utilisés sont les seuils ou déversoirs, les vannes et orifices, les pertes de charge à la Borda pour les élargissements et rétrécissements brusques.
- Les ouvrages qui représentent une perte de débit, sont essentiellement des pompes et des déversoirs latéraux (dénomination équivalente : déversoirs longitudinaux).

Contraintes , données nécessaires , précision

La principale caractéristique de ces modèles est de globaliser le fonctionnement des ouvrages qu'ils représentent. Autrement dit on ne se préoccupe pas de ce qui se passe à l'intérieur de l'ouvrage ; en particulier on s'abstient de chercher à déterminer la ligne d'eau sur un seuil ou sous une vanne, évitant ainsi d'avoir à localiser un éventuel ressaut. Dans le cas où un tel niveau de détail serait souhaité, il faudrait se tourner vers des modèles plus appropriés comme les équations de Saint-Venant (voir cependant leurs limitations) ou au besoin les équations de Navier-Stokes 3D mais ces dernières sortent du cadre de cet exposé.

Dans la pratique les pertes de charges singulières rencontrées sur les rivières sont plus compliquées que les ouvrages simples comme les seuils et les vannes dont les lois de fonctionnement sont bien établies. Elles combinent en fait plusieurs pertes de charges qui s'ajoutent ; par exemple on trouvera souvent associées des pertes de charge au rétrécissement et des pertes de charge sur seuil ou vanne dont les lois ont été établies pour des écoulements en canaux rectangulaires uniformes.

Il est illusoire de croire qu'une formule complexe (avec beaucoup de paramètres) apporte une meilleure précision qu'une formule simple. En effet la multiplication des paramètres rend la formule obscure, difficile à interpréter et complique sérieusement son calage.

Variantes

Pas de variante identifiée.

Applications - exemples

Les modèles d'ouvrage sont généralement utilisés dans les codes de calcul, en combinaison avec d'autres modèles, en particulier avec les équations de Saint-Venant complètes.

Elles servent alors aussi bien pour modéliser de vrais ouvrages que des pertes de charges complexes mal identifiées. Par exemple la modélisation d'une vanne dans un canal, d'un barrage mobile (par une loi de seuil) en parallèle d'une écluse sur une rivière navigable. Un exemple de ce dernier cas est celui du barrage de Couzon au Monts d'Or sur la Saône à l'amont de Lyon.

4. Modèles de Saint-Venant

4.1. Principes généraux

Les équations de Saint-Venant sont basées sur la conservation de la masse traduite en conservation du volume grâce à la constance de la densité de l'eau (incompressibilité en particulier), et sur la conservation de la quantité de mouvement.

Elles existent aussi bien en version mono- que bi-dimensionnelle. Dans la suite on parlera essentiellement de la version mono-dimensionnelle.

Plusieurs méthodes permettent d'établir les équations de Saint-Venant, soit directement en écrivant les bilans de masse et de quantité de mouvement entre deux sections droites de l'écoulement, soit à partir des équations « complètes » de la mécanique de fluides (équations de Navier-Stokes) par intégration (moyenne) de la vitesse sur une verticale.

En effet l'hypothèse de base des équations de Saint-Venant est que l'écoulement est quasi horizontal (faible courbure des lignes de courant) ; en pratique cela signifie que la pente du chenal est inférieure à 10% (ce qui permet d'assimiler un angle à son sinus). Une autre formulation de cette hypothèse consiste à admettre que la pression dans l'écoulement est hydrostatique comme dans un fluide au repos.

Les équations de Saint-Venant modélisent des écoulements capables de propager des ondes (intumescences, ronds dans l'eau). La célérité de ces ondes permet de distinguer deux régimes d'écoulement selon que la vitesse de l'écoulement est inférieure (régime fluvial ou subcritique) ou supérieure (régime torrentiel ou supercritique) à la célérité. Le nombre de Froude mesure le rapport entre la vitesse de l'écoulement et la célérité des ondes ; il est donc inférieur à 1 en régime fluvial et supérieur à un en torrentiel.

La plupart des écoulements rencontrés dans les fleuves, rivières et canaux sont subcritiques ; le régime torrentiel se rencontre dans les rivières à forte pente ou, localement, dans les rivières fluviales au passage d'une singularité (rupture de pente, élargissement brusque, etc.) ou d'un ouvrage (seuil naturel, barrage, pont, etc.).

4.2. Modèle de Saint-Venant 1D (avec direction privilégiée)

Contraintes et hypothèses de base

Les hypothèses de la version 1D des équations de Saint-Venant sont les suivantes.

La pression est hydrostatique, ce qui impose :

les dérivées secondes en temps de la hauteur d'eau et de la cote du fond sont négligeables devant la pesanteur ;

les rayons de courbure verticaux des lignes de courant sont grands (supérieurs à quelques mètres, ce qui exclut toute recirculation verticale) ; cela impose en particulier que les rayons de courbure des méandres sont grands (supérieurs à quelques dizaines de mètres) et que les hauteurs d'eau sont grandes devant les aspérités du fond (au moins dix fois) ;

la pente de la ligne d'eau est faible (inférieure à 10%).

L'écoulement a une direction privilégiée (1D) ; il faut donc que la pente transversale de la surface libre soit nulle.

L'hypothèse d'unidimensionnalité est couramment faite dans les modélisations numériques. On montre ici trois types de cours d'eau pour illustrer la relativité de cette hypothèse et sa plus ou moins grande justesse selon la géométrie de la section du lit.

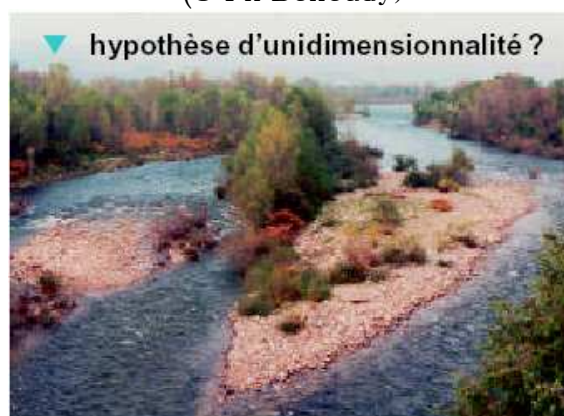
Photo 1 : seuil sur l'Hogneau
(© Cemagref-Poulard)



Photo 2 : Hogneau à Crespin
(© Cemagref-Poulard)



Photo 3 : Ardèche, seuils et mouilles
(© Ph Belleudy)



L'importance de cette hypothèse, et sa légitimité, sera aussi fonction du type de problème posé (que cherche-t-on à calculer ?) et de l'échelle considérée.

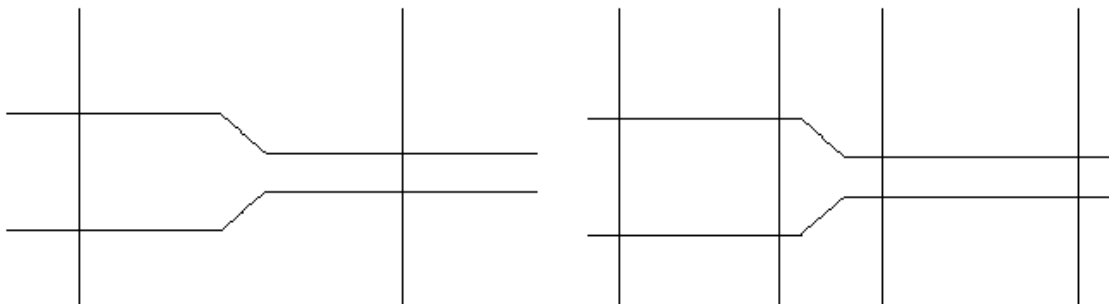
Données nécessaires

Les données concernent essentiellement la géométrie des tronçons, les frottements et pertes de charge et les conditions aux limites et initiales. Les singularités sont traitées par ailleurs (voir 3.3. Modèles d'ouvrages).

Géométrie

La géométrie est constituée par un ensemble de profils en travers (sections droites de la rivière). Il existe plusieurs façons de définir les profils en travers, les plus courantes étant la définition en abscisses-cotes (c à d cote du fond représentée dans un repère situé dans un plan vertical perpendiculaire à la direction de l'écoulement), largeurs-cotes ou paramétrée (le profil a une forme a priori, rectangle, trapèze, etc., particularisé par un nombre réduit de paramètres). Une attention particulière doit être apportée au choix des profils en travers utilisés ; en effet il faut que les profils retenus permettent une représentation aussi fidèle que possible du comportement hydraulique de la rivière. On veillera donc à acquérir des profils en tout point de la rivière où se produit un changement sensible de la géométrie ; c'est le cas par exemple des variations brusques de pente ou de largeur ; de même on recueillera les profils en travers des sections contenant une singularité hydraulique (seuil, pont, etc.).

Figure 1 : position des profils en travers sur un convergeant



Pertes de charge par frottements

La plupart des codes de calcul qui résolvent les équations de Saint-Venant utilisent la formule empirique de perte de charge de Manning-Strickler qui relie la pente de la ligne d'énergie au débit, mais d'autres existent comme la formule de Chézy ou Collebrook. On préférera la formule de Chézy pour les études d'hydraulique côtière et celle de Collebrook pour les conduites. Il ne faut cependant pas oublier que ces formules ont été établies pour des écoulements permanents uniformes ; leur utilisation pour modéliser des écoulements instationnaires est une source supplémentaire d'incertitude.

Dans la pratique, on intègre dans l'idée de frottement et dans son calcul, un ensemble de phénomènes qui dissipent de l'énergie de façon diffuse et régulière (qui n'est pas localisé). A l'échelle où cette dissipation d'énergie est appréciée, c'est une perte de charge régulière exprimée par unité de longueur de rivière. Cette perte de charge se visualise dans les schémas par la pente de la ligne d'énergie.

Les phénomènes effectivement intégrés dans ce terme de frottement sont différents, suivant les systèmes de modélisation, et les habitudes des modélisateurs :

- le frottement dû à la rugosité de peau : par exemple un fond sableux sera plus lisse qu'un fond recouvert de galets ;
- les frottements et la dissipation d'énergie engendrés par la constitution de formes sur le fond : rides, dunes ;
- la végétation : macrophytes longues et traînant dans le courant, ripisylve dense et assez rigide ;
- les structures et les accidents régulièrement disposés dans le cours d'eau mais suffisamment proches pour que la perte de charge soit régulière à l'échelle longitudinale considérée : joints dans un canal revêtu, épis rapprochés ;
- la dissipation turbulente qui résulte de l'hétérogénéité des vitesses ;
- la sinuosité du chenal.

Dans tous les cas la formule utilisée repose sur le choix d'un ou plusieurs coefficients caractéristiques des frottements à prendre en compte. Ces coefficients sont difficiles à estimer et sont généralement considérés comme des paramètres de calage. Ceci implique qu'il est particulièrement important et utile, lors de la construction d'un modèle numérique, de collecter le maximum d'informations sur des événements de référence : débit de l'événement, hauteurs d'eau observées, laisses de crue, ...

On trouve cependant la littérature différentes méthodes destinées à aider le modélisateur à choisir les coefficients de perte de charge les plus appropriés. Chow (1973) en cite trois :

- Méthode des facteurs d'influence qui est basée sur la formule de Cowan (1956) qui exprime le coefficient de Manning (inverse du Strickler) comme une somme de valeurs dépendant de facteurs influençant la rugosité :

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m$$

- où
- n_b = valeur de base pour un chenal prismatique en matériaux naturel ;
 - n_1 = influence des irrégularités du périmètre mouillé (macro-rugosités) ;
 - n_2 = influence des variations de forme et de taille du profil en travers ;
 - n_3 = influence des obstructions ;
 - n_4 = influence de la végétation et des conditions d'écoulement ;
 - m = facteur de correction pour le méandrement du chenal.

- Utilisation de table descriptives : on trouve dans la littérature (Chow 1973) des typologies de rivières donnant des intervalles de valeurs admissibles et les valeurs « normales » (ce n'est pas toujours la moyenne des valeurs minimum et maximum) du coefficient de Manning .
- Comparaison visuelle avec des profils de référence pour lesquels le coefficient de Manning a été mesuré (application de la formule de Manning-Strickler en écoulement uniforme). De nombreuses sources fournissent des photographies de rivière avec l'estimation du coefficient de Manning correspondant : Barnes, 1967; Nolan et al., 1998; Hicks and Mason, 1998.

Pertes de charge singulières

On distingue les pertes de charge par élargissement et rétrécissement et les pertes de charge provoquées par les ouvrages ou structures placées en travers de l'écoulement (seuils, ponts, vannes, ...).

Les pertes de charges par élargissement et rétrécissement sont évaluées par la formule de Borda et généralement prises en compte automatiquement par les codes de calcul. La formule de Borda définit une perte de charge proportionnelle à la variation du carré de la vitesse moyenne entre deux sections successives.

Les pertes de charges provoquées par des ouvrages ou structures en travers sont définies par des lois spécifiques à chaque type de structure (voir 3.3. Modèles d'ouvrages). La littérature abonde en formules d'ouvrages mais toutes reposent sur des hypothèses que l'utilisateur ne doit pas négliger. De même que pour les pertes de charge par frottement, chaque formule utilise un ou plusieurs coefficients que le modélisateur doit caler sur des observations. Plus ces observations seront nombreuses et détaillées, plus le calage sera aisé et le modèle numérique précis.

Conditions aux limites

Le choix des conditions aux limites dépend du régime d'écoulement. Dans le cas d'un écoulement fluvial, les équations de Saint-Venant ont besoin d'une condition à la limite à chaque entrée du modèle (nœuds amont) et d'une condition à la limite à chaque sortie (nœuds aval). En général on impose le débit à chaque entrée et un niveau ou une relation hauteur-débit (loi de tarage) à chaque sortie. Il est important que les conditions aux limites aval soient cohérentes avec les conditions amont ; dans le cas d'une cote imposée, il faut que le décalage temporel sur les niveaux et débits entre l'amont et l'aval soit respecté ; dans le cas d'une loi de tarage il faut que la loi couvre un intervalle de niveaux et débits suffisamment large pour prendre en compte l'ensemble de l'épisode de crue à simuler.

Pour des précisions sur les méthodes et outils de définition des conditions aux limites amont (scénarios de débit, événement de fréquence donnée, ...), voir le chapitre consacré aux données hydrologiques dans le présent guide.

État initial

Sauf dans le cas où l'on résout la variante stationnaire des équations de Saint-Venant, on a besoin de définir un état initial, c'est à dire un débit et un niveau en chaque point de calcul.

La procédure à utiliser pour construire un tel état initial dépend beaucoup des capacités du code de calcul utilisé. Il peut fournir une procédure qui réalise l'initialisation par l'état

permanent correspondant aux conditions aux limites à l'instant initial, il peut permettre de récupérer comme état initial un état calculé auparavant.

Dans tous les cas, il est important de faire démarrer une simulation instationnaire sur un état initial qui satisfasse les équations de Saint-Venant ; dans le cas contraire le programme va simuler une transition entre cet état aberrant et un état physiquement correct ; cette transition peut être longue et coûteuse.

Dans le cas, rare, où l'on dispose de données nombreuses et contemporaines pour initialiser une simulation, le programme utilisé doit être capable de réaliser une interpolation de la ligne d'eau en chaque point de calcul compatible avec les équations de Saint-Venant.

Dans la plupart des cas on n'aura pas de données autres que les données permettant de définir les conditions aux limites ; le choix naturel sera alors de définir l'état stationnaire correspondant comme état initial.

Précision du modèle

La précision d'un modèle numérique basé sur les équations de Saint-Venant dépend d'une part de la précision des données, en particulier géométriques, et d'autre part de la qualité du calage.

La plupart du temps la précision d'un modèle numérique est évaluée par un intervalle de valeurs sur les niveaux (« + ou - 5 cm » de la « vraie » valeur). Cette approche est réductrice puisqu'elle ne donne aucune information sur le débit ; cependant elle se comprend dans la mesure où l'on raisonne souvent en régime permanent et du fait que le débit est une variable de forçage (par les conditions aux limites) donc supposée bien connue. Malheureusement le débit provient en général d'une modélisation hydrologique dont l'incertitude est, dans la plupart des cas, plus grande que celle du modèle hydraulique.

Une position pragmatique sera d'évaluer la précision du modèle par une mesure de la qualité du calage. Toutefois la précision ne peut être meilleure que celle des données géométriques ; en particulier la précision en cote de modèle calé ne peut être meilleure que la précision en cote des données bathymétriques (géométrie du lit mineur) et topographiques (géométrie du lit majeur).

Il faut aussi considérer que la précision du modèle numérique n'a pas la même importance en tous points ; cela dépend de l'utilisation qui doit en être faite. Il est donc clair que les points où la précision est cruciale doivent être bien identifiés et que la modélisation doit être particulièrement soignée dans la zone d'influence hydraulique de chacun de ces points.

Si aucun calage n'est possible (cela arrive), des informations sur la précision du modèle numérique peuvent être tirées d'une analyse de la sensibilité du modèle aux incertitudes sur les données. Une telle analyse est toutefois délicate et coûteuse en temps et ressources informatiques.

Variantes

Les variantes des équations de Saint-Venant sont nombreuses et apparaissent le plus souvent dans les codes de calcul, comme des compléments des équations de base.

Permanent vs. transitoire

La 1^{ère} variante concerne la distinction entre écoulement permanent (stationnaire) et transitoire (instationnaire). Les écoulements réels en rivière ne sont jamais vraiment stationnaires, cependant il peut être utile de faire cette hypothèse dans certains cas, ne serait-ce que parce que les coûts de calcul sont alors sensiblement réduits. Cependant

l'hypothèse de stationnarité est mise en défaut de façon évidente dans les cas où la dynamique joue clairement un rôle fondamental (propagation d'une onde de crue) mais aussi dans des cas moins immédiats comme ceux où l'on veut étudier le laminage c'est à dire l'amortissement d'une crue par une zone d'expansion de crue. En effet le laminage, qui est déterminé par la différence de débit entre l'entrée et la sortie de la zone d'expansion de crue, n'existe pas en écoulement permanent puisque le débit est constant le long du tronçon étudié (sauf s'il y a des apports extérieurs intermédiaires).

Des cas typiques pour lesquels une modélisation instationnaire est requise, sont par exemple :

- étude de l'amortissement d'une onde de crue ;
- écoulement soumis à l'influence de la marée ;
- laminage d'une crue par un lit majeur ou une zone de stockage (casiers) ;
- écoulement contrôlé par une régulation automatique.

Cependant la construction d'un modèle numérique instationnaire requiert, en plus des données traditionnelles utilisées pour caler les modèles stationnaires, des éléments sur l'amortissement le long du bief : diminution du débit de pointe, temps de transit, déformation de l'hydrogramme, ...

Topologie du réseau

En général la modélisation d'une rivière sur la base des équations de Saint-Venant conduit à découper la zone d'étude en tronçons (ou biefs ou branches) interconnectés par des nœuds correspondant aux confluent et défluent naturels (voir le chapitre 4 pour l'analyse hydraulique de la zone d'étude). Sur chaque tronçon seulement on appliquera les équations de Saint-Venant, l'interconnexion est réalisée par les nœuds où l'on suppose avoir une relation de perte de charge (en général absence de perte de charge) et la conservation des volumes. Ces relations permettent de propager une crue depuis les différents nœuds d'entrée du réseau (conditions aux limites amont) jusqu'aux nœuds de sortie (aval).

Dans le cas où le réseau est maillé (il y a au moins un nœud avec un défluent), il faut utiliser un code de calcul adapté, capable de prendre en compte un réseau hydraulique de ce niveau de complexité. Ce cas se présente dès qu'il y a au moins deux nœuds avec une condition à la limite aval.

Modèles à lits composés

La vitesse qui apparaît dans les équations de Saint-Venant est une vitesse moyenne qui, par définition, ne rend pas compte de la dispersion du champ des vitesses dans une section droite de l'écoulement (section mouillée). Les équations de Saint-Venant tiennent compte de cette dispersion à travers le « coefficient de Boussinesq » ou « coefficient de quantité de mouvement ». Il faut cependant une équation supplémentaire pour exprimer ce coefficient en fonction des variables d'état (débit et niveau) et fermer ainsi le système.

Souvent on peut se contenter de choisir la valeur standard de 1,2 pour ce coefficient, mais dans le cas où il faut modéliser des débordements en lit majeur, cette valeur ne peut plus être considérée comme constante et un modèle complémentaire est nécessaire.

Le modèle complémentaire sans doute le plus courant est celui dit « de Debord » défini par le LNH (référence Houille Blanche) ou l'une de ses variantes. Des travaux sont en cours dans plusieurs laboratoires à travers le monde pour améliorer ces formules (Louvain la Neuve, Cemagref, ...).

Ces modèles complémentaires sont d'autant plus nécessaires que l'on veut utiliser des coefficients de frottement différents dans des sous-sections de la section d'écoulement. Ceci est généralement le cas justement quand il y a un lit majeur actif qui en raison de la faible fréquence des inondations a une rugosité différente de celle du lit mineur (présence de végétation permanente, arbres, maisons, ...).

Modèles avec casiers

Les modèles avec casiers sont des modèles basés sur les équations de Saint-Venant sur un réseau ramifié ou maillé dans lequel certains nœuds modélisent des zones de stockage. L'équation de bilan de débit au nœud est alors modifiée pour tenir compte de la variation du volume d'eau stocké dans le nœud. Cette variation du volume dépend de la géométrie du nœud, plus précisément de la relation entre le niveau et le volume. La géométrie de ces casiers est en général définie par une relation donnant la surface horizontale du casier en fonction du niveau de l'eau (ce qui est équivalent à une relation volume-niveau, la surface étant la dérivée du volume par rapport à la profondeur).

Échanges latéraux

Dans les équations de Saint-Venant, le terme source de l'équation de conservation de la masse représente les échanges latéraux avec l'extérieur. On peut ainsi modéliser des apports par ruissellement ou par la pluie, des pertes par infiltration ou évaporation mais aussi des échanges avec un lit majeur de stockage, avec la nappe ou bien avec des casiers ou d'autres parties du réseau par déversement latéral.

Applications - exemples

Les applications les plus courantes des modèles basés sur les équations de Saint-Venant sont celles pour lesquelles on a besoin de connaître les niveaux d'eau avec une bonne précision :

- Délimitation de zones inondées (atlas de zones inondables, PPRI, ...), en particulier dans les cas où il n'existe pas une relation hauteur – débit en chaque point de la zone étudiée (c'est le cas le plus courant). Le cas de l'onde de submersion provoquée par une rupture de barrage ou de digue, est un cas un peu particulier car il concerne des écoulements potentiellement torrentiels qui supposent des méthodes numériques, et donc des codes de calcul, spécialement adaptés.
- Impact d'un ouvrage sur la propagation des crues, franchissement d'une vallée par une infrastructure de transport avec pour objectif de dimensionner des ouvrages « transparents » pour une crue de fréquence donnée.
- Régulation d'un cours d'eau au moyen d'ouvrages pour la navigation (maintenir un mouillage ou un plan d'eau), l'irrigation, la production hydro-électrique (maintien d'un débit), ...
- Études de la dynamique des débordements : analyse de scénarios d'aménagement de type « ralentissement dynamique », anticipation d'inondation, plans d'alerte et de gestion de crise, ...
- Études sur la propagation d'un nuage de polluant qui ont besoin des vitesses moyennes et des sections mouillées (donc des niveaux) pour utiliser et résoudre l'équation de convection-diffusion qui modélise la dispersion d'un polluant.

A titre d'exemple on peut citer :

Le modèle de propagation des crues dans la partie aval de l'Aa, zone de polder sous l'influence des marées de la mer du Nord (Cemagref 1993). Ce modèle était destinés à l'amélioration des consignes de gestion des ouvrages de régulation des écoulements (portes à la mer, stations de pompages, partiteur de Watten, ...).

La délimitation des zones inondables de la baie de Somme (Sogreah).

L'étude du franchissement de la vallée de la Meuse (2000).

L'étude d'inondabilité de la Bourbre en Isère (Cemagref 199?) pour construire une cartographie synthétique du risque d'inondation, les études d'ondes de rupture de barrages réalisées par le LNH (EDF) et le Cemagref, la modélisation du Rhône entre le lac Léman et Lyon pour la nouvelle version du système ROSALY de protection des points de captage d'eau potable de l'agglomération lyonnaise (Burgéap, 2002).

La régulation du Rhône par la CNR avec des objectifs relatifs à la navigation et à la production hydro-électrique.

La modélisation à casier de la Moselle par la Sogreah (2000).

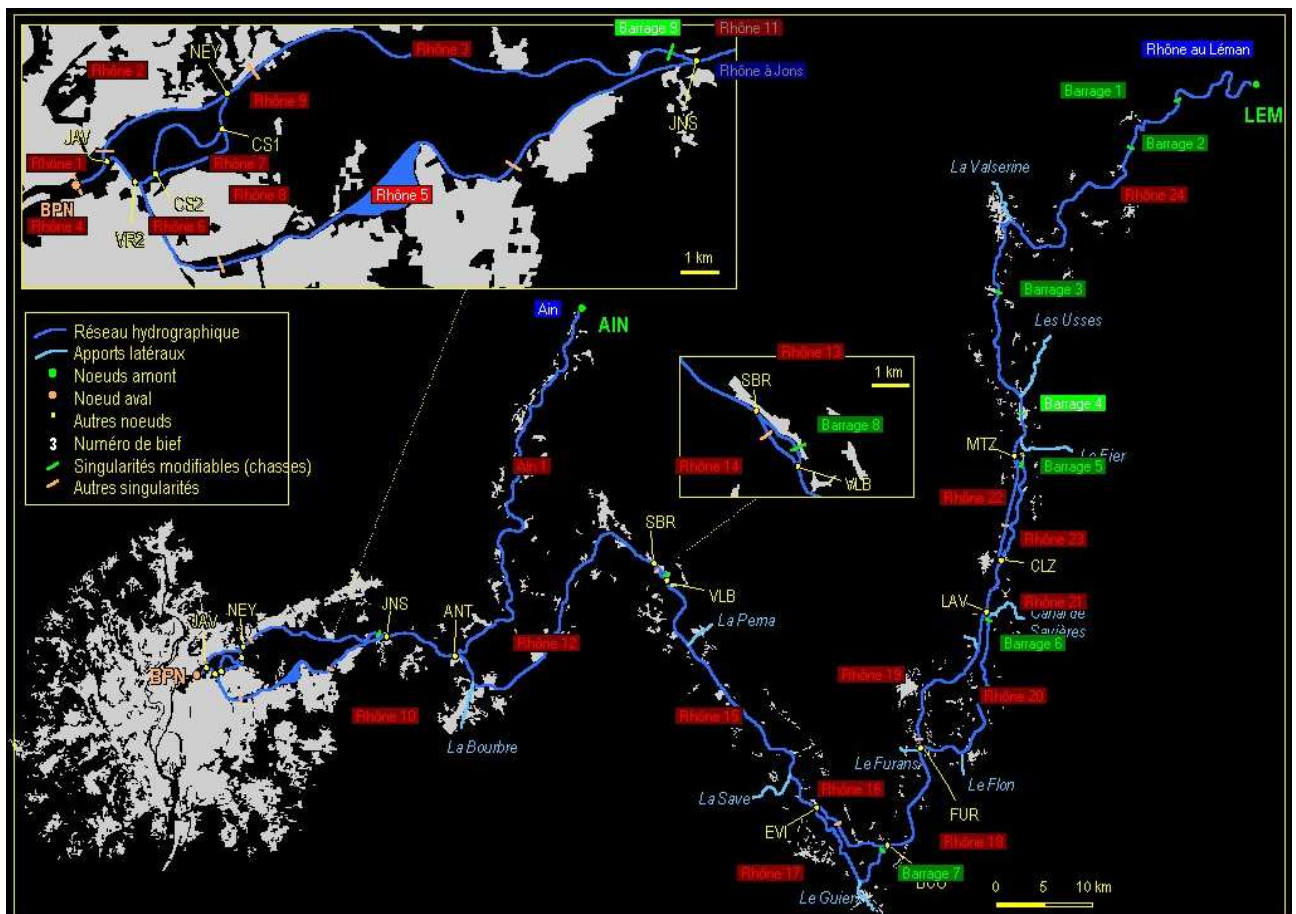


Figure 2 : Modèle du Rhône entre le Léman et Lyon pour le système ROSALY (© Burgéap)

4.3. Modèle de Saint-Venant 2D (sans direction privilégiée)

Contraintes , données nécessaires , précision

Les équations de Saint-Venant 2D sont soumises aux mêmes hypothèses que les équations 1D sauf en ce qui concerne l'existence d'une direction d'écoulement privilégiée. En particulier la pression est toujours supposée hydrostatique, ce qui impose que les courbures verticales des lignes de courants restent faibles et que la hauteur d'eau est grande devant les aspérités du fond.

Les variables d'états utilisées classiquement sont le niveau d'eau (ou la profondeur) et les 2 composantes de la vitesse moyenne horizontale (obtenue par intégration de la vitesse locale sur la verticale).

Comme dans la version 1D il existe un régime d'écoulement fluvial et un régime torrentiel.

Le principal avantage du modèle Saint-Venant 2D sur le modèle Saint-Venant 1D est qu'il peut fournir une bonne estimation des vitesses horizontales locales. La qualité effective de cette estimation dépend toutefois de la méthode numérique utilisée (résolution de la grille spatiale, pas de temps, etc.).

Comme pour la version 1D, les données nécessaires pour la construction d'un modèle basé sur les équations de Saint-Venant 2D, sont :

- la topographie, qui peut être fournie sous la forme de profils en travers ou d'un modèle numérique de terrain (MNT à grille régulière ou non) ; de plus toutes les données permettant d'enrichir, confirmer et critiquer ces informations de base sont importantes à collecter ; il s'agit en particulier des lignes de structures que sont les digues, routes ou voies de chemin de fer, et qui contraignent l'écoulement parallèlement à leur direction;
- l'occupation du sol qui permet d'évaluer la rugosité de surface et ainsi de définir les pertes de charge linéaires ; toutefois cette définition est en général achevée par le calage du modèle ;
- des données d'observation qui permettront de réaliser le calage du modèle (laises de crue, lignes de niveau de la surface libre, champs de vitesses ou à défaut leurs directions, ...)
- des conditions aux limites, vitesse ou flux imposé fonction du temps sur les frontières d'entrée et niveaux ou flux imposés fonction du temps ou loi de tarage sur les frontières sortantes.

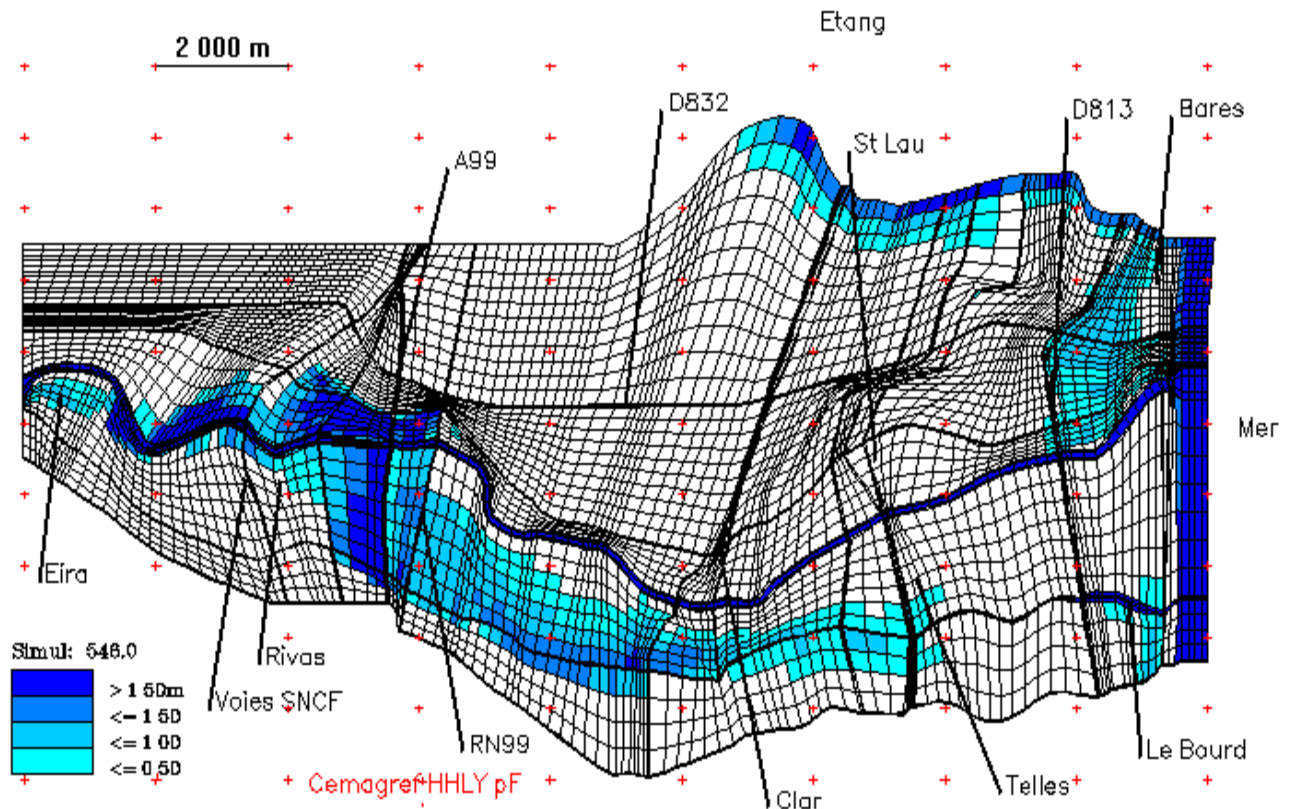
Variantes

Les principales variantes concernent la prise en compte du transport solide et de sédiment. Dans ce cas des équations supplémentaires sont ajoutées pour rendre compte de l'évolution du lit. Cependant les développements de ces variantes du modèle de Saint-Venant 2D sont encore largement du domaine de la recherche.

Plus proche des problèmes techniques de résolution numérique des équations, il y a la distinction entre les modèles numériques qui sont capables de prendre en compte aussi bien les écoulements fluviaux que torrentiels et les modèles numériques valides seulement en régime fluvial.

Applications - exemples

Les principales applications concernent des simulations de plaines d'inondation dans lesquelles il n'y a pas de direction d'écoulement privilégiée identifiée. C'est le cas par exemple des études dans lesquelles on s'intéresse à l'inondation provoquée par la rupture d'une digue (Agly - 34, Cemagref, 2000).



Une autre classe d'applications regroupe celles où l'on a besoin d'une bonne estimation des vitesses horizontales locales. Ce peut être le cas quand a besoin de définir des seuils de dangerosité des écoulements pour les piétons ou les structures bâties (inondations en ville, vitesse d'écoulement sur un parking ou dans un lit majeur urbanisé)

Exemple : reconstitution de l'inondation de Nîmes en 1988, Cemagref 1992.

5. Comment choisir entre une modélisation 1D et une modélisation 2D ?

On peut se demander en quoi le résultat obtenu par la simulation sera erroné si on emploie un modèle 1D à casiers dans une zone sans direction privilégiée ni ligne structurante ? La conservation des volumes sera quand même satisfaite ainsi que celle de la quantité de mouvement, pourvu que le code de calcul résolve correctement les équations qu'il prétend résoudre, ce qu'on supposera ici. En revanche les pentes locales de la ligne d'énergie seront d'autant plus fausses que les directions d'écoulement, fixées a priori par la modélisation 1D, seront erronées. Conséquemment les niveaux seront erronés ainsi que la répartition des débits. Cela sera inévitablement le cas si l'écoulement est instationnaire avec des directions d'écoulement changeantes ; par exemple, dans la zone de confluence de deux rivières qui subissent des crues non concomitantes.

On peut aussi se demander si on pourrait palier le manque d'un modèle 2D en raffinant un modèle 1D à casiers selon l'idée implicite qu'il y aurait convergence du 2ème vers le 1er. Il y a en fait plusieurs arguments contre cette convergence :

Cela dépend si les équations entre casiers sont de simples lois de perte de charge telles que Manning-Strickler ou seuil (on est loin du 2D) ou si on utilise les équations de Saint Venant 1D complètes.

Un casier n'est pas assimilable à une cellule d'un modèle 2D, en particulier dans la méthode des volumes finis, un code 2D évalue les flux de chaque variable transportée (vitesses u et v) à travers les différentes interfaces rectilignes d'une cellule avec ses voisins afin de reconstituer le vecteur vitesse au centre de la cellule. En 1D les différents débits échangés par un casier avec ses voisins, basés sur une analyse des chemins préférentiels de l'écoulement, ne permettent pas de reconstituer un vecteur vitesse au centre du casier.

Les philosophies des deux approches sont différentes ; le découpage en casiers repose sur une analyse des directions privilégiées des écoulements et sur une analyse topographique pour identifier des zones de stockage et évaluer les échanges globaux entre elles ; le maillage 2D s'appuie sur les lignes de structures de la zone d'étude et travaille à une échelle plus fine pour trouver les directions d'écoulements et suivre leurs variations aussi bien en intensité qu'en direction.

D'un autre côté, raffiner le découpage des casiers pour tenter d'approcher une modélisation 2D, signifierait réaliser manuellement la modélisation de chacun des échanges entre casiers, à l'échelle d'un maillage 2D soit avec des casiers d'une taille inférieure à l'hectare (sans oublier la nécessité de réduire encore les cellules selon les contraintes numériques). Ce serait un travail énorme qu'un code de calcul 2D fait beaucoup mieux tout seul.

Il y a essentiellement deux critères qui vont guider le choix entre une modélisation 1D (éventuellement augmentée de casiers) et une modélisation 2D :

les informations ou les variables que l'on a besoin de calculer, certaines étant accessibles au 1D et d'autres ne l'étant pas ;

l'étendue de la couverture des phénomènes à représenter ; par exemple si l'on veut une représentation détaillée du flux entre le lit mineur et les lits majeurs, il sera préférable d'opter pour une modélisation 2D alors que si on s'intéresse seulement à la propagation de l'onde de crue sur un long tronçon, une modélisation 1D bien calée sera suffisante.

5.1. Critère « variables à calculer »

Les possibilités sont nombreuses :

- Débit seulement : modèle simplifié de type onde diffusante ; par exemple pour un outil d'annonce de crue.
- Débit et niveau : Saint-Venant 1D (avec casiers au besoin) ; par exemple pour délimiter une zone inondable.
- Vitesse moyenne et niveau, par exemple pour simuler la dispersion d'un polluant au-delà de la distance de bon mélange : un modèle Saint-Venant 1D est suffisant (voir aussi le critère de couverture des phénomènes)
- Vitesse moyenne en lit mineur mais vitesse ponctuelle dans les zones de débordement car on a besoin d'évaluer la dangerosité du flot : un modèle Saint-Venant 2D est nécessaire.
- Niveaux et direction d'écoulement dans une plaine d'inondation : l'écoulement n'ayant pas de direction privilégiée identifiée, il faut recourir à une modélisation 2D.

5.2. Critère « couverture des phénomènes à représenter »

Ce critère fonctionne en sens inverse du précédent : identifier les phénomènes dont la reproduction doit être correcte pour en déduire les variables à prendre en compte et, par là, le type de modèle à utiliser.

Ainsi l'identification des directions d'écoulement locales dans une plaine d'inondation, sans ligne structurante qui pourrait donner cette information, requiert une modélisation

2D. En effet les directions d'écoulement locales sont fournies par le vecteur vitesse qui ne peut être obtenu que par un modèle au moins 2D.

Inversement, il est inutile d'exiger une modélisation 2D pour un écoulement ayant une direction privilégiée manifeste. Même si le 2D est plus précis, le gain en précision serait négligeable et ne compenserait certainement pas le surcoût nécessaire à la mise au point du modèle (données, maillage, calage, etc.) ni la perte de simplicité dans l'interprétation des résultats.

On ne peut faire ici un catalogue exhaustif des situations dans lesquelles un modèle 2D est requis ou préférable, on peut seulement donner quelques pistes pour inciter le lecteur à poser les bonnes questions. On peut quand même citer :

- Lit en tresse quand la submersion est plutôt faible ; les directions d'écoulements sont alors variables avec le niveau jusqu'à ce que celui-ci noie complètement la structure tressée du lit mineur.
- Comme déjà indiqué, confluent de deux rivières ayant des débits voisins, sans ligne structurante et/ou avec des directions d'écoulement variables.
- Écoulement à direction privilégiée mais pour lequel on doit aussi modéliser la propagation et la dispersion d'un polluant sans qu'on soit certain que la zone où on a besoin des résultats se trouve au-delà de la distance de bon mélange ; dans ce cas la concentration moyenne est loin d'être représentative des concentrations locales, il faut donc une modélisation 2D de la propagation-dispersion du polluant et celle-ci a besoin d'un champ de vitesse 2D. De même dans un lit à méandres, la structure transversale de l'écoulement n'est pas négligeable du point de vue de la dispersion de polluant ; si on a besoin d'évaluer les risques de capture du polluant dans des zones à faibles vitesses, il faudra employer une modélisation 2D.

Dans le même ordre d'idée que précédemment, si la modélisation de l'écoulement doit servir à des études de transport solide ou de sédimentologie, une connaissance détaillée du champ de vitesse peut être nécessaire, ce qui impose un modèle 2D.

6. Modèles détaillés (3D à surface libre)

Ces modèles ne sont évoqués ici que pour mémoire car d'une utilisation très restreinte ; il est cependant utile d'en avoir une connaissance sommaire.

6.1. Principe

Les équations utilisées sont celles de Navier-Stokes. En général on utilise une version « moyennée sur la turbulence » dans laquelle les variables d'état sont définies comme la somme d'une composante macroscopique (« moyenne de Reynolds ») et d'une composante « aléatoire » directement liées à l'agitation turbulente de l'écoulement.

On a donc une équation de conservation de la masse, 3 équations de conservation de la quantité de mouvement. Ces quatre équations concernent les variables de pression, densité et vitesse moyennes. En toute généralité on n'a pas besoin de supposer que le fluide est incompressible.

L'influence des variables turbulentes sur l'écoulement moyen sont modélisées par des équations de fermeture qui consistent à relier ces variables aux paramètres descriptifs de la turbulence (tenseur de Reynolds, énergie turbulente, etc.).

Bien entendu avec les équations de Navier-Stokes il n'y a plus de restrictions sur la direction de l'écoulement ni de contrainte sur la répartition des pressions ; en particulier

ces équations permettent de rendre compte d'écoulements verticaux ou à structure complexe : recirculations verticales, tourbillons, etc.

Contrairement aux équations de Saint-Venant, la surface libre n'est pas une « variable » naturelle des équations de Navier-Stokes. Celle-ci doit être obtenue de façon détournée et coûteuse, voir le § 6.2 suivant.

Contraintes, données nécessaires, précision

Même sans calcul de surface libre, les modèles numériques basés sur les équations de Navier-Stokes sont extrêmement coûteux en ressources informatiques. On est encore très loin de pouvoir réaliser, sur un PC de bureau, une simulation en temps réel même dans un domaine restreint comme un bassin de rétention de 200 m².

Classiquement les données nécessaires sont la géométrie du domaine d'écoulement, des informations sur la rugosité des surfaces pour pouvoir définir les lois de paroi (couche limite) et les conditions aux limites c'est à dire les flux entrant (vitesses ou débits imposés) et les contraintes sur frontières sortantes (en général on y impose des conditions aux limites de sortie libre ou une relation vitesse-pression). Enfin il faut ajouter les forces de volume qui agissent sur l'écoulement : gravité, Coriolis, etc.

6.2. Variantes

Les variantes des équations de Navier-Stokes sont extrêmement nombreuses : modèle de turbulence, couche limite, multiphasique, multi-fluides, thermodynamique, fluides réactifs, etc.

Celles qui nous intéressent ici concernent les écoulements à surface libre et la méthode utilisée pour déterminer celle-ci. On peut considérer la surface libre comme donnée (hypothèse du toit rigide souvent utilisée en océanographie) ou bien revenir à l'hypothèse de pression hydrostatique mais en perdant la possibilité de représenter des vitesses verticales.

Les principales possibilités qui conservent bien le caractère 3D de l'écoulement sont les suivantes :

- la modélisation d'un écoulement stratifié multi-fluide eau + air ;
- le couplage d'un modèle Navier-Stokes sur un domaine fermé avec un modèle Saint-Venant 2D pour calculer la position de la surface libre ; selon la sophistication du couplage on peut s'affranchir de l'hypothèse de pression hydrostatique qui revient en « cachette » avec le modèle de Saint-Venant 2D ; cela suppose en particulier des maillages mobiles ;
- la mise en œuvre d'une méthode de suivi d'interface comme la méthode VOF (volume of fluid).

6.3. Applications - exemples

Dans le domaine environnemental, les modèles basés sur les équations de Navier-Stokes sont surtout utilisés quand on a besoin d'informations tridimensionnelles sur l'écoulement et qu'on ne peut pas négliger son caractère réellement 3D. C'est par exemple le cas quand on veut étudier la dispersion d'un polluant au voisinage immédiat de son point d'injection ou un écoulement local complexe autour d'un ouvrage (épi, vanne, etc.). On pourra encore être amené à construire un tel modèle pour des besoins de trajectographie ou en sédimentologie.

7. Modèles de transport-dispersion de polluant

7.1. Principe

En rivière, la dispersion de polluant se modélise en général par une équation de convection-diffusion qui exprime la conservation de la masse du polluant dans un milieu en mouvement. Il s'agit du même type d'équation que celle utilisée pour le modèle de Hayami, sauf que cette fois la variable transportée est une concentration.

En version 1D la concentration est en fait une concentration moyenne dans la section d'écoulement, 2D il s'agit d'une concentration moyenne sur la verticale et en 3D d'une concentration locale (à l'échelle de la taille des cellules du maillage).

Le modèle de transport-dispersion est donc défini par la vitesse du fluide porteur, par une fonction de dispersion (mathématiquement identique à une diffusion) et des termes sources qui rendent compte des apports de contaminant sous forme de débit massique, de la disparition du contaminant par dégradation par le milieu, absorption, adsorption, photo-dégradation, etc.

Contraintes, données nécessaires, précision

En versions 1D et 2D l'hypothèse principale porte sur la représentativité de la concentration moyenne. En 1D on définit la « distance de bon mélange » au-delà de laquelle on peut considérer que la concentration moyenne est représentative des concentrations locales. L'utilisation d'un modèle de convection-diffusion 1D n'est valide que dans la zone située au-delà de la distance de bon mélange du point d'injection du polluant. En 2D il faut que la concentration moyenne soit représentative de la répartition des concentrations sur une verticale ce qui n'est encore pas le cas à courte distance du point d'injection.

L'hypothèse de bon mélange peut être mise en défaut sur une longue distance, souvent plusieurs kilomètres, pour peu que l'écoulement soit lent ou dans un lit à méandres et que l'injection soit fait sur l'une des berges.

Les données nécessaires sont la vitesse de l'écoulement, les paramètres de la fonction de dispersion (coefficient de diffusion), les apports (conditions aux limites) et, si le polluant n'est pas conservatif, les paramètres des différentes fonctions de dégradation.

Généralement la vitesse moyenne provient d'un modèle hydraulique de type Saint-Venant qui fournit également les paramètres de la fonction de dispersion (formule de diffusion de Fisher par exemple) qui utilise la vitesse et la formulation des frottements utilisée par les équations de Saint-Venant.

Les principales conditions aux limites sont des concentrations imposées en fonction du temps aux points d'entrée. Aux points de sortie on peut imposer une concentration constante (cas de la salinité pour l'embouchure d'un fleuve) ou, dans le cas d'un tronçon de rivière, une sortie libre (dérivée normale nulle).

Cependant il est souvent plus pratique de définir un apport de polluant sous la forme d'un débit massique. Dans ce cas l'apport est représenté par un terme source dans l'équation de convection-diffusion, mais il s'agit alors d'un apport diffus repartit sur une certaine longueur du tronçon considéré. Pour préserver la qualité numérique de la solution, il est préférable de ne pas concentrer de tels apports massiques diffus sur une trop courte distance.

Enfin il ne faut pas oublier une contrainte évidente mais que les codes de calcul qui ont tendance à générer des oscillations, ne satisfont pas toujours : une concentration ne doit jamais être négative.

7.2. Variantes

Les principales variantes jouent sur le nombre de dimensions / variables prises en compte : 2D plan ou 3D.

2D plan

Comme pour Saint-Venant 2D les concentrations sont des moyennes obtenues par intégration sur la verticale de l'écoulement. On peut ainsi modéliser la dispersion d'un polluant sur la largeur de l'écoulement mais sans perdre de vue que l'on suppose l'homogénéité verticale des concentrations. La distance de bon mélange est alors généralement plus courte.

3D

Dans ce cas on revient aux concentrations locales ; la dispersion est alors modélisée à partir des paramètres de la turbulence ce qui suppose une modélisation de l'écoulement à l'aide des équations de Navier-Stokes.

Ce type de modèle très coûteux en ressources informatiques, est plutôt destiné à simuler la dispersion d'un polluant au voisinage immédiat de son point d'injection.

Référence : Hic1998.

7.3. Applications - exemples

Comme application on peut citer :

- l'étude des remontées salines à l'embouchure d'un fleuve ou dans un réseau d'étangs et de canaux côtiers (étangs palavasiens par exemple) ;
- la mise au point d'un simulateur destiné à la protection d'une zone de captage d'eau potable permettant d'anticiper les conséquences d'une pollution accidentelle du réseau de surface alimentant la zone de captage (système ROSALY à Lyon, voir Figure 2)

8. Quel modèle pour quelle application

Après avoir présenté les modèles mathématiques les plus couramment utilisés pour la modélisation des écoulements de surface, nous nous intéresserons dans ce chapitre à la question inverse consistant à se demander quel modèle peut être employé pour rendre compte d'une situation physique donnée.

Dans la plupart des situations qui relèvent de ce guide méthodologique, on utilisera un modèle Saint-Venant 1D (voire 2D) assorti d'une ou plusieurs variantes. En effet les modèles simplifiés, sont d'utilisation plus rare car limitée aux cas où l'on a pas besoin d'information précise sur les niveaux et aux cas où la brièveté d'une simulation est un critère décisif (temps réel, régulation, prévision de crue). Les modèles 3D quant à eux ne peuvent être employés que pour modéliser des écoulements restreints à la fois spatialement et temporellement.

8.1. Quelques questions importantes pour choisir un modèle

Dans ce chapitre on va répertorier quelques questions qu'il est indispensable de se poser pour choisir un modèle adapté aux données disponibles et à la question posée.





1. La zone d'étude est-elle constitué d'un réseau avec confluent et, éventuellement, des défluent nombreux ?




- a) Oui : il faudra utiliser une modélisation 1D, éventuellement avec casiers ; si les confluent/défluent sont peu nombreux, une modélisation 2D est possible.

- b) Non : continuer (pas de choix déterminé à ce niveau).
2. *La zone d'étude est-elle de grande longueur ?*
- a) Oui : il existe donc sans doute une direction privilégiée, on pourra donc utiliser une modélisation 1D.
- b) Non : continuer.
3. *Existe-t-il une direction privilégiée ?*
- a) Oui : une modélisation 1D est possible.
- b) Non : une modélisation 2D est nécessaire ; selon le type de problème à résoudre, une modélisation à casiers peut faire l'affaire.
4. *La pente de la zone d'étude est-elle souvent supérieure à quelques % ?*
- a) Oui : vérifier les conditions d'application du modèle de Saint-Venant ; un modèle simplifié est sans doute préférable.
- b) Non : le modèle de Saint-Venant est sans doute applicable (vérifier) ;
5. *La zone d'étude est grande et le temps de calcul doit être très court :*
- a) Oui : envisager un modèle simplifié ; vérifier cependant la compatibilité de ses limitations avec le problème posé (comment simuler des niveaux avec un modèle simplifié ? Quelle est la précision nécessaire sur les niveaux ?)
- b) Non : continuer.
6. *A-t-on besoin de délimiter une zone inondée ?*
- a) Oui : le modèle doit offrir une bonne estimation des niveaux ; donc plutôt du Saint-Venant qu'un modèle simplifié.
- b) Non : vérifier si on ne peut pas se contenter d'un modèle simplifié.
7. *A-t-on besoin d'estimer correctement des vitesses en direction et module ?*
- a) Oui : il faut un modèle Saint-Venant 2D.
- b) Non : continuer.
8. *A-t-on une direction privilégiée et une structuration du lit majeur par des ouvrages tels que remblais, digues, ... ?*
- a) Oui : utiliser un modèle 1D à casiers et/ou échanges latéraux.
- b) Non : utiliser un modèle 1D standard (lit majeur actif + lit majeur de stockage).
9. *Trouve-t-on sur la zone d'étude des pentes locales assez fortes (> 1%) ?*
- a) Oui : il est probable qu'on trouvera des passages localisés en torrentiel ; si le choix du modèle se porte sur Saint-Venant (1D ou 2D), il faudra que le code de calcul soit capable de prendre en compte ces passages en torrentiel. A défaut, un modèle simplifié peut être suffisant.
- b) Non : continuer.
10. *Est-ce que la dynamique de l'écoulement est incontournable ?*
- a) Oui : le modèle choisi doit être instationnaire (non-permanent, transitoire).
- b) Non : le modèle choisi peut être stationnaire (permanent).

8.2. Quelques situations à problème

On va s'intéresser à quelques situations typiques :

-  marée,
-  rivière sans contrôle aval identifié,
-  débordement par dessus une digue,
-  bourrelet de berge,

-  recoupement de méandre,
-  lit perché,
-  bief contrôlé par un ouvrage de régulation.

Saint-Venant 1D et marée

Il s'agit du cas où le réseau à modéliser s'achève en mer ; il est donc soumis, au moins dans sa partie aval, à l'influence de la marée.

En guise de remarque préliminaire on soulignera qu'il ne faut pas se laisser abuser par la faiblesse de l'amplitude des marées méditerranéennes pour les négliger ; à titre d'illustration on a pu montrer sur une simulation du Rhône que les oscillations du niveau dues à la marée sont visibles jusqu'à Arles, même en cas de crue centennale.

Bien entendu un modèle simplifié comme Muskingum ou Hayami, qui ne connaît pas les hauteurs d'eau sauf quand elles sont liées de façon univoque au débit, ne permet de prendre en compte l'influence de la marée. Il faut donc utiliser un modèle de Saint-Venant instationnaire et lui imposer une condition à la limite aval sous la forme d'une cote imposée fonction du temps (limnigramme $Z(t)$). La condition d'instationnarité est importante puisque le régime permanent n'existe pas à l'échelle d'une marée.

Le modélisateur doit alors résoudre deux problèmes :

- comment construire un tel limnigramme ?
- où faut-il placer l'aval du modèle ?

Le limnigramme peut-être défini par la marée théorique ou bien résulter d'un enregistrement. Avec la marée théorique il est facile de produire un limnigramme pour une période suffisamment longue mais dans ce cas il faut tenir compte des alternances de vives et mortes eaux. L'enregistrement doit, a priori, mieux rendre compte des particularités locales s'il peut être réalisé à proximité de l'embouchure. Cependant il est important de bien s'assurer du synchronisme entre les données d'apports (CL amont et apports latéraux) et la condition à la limite aval. Par ailleurs il faut prendre garde qu'un enregistrement effectué avec un pas de temps trop grand peut conduire à des erreurs d'interpolation fatales pour la stabilité et la qualité du modèle numérique.

Dans les deux cas il peut être opportun de corriger le marégramme pour tenir compte d'une sur-cote (ou sous-cote) due au vent.

Pour le choix du lieu d'implantation de la condition aval il faut tenir compte du fait que, en principe, le marégramme est indépendant des apports du cours d'eau. Il est donc préférable de placer la condition aval suffisamment loin en mer de façon à ne pas surévaluer l'opposition de la mer à la pénétration des eaux douces, en particulier en période de crue. Une méthode simple pour le faire est d'ajouter à l'aval naturel du cours d'eau un tronçon destiné à modéliser le volume maritime influencé par le cours d'eau. Des profils rectangulaires allant en s'élargissant vers l'aval font généralement l'affaire.

Débordement par dessus une digue

Là encore on est dans une situation qui ne relève pas vraiment d'une modélisation 1D puisqu'il y a, localement, un écoulement transversal par dessus une digue.

Le déversement peut être modélisé dans les équations de Saint-Venant comme un débit d'apport/fuite latéral (en m^2/s , cf. terme source de l'équation de continuité) obtenu par une loi de déversoir.

Il est important de bien identifier les régimes d'écoulement sur la digue et, en particulier de déterminer le devenir de l'eau déversée. Si elle peut revenir vers le réseau modélisé, il faut en tenir compte ce qui peut compliquer sensiblement la modélisation. Si c'est de l'eau qui sort du modèle par un déversement dénoyé, la modélisation est simple car il

n'est pas nécessaire de connaître le niveau derrière la digue. Dans les autres cas, cette connaissance est nécessaire et la zone derrière la digue doit être prise en compte dans le modèle, d'une façon ou d'une autre.

Bourrelet de berge

On est dans la situation où plusieurs profils en travers consécutifs présentent la configuration suivante, où le profil présente un bourrelet en rive droite :

Figure 4 : profil en travers avec bourrelet de berge

On se retrouve à peu près dans la situation d'un déversement par-dessus une digue mais avec une hauteur suffisamment faible pour qu'on soit sûr que l'écoulement transversal sera quasiment négligeable. Dans ce cas on va être tenté de définir sans précaution les profils en travers ce qui peut conduire, selon le code de calcul utilisé, à une représentation erronée de la géométrie qui reviendrait à supposer que la limite de débordement vers le lit majeur droit est située au bas du bourrelet de berge (B) et non en haut (A) ; ou que le lit mineur s'élargit brutalement au-dessous de la cote de débordement vers le lit majeur. Cela combiné au possible changement de coefficient de frottement au point de débordement, on peut donc obtenir un diagnostic de débordement erroné associé à une ligne d'eau fausse.

Le problème est donc d'obtenir une définition du débordement à la bonne cote et avec la bonne largeur en tenant compte le mieux possible de la phase de remplissage de la zone derrière le bourrelet de berge, période pendant laquelle les hypothèses des équations de Saint-Venant ne sont pas satisfaites. La difficulté demeure même avec un code de calcul qui est capable d'utiliser une correspondance largeurs – cotes qui ne serait pas biunivoque (une cote - une largeur) puisque la question de la dynamique du remplissage de la zone de stockage derrière le bourrelet de berge, n'est pas une question géométrique.

Une possibilité de contournement en 1D est de définir un profil en comblant la zone de stockage puis d'y connecter un casier pour récupérer son volume.

Recoupement de méandre

Le problème du recoupement de méandre (Photo 4) réside dans le fait que la longueur de l'axe du lit mineur (axe principal d'écoulement avant débordement) est sensiblement plus grande que la longueur de l'axe du lit majeur actif (axe principal d'écoulement après débordement). Du coup il faudrait que les profils en travers utilisés soient différents, en particulier par leur orientation, avant et après débordement.



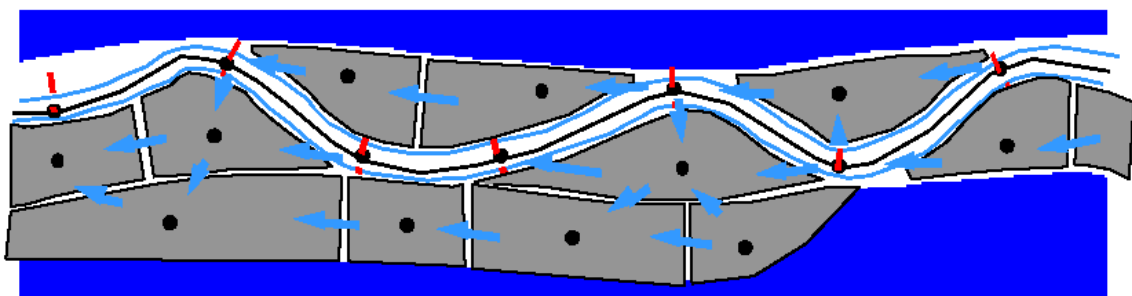
Photo 4 : Moselle - crue 28-05-83 ©SNNE

Il s'agit d'une situation typique où une modélisation 2D serait préférable, en particulier si l'on s'intéresse aux périodes de débordement. Il est clair en effet que, dans ces cas là, des écoulements transversaux importants apparaissent ; on ne peut donc faire l'hypothèse que l'écoulement est horizontal dans la direction perpendiculaire à l'axe principal d'écoulement.

Si on choisit quand même de construire une modélisation essentiellement 1D, on a essentiellement deux possibilités :

- Si l'on s'intéresse à la phase de débordement, il faut identifier les chemins d'écoulement préférentiels et construire un modèle mixte Saint-Venant + casiers. Saint-Venant sera utilisé pour le lit mineur et un ou plusieurs casiers pour le lit majeur (Figure 5). L'identification des cheminements d'eau est cruciale pour pouvoir localiser et configurer correctement les connexions entre le lit mineur et les casiers. En effet contrairement à la modélisation 2D, ici le modélisateur doit savoir a priori quelle sont les directions d'écoulement possibles dans toutes les phases de la simulation.

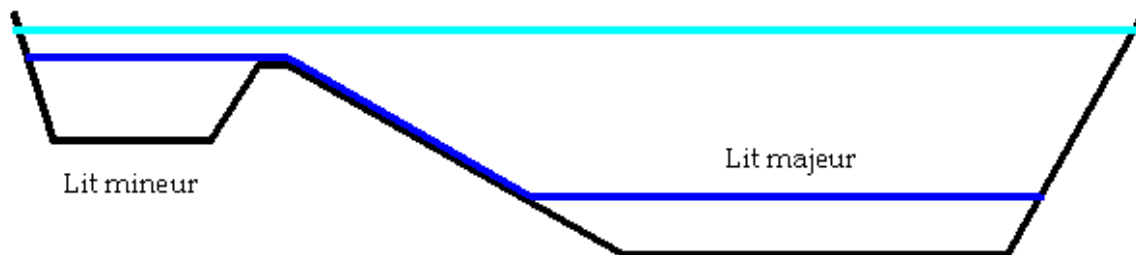
Figure 5 : Lit majeur avec méandre (© Ph Belleudy)



- Si l'on s'intéresse plutôt à la modélisation d'un débordement bien établi et si le volume stocké dans le lit mineur reste faible devant celui du majeur, on peut opter pour une approche 1D intégrale basée sur la direction principale d'écoulement en phase de débordement ; cela revient en quelque sorte à négliger le lit mineur. Il faut éviter toutefois d'en perdre le volume sous peine d'avoir des difficultés à caler le modèle.

Lit perché

Il s'agit de la situation suivante :



dans laquelle le plein bord du lit mineur se trouve au-dessus du lit majeur. La difficulté de modélisation réside dans le changement de comportement de l'écoulement au moment du débordement et au moment où le niveau dans le majeur rejoint celui du mineur.

En début de débordement (ligne bleue), on peut avoir au moins deux cas différents :

- le lit majeur fonctionne comme une cuvette de stockage, c'est à dire qu'il n'a pas vraiment d'exutoire (du moins à l'échelle de temps considérée) ; dans ce cas un modèle à casier est un choix naturel ;
- le lit majeur, quand il est alimenté, se met à couler comme un lit mineur normal et son flot rejoint l'écoulement principal un peu plus en aval ; dans ce cas un modèle avec défluent alimenté par déversement latéral peut être préférable.

Si un grand débordement se produit (ligne turquoise), on revient alors à un écoulement mineur-majeur classique avec direction privilégiée. Dans ce cas une modélisation 1D standard convient ; par contre une modélisation à deux branches séparées risque de mal rendre compte des échanges de volumes quand les niveaux deviennent très proches.

On voit donc que la difficulté de ce cas tient au fait que l'on peut passer d'une situation à l'autre au cours d'un même scénario hydrologique ; il faudrait donc changer de modèle en cours de crue, ce que, en général, les codes de calcul ne savent pas faire. Il faut donc choisir un modèle qui représente bien la situation sur laquelle on veut obtenir des informations, quitte à négliger la précision dans les autres situations.

Bief contrôlé par un ouvrage de régulation

Il y a beaucoup de situations différentes : barrage de navigation, bief de dérivation d'une usine hydroélectrique ou d'un moulin, clapet anti-retour, ... L'introduction de tels ouvrages dans une modélisation est toujours complexe car le modélisateur dispose rarement d'informations exhaustives sur les règles de régulations utilisées. Une méthode souvent employée consiste à remplacer l'ouvrage par une loi de tarage réputée équivalente. Outre que cette approche n'est pas toujours supportée par les codes de

calcul, elle peut être trompeuse ou réductionniste si les scénarios à simuler sortent de la gamme de fonctionnement qui a servi à l'établir. Par exemple dans le cas d'un système destiné à maintenir le niveau amont constant, il faut être vigilant si on impose au code de calcul un niveau effectivement constant. En effet dans la réalité le niveau subit de petites variations dont il faut tenir compte dans une modélisation instationnaire sous peine d'instabilité numérique et d'erreur sur la conservation de la masse d'eau. Par ailleurs cette contrainte de niveau constant ne tient pas compte de la défaillance possible du système et du moment où il cessera de chercher à maintenir le niveau amont constant, ce qui arrive souvent en crue.

Autrement dit, il est préférable de simuler le dispositif de régulation lui-même ou du moins son effet sur la ligne d'eau. Pour cela il faut ajouter au modèle utilisé, en général les équations de Saint-Venant, des modèles d'ouvrages réglables en fonctions des paramètres de l'écoulement. On peut alors avoir à caler des paramètres supplémentaires, comme les paramètres d'un régulateur proportionnel servant à modéliser un barrage ou une vanne à niveau amont constant. Ce qui suppose d'acquérir des données permettant de le faire ...

9. Bibliographie

Cunge J.A. (1969). On the subject of flood propagation method (Muskingum method). *J. Hydraulic Research* 7 n°2.

Faure J-B. , **Buil N.** (1998). 3D simulation of pollutant dispersion in rivers. *Proceedings of the Third International Conference on Hydroinformatics, 24-26/08/1998, Copenhagen.*

Faure J-B. , **Buil N.** (2004). 3-D Modeling of unsteady free-surface flow in open channel. *Journal of Hydraulic Research* (à paraître).

Belleudy Ph. (2003). <http://www.lthe.hmg.inpg.fr/~belleudy/ens.htm> Cours de l'université de Grenoble.

Simon L. (1995). Contribution à la modélisation numérique du transport de polluant en rivière. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Goutx (2002). Hydraulique des cours d'eau. Cetmef (http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/projets/hydraulique/clubcourseau/pdf/publicis/stage_module1.pdf).

Chow, V. T. (1973). *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, London, U.K., international edition.

Barnes, H. H. (1967). *Roughness Characteristics of Natural Channels*. Water Supply Report 1849, United States Geo-logical Survey.

Nolan, M. K., Frey, C., & Jacobson, J. (1998). *Verified Roughness Characteristics of Natural Channels (in Surface-water Field Techniques Training Class - Version 1.0)*. Water Resources Investigations Report 98-4252, United States Geological Survey.

Hicks, D. M. & Mason, P. D. (1998). *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers*. National Institute of Water and Atmospheric Research – Water Resources Publications, LLC, Englewood, Colorado.

10. Annexes

10.1. Définitions de base de l'hydraulique à surface libre

Les définitions de base de l'hydraulique à surface libre peuvent être trouvées dans n'importe quel bon manuel ou support de cours. Nous ne donnerons ici que quelques rappels sur les notions évoquées dans le corps du texte.

$$\text{Charge spécifique (par unité de poids)} : H = Z_F + h + \frac{V^2}{2g}$$

$$\text{Conservation de l'énergie (Bernouilli)} : Z_{Famont} + h_{amont} + \frac{V^2}{2g} = Z_{Faval} + h_{aval} + \frac{V^2}{2g} + \Delta H$$

Certains paramètres locaux, caractéristiques géométriques, ou caractéristiques de l'écoulement déterminent la relation entre la hauteur d'eau et le débit; et la capacité d'une rivière à évacuer un débit donné.

La vitesse : la répartition de la vitesse n'est pas uniforme dans la section; cette propriété provient des effets de viscosité et de turbulence. Au voisinage immédiat de la paroi, la vitesse est nulle. On définit la vitesse moyenne (mérite d'y revenir plus tard). Et bien entendu, pour une vitesse moyenne donnée, le débit est d'autant plus grand que la section mouillée est importante (la vitesse moyenne est le rapport du débit à la section mouillée).

La pente : la pente du fond détermine le terme moteur (la composante tangentielle du poids); la pente de la surface libre caractérise la perte d'énergie potentielle, la pente de la ligne d'énergie caractérise la perte d'énergie totale. La force de frottement (donc la perte de charge(ou d'énergie)) est proportionnelle au carré de la vitesse moyenne de l'écoulement □□la vitesse est proportionnelle à la racine carrée de la pente de la ligne d'énergie.

Le frottement contre les parois (le fond de la rivière et les berges...) est d'autant plus importante que la surface de contact est irrégulière. Nous appellerons cette propriété la rugosité. Le frottement est proportionnel à la surface de contact, par unité de longueur au « périmètre mouillé ». Pour traduire l'éloignement moyen de cette paroi à l'écoulement moyen, on définit le rayon hydraulique.

$$\text{Formule de Chézy} : Q = C_h A \sqrt{R_h S}$$

$$\text{Formule de Manning-Strickler} : Q = k_{str} A R_h^{2/3} \sqrt{S}$$

Il existe des relations qui expriment la perte de charge dans les conduites (par exemple Colebrook). Sur ces mêmes considérations dimensionnelles, et en donnant une expression à la force de frottement, Chézy a donné très tôt une expression de la relation entre le débit et la pente Cette relation est actuellement utilisée surtout dans le domaine côtier. En hydraulique fluviale, c'est la relation de Manning-Strickler qui est la plus populaire.

Quelle valeur donner au coefficient de rugosité ?

1. Ce doit être une constante de la section donnée. Sinon on n'a pas de « modèle » qui permette de calculer $h(Q)$. On remarque que si Ch est indépendant de h , alors k_{str} ne l'est pas...
2. Cette formulation intègre en fait l'ensemble des pertes de charges « régulières » : rugosité sur le fond (dépend de la taille des éléments de rugosité), rugosité de forme (des dunes par exemple qui créent des macro-rugosités), joints sur un canal, épis rapprochés dans une vision unidimensionnelle, méandrement, etc.)
3. Dans les modèles la rugosité est un élément de calage qui est ajusté à partir de valeurs de couples (Q,h) connus.

Sur la base de la formule de Strickler, on peut ajuster une valeur de coefficient de rugosité pour le canal à partir des mesures réalisées.

La débitance caractérise la propriété d'une section à transporter un écoulement, indépendamment des autres caractéristiques de la rivière : sections voisines, pente, ouvrages éventuels.

Plusieurs méthodes ont été élaborées par les ingénieurs pour évaluer la débitance d'un lit composé. Ces méthodes s'appuient implicitement sur l'hypothèse d'unidimensionalité qui considère que le niveau de la surface libre est uniforme dans la section en travers.

Einstein a proposé un calcul d'un coefficient de rugosité équivalent, mais les conditions d'applications sont très restreintes.

Les autres méthodes ajoutent les débitances respectives calculées au-dessus de chacune des sous-sections du lit.

On considère alors en général que ces différentes sous-sections sont indépendantes. La débitance totale est la somme des débitances de chaque sous-section (éventuellement en considérant des rugosités différentes).

Une amélioration est proposée par le calcul « Debord » mis au point à partir d'essais de laboratoire. Le calcul « Debord » demande cependant de l'utilisateur une expertise certaine.

Ces méthodes, associées à l'expérience du modélisateur, donnent des résultats satisfaisants dans le cas où l'on recherche une vision « unidimensionnelle » de l'écoulement. Par contre, on devra être très prudent dans l'interprétation des résultats détaillés, par exemple dans le cas où l'on cherche à déterminer les conditions précises d'écoulement dans chacune des sous-sections.

10.2. Quelques valeurs typiques du coefficient de Strickler

Extrait de la publication "Diagnostic, aménagement et gestion des rivières : hydraulique et morphologie fluviales appliquées" de Gérard Degoutte en 2006, on peut citer les valeurs de coefficient de Strickler typiques suivantes :

Nature des parois	Valeur de K en m ^{1/3} /s
Béton lisse	75
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Dans le cas d'un chenal dont le fond et les berges sont en graviers, des formules empiriques ont pu être établies :

- formule de Strickler : $K = 21 / d_{50}^{1/6}$
- formule de Meyer-Peter et Müller : $K = 26 / d_{90}^{1/6}$
- formule de Raudkivi : $K = 24 / d_{65}^{1/6}$

Dans ces formules, K est exprimé en m^{1/3}/s et dn désigne le diamètre (en mètres) des grains du lit tel que n% en poids aient un diamètre inférieur à dn. d90 représente donc les grains les plus gros ou presque ; d50 est le diamètre médian, couramment appelé aussi diamètre moyen par confusion.

Nous recommandons l'emploi de la formule de Strickler lorsque la granulométrie est étroite et celle de Meyer-Peter et Müller lorsqu'elle est étalée.

Le coefficient de rugosité du lit d'une rivière varie en fait en fonction du tirant d'eau, donc d'une certaine façon, en fonction du débit. Il y a au moins trois raisons à cela :

- la rugosité du fond et celle des berges ne sont généralement pas identiques (matériaux plus fins, présence de végétation ou de protection) ;
- le lit majeur, s'il existe, a généralement une rugosité différente de celle du lit mineur à cause, en particulier de la végétation qui peut l'occuper ;
- la rugosité du fond varie selon que le fond est plat ou bien constitué de dunes.

Par exemple, sur la Loire moyenne, le diamètre moyen des matériaux du fond est souvent assez proche de 1 mm. La formule ci-dessus conduirait pour le fond à K = 66 environ, alors que le coefficient de rugosité du lit mineur vaut 30 à 35. Autrement dit il ne faut pas perdre de vue que la rugosité du lit ne dépend pas seulement de la simple granulométrie, mais intègre aussi des informations sur la résistance à l'écoulement due à la forme du lit et à son encombrement.

10.3. Équations de Barré de Saint-Venant

Formulation complète en 1D

$$\text{Equation de continuité: } \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q = q_{\text{apports}} - \frac{\partial S_{\text{majeur}}}{\partial t} + q_{\text{déversements}}$$

$$\text{Equation dynamique: } \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial Z}{\partial x} = -gS(J + J_s) + kqV$$

+ Conditions Initiales et Conditions aux Limites

avec t : temps

x : abscisse en long

S : section mouillée

Q : débit

Z : cote de la surface libre

V : vitesse moyenne ($V = Q/S$)

β : coefficient de quantité de mouvement

g : gravité

J : pertes de charge linéaires par frottement

J_s : pertes de charge singulières : élargissement ou rétrécissement brusques

q : pertes ou apports latéraux (en m^2/s) (ruissellement, pluie, déversements, échanges avec le lit majeur), $k=1$ si $q < 0$, $k=0$ sinon

Principales méthodes de résolution

Il y a deux grandes catégories de méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations de Saint-Venant :

- les méthodes basées sur des schémas numériques (discrétisations) explicites, dans lesquelles les variables d'état au temps $t+dt$ sont exprimées explicitement en fonction des mêmes variables au pas de temps t précédent ;
- les méthodes basées sur des schémas numériques implicites, dans lesquelles les variables d'état au temps $t+dt$ sont liées aux mêmes variables au pas de temps t précédent par l'intermédiaire d'une équation (linéaire ou non, non-linéaire dans le cas de Saint-Venant) qu'il faut résoudre avec une méthode adaptée.

En général les schémas explicites sont contraints par des critères de stabilité qui conduisent à imposer des petits pas de temps (condition de Courant-Friedrichs-Lévy, CFL) alors que les schémas implicites permettent le plus souvent de s'en affranchir (schémas dits « inconditionnellement » stables).

En pratique les méthodes implicites sont plus lourdes à programmer et plus coûteuses à chaque pas de temps que les méthodes explicites, mais comme elles demandent moins de pas de temps, elles sont globalement sensiblement plus économiques.

Le choix final du pas de temps ne dépend pas seulement des critères de stabilité et convergence des méthodes numériques utilisées, il faut aussi tenir compte de la dynamique des phénomènes à capturer. Ainsi des variations rapides de niveau ou de débit devront être simulées avec un pas de temps suffisamment court. En gros on peut dire que pour simuler correctement un phénomène il faut que le pas de temps soit au moins 5 fois plus court que sa durée caractéristique.

Au final on peut facilement avoir un rapport de 1 à 100 entre le pas de temps utilisé avec un schéma explicite et celui qui sera utilisé avec un schéma implicite.

On peut aussi distinguer les méthodes numériques adaptées à la simulation du régime torrentiel de celles qui ne le sont pas. Souvent les schémas numériques explicites sont développés pour permettre la simulation des écoulements torrentiels qui sont par nature des écoulements rapides. Les schémas numériques implicites comme le célèbre schéma de Preissmann ne sont pas adaptés, sauf modification, pour la simulation des écoulements torrentiels.

10.4. Équation de l'onde diffusante

L'équation de l'onde diffusante est une simplification des équations de Saint-Venant, obtenue en supposant qu'il n'y a pas d'apports ou pertes latéraux (pas d'échange avec

la nappe en particulier) et que les termes d'inertie $\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial t}$ sont négligeables devant les termes de pression $gS \frac{\partial Z}{\partial x}$. On obtient alors, en éliminant la cote Z , une équation de convection-diffusion non-linéaire sur le débit :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + C(Q, Z, x) \frac{\partial Q}{\partial x} + D(Q, Z, x) \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2} = 0$$

où C est la célérité et D la diffusion. Ces coefficients s'expriment en fonction de la perte de charge linéaire J et de la largeur au miroir L :

$$C(Q, Z, x) = \frac{1}{L^2} \frac{\partial J}{\partial Q} \left[\frac{\partial L}{\partial x} - \frac{\partial(LJ)}{\partial Z} \right] \text{ et } D(Q, Z, x) = \frac{1}{L} \frac{\partial J}{\partial Q}$$

Si on peut supposer la géométrie uniforme et si on considère que l'écoulement ne s'éloigne pas trop du régime uniforme, alors on peut obtenir des expressions analytiques de ces coefficients.

La méthode classique de résolution de l'équation de l'onde diffusante est d'utiliser le schéma aux différences finies à trois points de Crank-Nicholson. Il faut alors fournir une condition à la limite à l'amont et à l'aval. A l'amont on impose tout naturellement le débit d'apport et à l'aval on peut prendre une condition de flux libre ($\partial Q / \partial x = 0$).

Si on dispose d'expressions analytiques pour les coefficients C et D (équation d'Hayami par exemple). Une alternative consiste à résoudre l'équation de l'onde cinématique avec le schéma de Muskingum-Cunge (Cunge, 1969) et à contrôler le paramètre θ d'« implicitation » pour reproduire la diffusion physique. En effet Cunge a montré que la méthode de Muskingum utilisée pour résoudre l'équation de l'onde cinématique (donc sans diffusion) est équivalente à l'utilisation d'un schéma numérique qui introduit une diffusion artificielle.

10.5. Équation de convection-diffusion pour la dispersion de polluant

On peut distinguer deux formulations de l'équation de convection-diffusion, la forme conservative et la forme non-conservative. La première exprime directement la conservation de la masse du polluant dans un fluide en mouvement. La seconde est, à proprement parler, l'équation de convection-diffusion de la concentration du polluant.

$$\text{Forme conservative: } \frac{\partial(SC)}{\partial t} + \frac{\partial(QC)}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(DS \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -K.S.C$$

$$\text{Forme non conservative: } \frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{1}{S} \frac{\partial}{\partial x} \left(DS \frac{\partial C}{\partial x} \right) = - \left(K + \frac{Q}{S} \right) C$$

où C est la concentration, Q le débit, S la section mouillée, U la vitesse moyenne ($U=Q/S$) et K le coefficient de disparition cinétique (qui vaut 0 si le polluant est conservatif). On peut bien sûr remplacer le terme source par une loi de comportement plus complexe ou y ajouter un terme d'apport sous la forme d'un débit massique.

Les méthodes numériques utilisées pour résoudre cette équation sont très variées. Elles reposent en général sur un schéma de discrétisation aux différences finies. Les méthodes les plus sophistiquées utilisent des méthodes différentes pour traiter les termes de convection (hyperbolique donc capable de faire apparaître des discontinuités) et de diffusion (qui a donc un effet régularisant).

Des travaux ont été conduits pour prendre en compte le moins mal possibles les zones d'eaux mortes ou fortement ralenties (L. Simon, 1995). De même les termes sources qui présentent des variations brutales sont délicats à modéliser.

10.6. Equations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes se déclinent sous de multiples formes ; on les trouvera dans n'importe quel cours de mécanique des fluides.

Par exemple dans une formulation en moyenne de Reynolds avec un modèle de turbulence k-ε, on peut écrire :

$$\text{Conservation de la masse: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0$$

Conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_\tau \right) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] = \frac{\partial P}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial(\rho k)}{\partial x_i} + \rho g_i$$

$$\text{énergie cinétique turbulente } k: \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j k) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = S_k$$

$$\text{Taux de dissipation turbulente } \varepsilon: \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \varepsilon) - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = S_\varepsilon$$

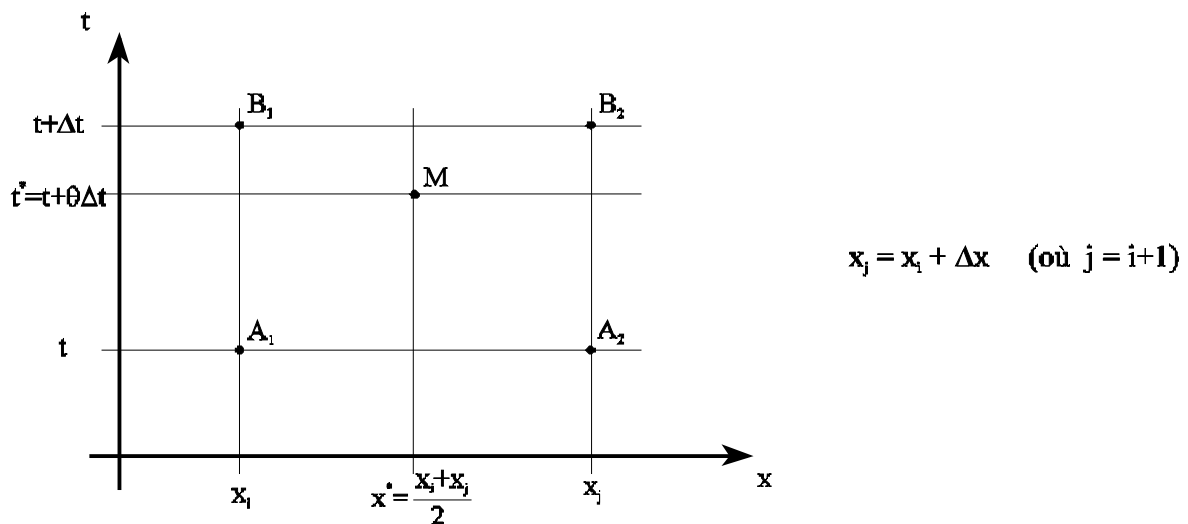
ρ est la densité, P la pression, U le vecteur vitesse (moyenne de Reynolds), μ et μ_τ sont les diffusions moléculaires et turbulentes, S_k et S_ε sont les nombres de Prandtl associés à k et ε.

Des variantes multiphasiques ou multi-fluides existent (pour les problèmes à surface libre par exemple) ; on peut aussi ajouter, une équation de conservation de l'énergie si la thermodynamique entre en jeu, des équations de transports avec termes sources prenant en compte les réactions chimiques ; enfin on peut ajouter des modèles de transferts radiatifs.

Les principales méthodes de résolution sont basés sur les méthodes de volumes finis, ou d'éléments finis plus des algorithmes spécifiques pour résoudre les non-linéarités et autres couplages (vitesse-pression en particulier : dans l'exemple ci-dessus on a 6 équations et 7 variables). Elles mettent en jeu des ressources informatiques considérables. Une part importante du travail de modélisation consiste à définir le maillage, découpage en « cellules » dans le cas des volumes finis et découpage en « éléments » dans le cas des éléments finis. Ensuite il faut définir la physique du problème (les équations et leurs termes sources, gravité, force de Coriolis, ...), le modèle de turbulence si nécessaire et les conditions aux limites.

10.7. Quelques exemples de schémas numériques

Schéma de Preissmann



De manière à approcher les termes φ , $\frac{\partial \varphi}{\partial x}$ et $\frac{\partial \varphi}{\partial t}$ représentés dans les équations de Saint-Venant, on introduit les notations suivantes :

$$\varphi_k = \varphi(x_k, t)$$

$$\Delta \varphi_k = \varphi(x_k, t + \Delta t) - \varphi(x_k, t)$$

Pour des raisons pratiques (simplification des écritures, mise en œuvre informatique et comportement numérique) on écrira les équations discrètes en fonction des variations $\Delta \varphi$ sur un pas de temps Δt et non en fonction des valeurs $\varphi(t + \Delta t)$ à la fin du pas de temps.

L'approximation d'une fonction φ au point M s'écrit :

$$\varphi \left(x_{k+\frac{1}{2}}, t + \theta \Delta t \right) = \frac{\varphi_k + \varphi_{k+1}}{2} + \theta \frac{\Delta \varphi_k + \Delta \varphi_{k+1}}{2}$$

L'approximation de $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ au point M est donnée par :

$$\frac{\partial \phi}{\partial x}(x_{k+\frac{1}{2}}, t+\theta \Delta t) = \frac{\phi_{k+1} - \phi_k}{\Delta x} + \theta \frac{\Delta \phi_{k+1} - \Delta \phi_k}{\Delta x}$$

et celle de $\frac{\partial \phi}{\partial t}$ par :

$$\frac{\partial \phi}{\partial t}(x_{k+\frac{1}{2}}, t+\theta \Delta t) = \frac{\Delta \phi_k + \Delta \phi_{k+1}}{2 \Delta t}$$

Schéma décentré amont pour l'équation de convection-diffusion

Le schéma explicite aux différences finies est le plus simple à mettre en oeuvre. Il revient à assimiler les dérivées partielles à des différences finies ou encore à faire un bilan de masse à chaque pas de temps pour chaque tronçon de longueur égale au pas d'espace de la discrétisation en considérant la concentration uniforme sur ce domaine.

$$\begin{aligned} C_i^{n+1} S_i^{n+1} \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{2} \right] &= C_i^n S_i^n \left[\frac{x_{i+1} - x_i}{2} \right] + Q_{i-\frac{1}{2}}^n A dt - Q_{i+\frac{1}{2}}^n B dt && \text{transport} \\ &+ S_{i+\frac{1}{2}}^n D_{i+\frac{1}{2}}^n \left[\frac{C_{i+1}^n - C_i^n}{x_{i+1} - x_i} \right] dt - S_{i-\frac{1}{2}}^n D_{i-\frac{1}{2}}^n \left[\frac{C_i^n - C_{i-1}^n}{x_i - x_{i-1}} \right] dt && \text{diffusion} \\ &+ S_i^n K_i \left[\frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2} \right] C_i^n dt && \text{cinétique} \end{aligned}$$

avec :

$$A = \begin{cases} C_{i-1}^n & \text{si } Q_{i-\frac{1}{2}}^n > 0 \\ C_i^n & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{et} \quad B = \begin{cases} C_i^n & \text{si } Q_{i+\frac{1}{2}}^n > 0 \\ C_{i+1}^n & \text{sinon} \end{cases}$$

Les termes A et B permettent de tenir compte d'une éventuelle inversion du sens de l'écoulement.

On remarquera que dans l'équation écrite précédemment, la discrétisation du terme de transport fait apparaître un décentrage des concentrations par rapport à la valeur i. Cette particularité caractérise le type de discrétisation utilisée.

Ce schéma, simple de mise en oeuvre, comporte de strictes conditions de stabilité.

Annexe 5

Bathymétrie et Topographie

Table

i. Pour modéliser la forme de la terre : ellipsoïdes et géoïdes	2
ii. Projections pour obtenir des représentations planes.....	4
iii. Pour se repérer : les coordonnées liées à un système de projection	5
iv. Les repères indépendants du globe et des projections : les repères cartésiens	5
v. Qu'est-ce qu'un datum ?	6
vi. Nivellement	6
vii. Réseau géodésique.....	7
viii. levés aériens.....	8
ix. Levés Lidar.....	9
x. levés terrestres.....	12
xi. Le Référentiel à Grande Echelle (RGE®): référentiel national de précision métrique.	14

i. Pour modéliser la forme de la terre : ellipsoïdes et géoïdes

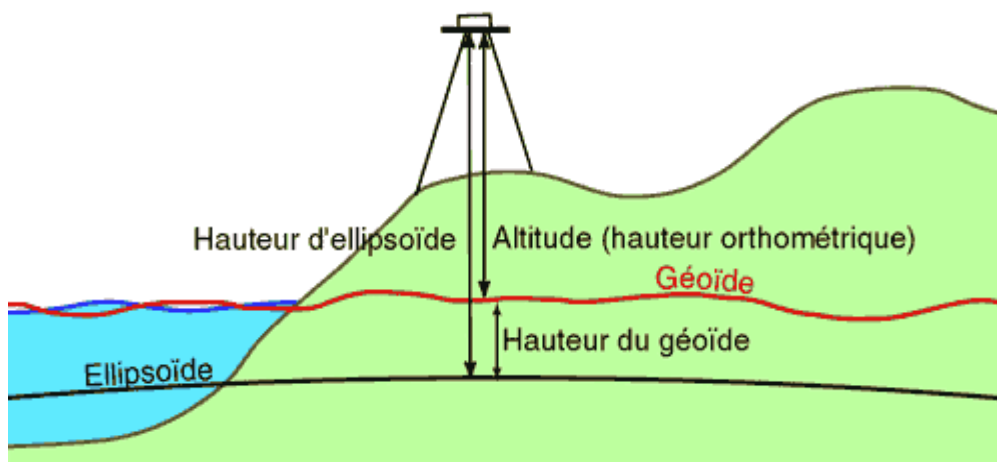
Pour effectuer des mesures topographiques ou bathymétriques sur la Terre, il est indispensable de la représenter au préalable. La Terre peut être figurée de 3 manières par :

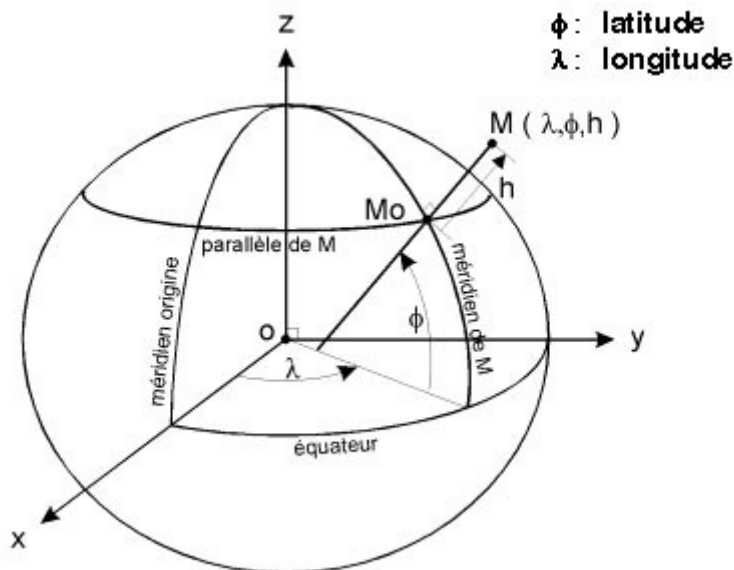
- 📖 Une sphère.
- 📖 Un ellipsoïde. La Terre étant un peu aplatie aux pôles et renflée à l'équateur, un ellipsoïde de révolution est un modèle plus fidèle qu'une sphère. La différence entre les rayons aux pôles et à l'équateur est d'une vingtaine de kilomètres.
- 📖 Un géoïde. Le géoïde est une surface qui correspond à l'altitude zéro. C'est une surface très irrégulière et bosselée qui reflète les variations de gravité de la Terre. Les écarts peuvent être de quelques dizaines de mètres par rapport à un ellipsoïde. Ce géoïde n'est pas la surface topographique de la Terre, mais un niveau de référence. C'est une surface équipotentielle de pesanteur qui correspond au niveau des océans s'ils étaient au repos (ni vagues, ni marées, ni courants) et s'ils n'étaient déformés ni par les différences de pression atmosphérique, ni par les différences de densité de l'eau. Il n'est pas défini par une fonction mathématique comme l'ellipsoïde, mais observé point par point.

Vue de l'espace, la terre ressemble à une sphère légèrement aplatie aux pôles. Cette forme, est la forme d'équilibre d'un corps fluide en rotation autour d'un axe. À cause des variations de densité à l'intérieur de la Terre, le géoïde n'est pas exactement une sphère aplatie.

Pour se positionner sur la terre, on a utilisé des modèles mathématiques permettant de représenter la forme de la Terre de façon simplifiée : des ellipsoïdes.

Les systèmes de positionnement couramment utilisés s'appuient donc sur un ellipsoïde de référence et sur un repère qui permet de trouver sa position sur l'ellipsoïde en latitude et longitude. L'écart entre le point à positionner et l'ellipsoïde définit la hauteur ellipsoïdale. L'altitude est par contre la distance entre le point à positionner et le géoïde.





ϕ : latitude
 λ : longitude

La lettre grecque λ désigne la longitude

La lettre grecque Φ désigne la latitude

La lettre h correspond à la hauteur ellipsoïdale (à ne pas confondre avec l'altitude). Elle est définie dans un système de référence géodésique et peut différer de l'altitude de plusieurs dizaines de mètres.

Les coordonnées liées au globe terrestre sont la latitude et la longitude. La latitude d'un lieu est l'angle entre la verticale en ce lieu et le plan de l'équateur. La longitude est l'angle entre le plan méridien passant par la verticale et le plan méridien passant par la verticale d'un lieu de référence (ex : Greenwich). Ces définitions simples se compliquent quand il s'agit de trouver la verticale d'un lieu.

Est-ce le rayon terrestre qui passe par le lieu ? On utilise alors un modèle sphérique pour la terre.

Est-ce la perpendiculaire à un ellipsoïde de référence ? On utilise un modèle ellipsoïdal et on précise lequel.

Est-ce la verticale observée ? On se base sur le géoïde.

Toutes ces verticales sont un peu différentes, et un même lieu a des coordonnées géographiques (latitude et longitude) différentes selon la façon dont on approxime la forme de la Terre.

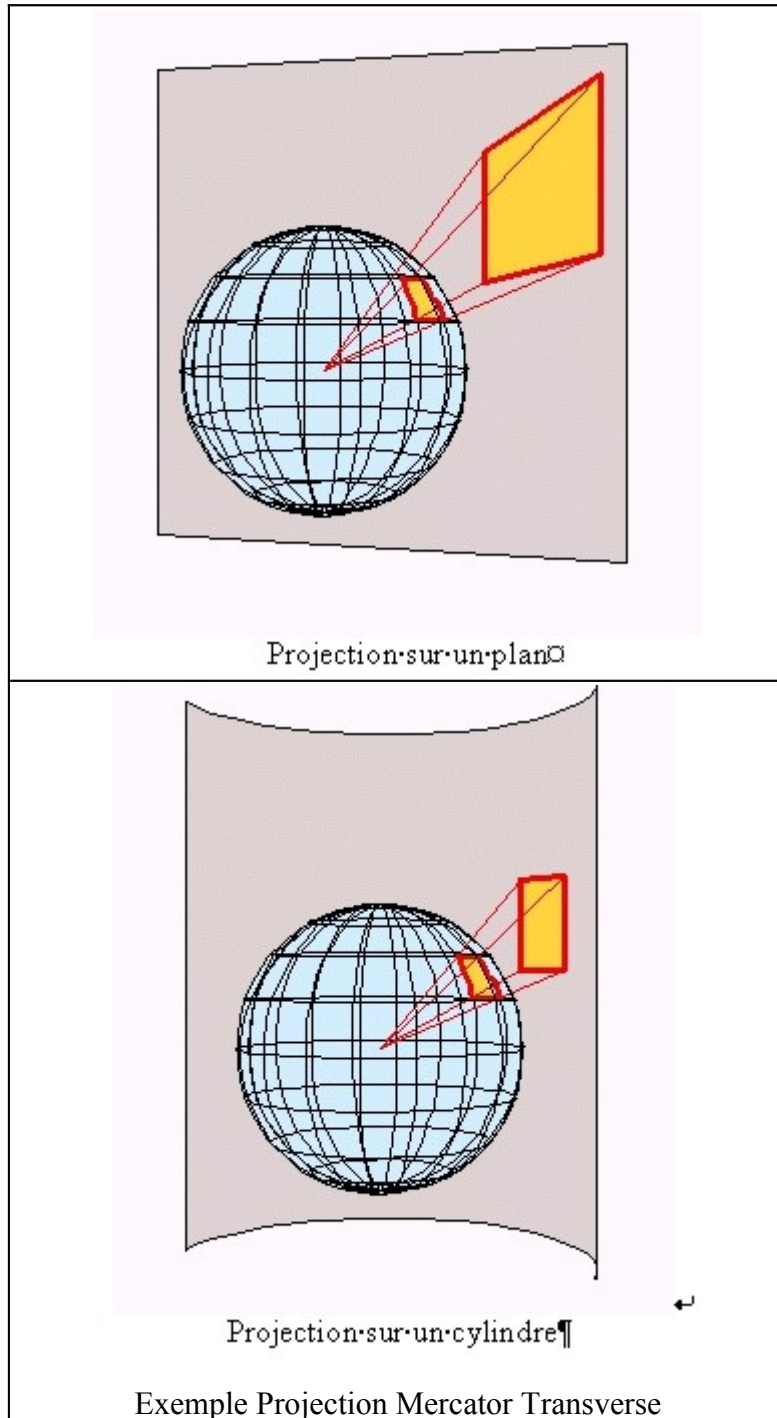
Par contre les mêmes coordonnées correspondent à plusieurs lieux différents selon le système dans lequel elles sont exprimées.

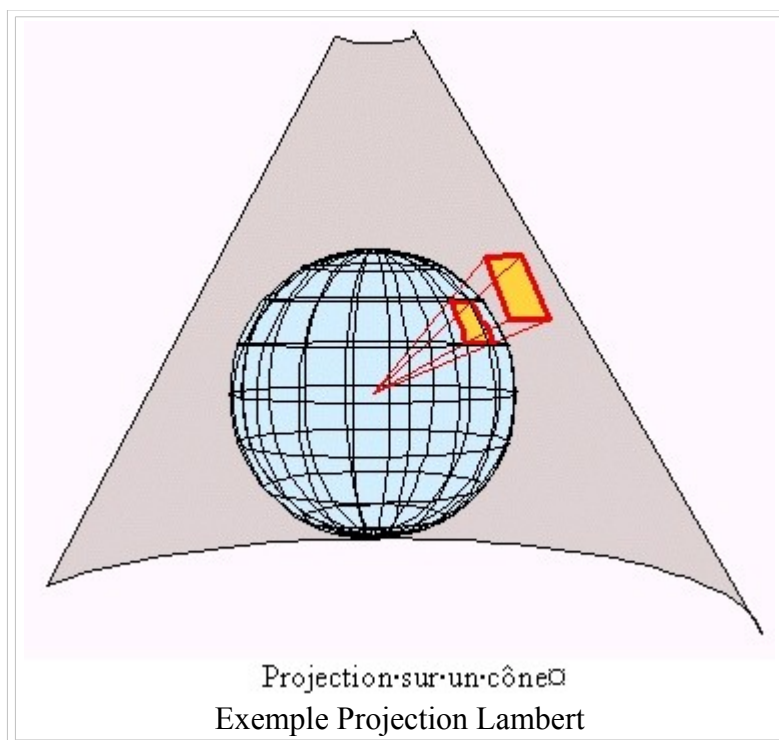
A l'échelle de la Terre, la différence est minime, mais sur le terrain, plusieurs centaines de mètres méritent d'être pris en considération.

D'autres différences plus triviales peuvent exister entre systèmes de coordonnées géographiques : comme le point de référence (Paris ou Greenwich, par exemple), ou l'unité d'angle employée (degrés ou grades).

ii. Projections pour obtenir des représentations planes

Pour représenter la surface de la Terre sur une carte plane, le principe de base est de projeter les objets à représenter sur un plan, ou sur une surface développable : cylindre ou cône. (une surface développable est une surface que l'on peut mettre à plat sans l'étirer).





Sur les schémas ci-dessus, chaque point est projeté suivant une ligne droite partant du centre du globe. En réalité, pour minimiser les distorsions, les projections employées sont plus complexes.

iii. Pour se repérer : les coordonnées liées à un système de projection

A la base, il s'agit du quadrillage régulier d'une carte construite selon un système de projection donné. Par exemple :

- 📖 des coordonnées Lambert sont des X,Y mesurés en mètres, en tenant compte de l'échelle, sur une carte en projection Lambert (une projection conique),
- 📖 des coordonnées UTM sont des X,Y mesurés en mètres sur une carte en projection Mercator Transverse (une projection cylindrique sur un cylindre d'axe perpendiculaire à l'axe de rotation terrestre).

Toutes les projections induisent des déformations. Ces quadrillages ne représentent donc pas exactement des mètres sur le terrain, mais en sont très proches. Par exemple, une différence de 1000 en coordonnées UTM traduira une distance variant entre 999.60 et 1000.97 mètres selon le point où l'on est.

Les axes de coordonnées ne sont généralement pas orientés exactement nord-sud / est-ouest sur toute l'étendue de la projection. Par exemple, à Ouessant l'axe des Y des coordonnées "Lambert II étendu" est incliné de 5° 28' vers l'ouest, à Paris il est parfaitement sud-nord, et à Aléria il est incliné de 5° 16' vers l'est.

A noter que sur une carte peuvent figurer d'autres repères de coordonnées que celui qui est dérivé du système de projection utilisé. Ainsi sur les cartes au 1/25 000 de l'IGN, en projection Lambert, on trouve les repères Lambert, UTM, géographiques international et français. Seul le quadrillage Lambert est parfaitement régulier, mais les autres repères sont néanmoins utilisables.

iv. Les repères indépendants du globe et des projections : les repères cartésiens

Ce sont des repères orthonormés. Leur origine est le centre de gravité de la Terre. Les trois axes sont : l'axe des X dans le plan de l'équateur et dans le plan d'un méridien de référence, l'axe des Y lui aussi

dans le plan de l'équateur et perpendiculaire à l'axe des X et l'axe des Z perpendiculaire aux axes OX et OY et passant, à peu près, par le pôle Nord.






Les avantages de ces repères sont qu'ils sont simples à définir et que les calculs y sont beaucoup plus faciles, donc plus rapides ou, à puissance égale, plus exacts.

Leur gros inconvénient, c'est qu'ils sont à peu près inutilisables sur le terrain ou sur une carte. Ils sont donc cantonnés à des utilisations peu visibles de l'utilisateur : changement de repère, calcul de trajectoire de satellite, représentation 3D de la Terre ou d'autres corps célestes. Les GPS, par exemple, affichent les coordonnées dans n'importe quel système, les mémorisent en WGS84 (un système de coordonnées géographiques), mais font tous les calculs de positionnement en coordonnées cartésiennes.





v. Qu'est-ce qu'un datum ?

De ce qui précède, on déduit aisément que pour définir la position d'un lieu, il ne suffit pas de donner ses coordonnées x et y , ni sa latitude et sa longitude, ni de dessiner un point sur une carte quelconque ; Il faut aussi que soient précisés les modèles, les projections, les systèmes de coordonnées utilisés. Un datum (ou système géodésique) c'est un jeu cohérent de tout ces paramètres.





Il pourra comprendre :

-  Un ellipsoïde de référence.
-  Un géoïde (qui sert souvent seulement de référence pour les altitudes).
-  Un système de projection pour les cartes.
-  Un système de coordonnées.
-  Des principes de calcul, y compris les approximations à faire.






WGS84 :

-  Ellipsoïde de référence : GRS80 ou WGS84 (très proches, moins d'un mm de différence) grand axe : 6 378 137.000 m, petit axe : 6 356 752.314 m.
-  Géoïde, utilisé pour les altitudes : WGS-84 Geoid Heights, défini par pas de 0.25 degrés par la NIMA (US National Imagery and Mapping Agency)
-  Coordonnées géographiques : en degrés, méridien de référence : Greenwich
-  Projections et coordonnées associées :
 - UTM (Universal Transvers Mercator) entre les latitudes 80° sud et 84° nord.
 - UPS (Universal Polar Stereographic) pour les pôles.

ED50 :

-  Ellipsoïde de référence : International 1924 (Hayford 1909) grand axe : 6 378 388.000 m, petit axe : 6 356 911.946 m.
-  Somme des observations nationales européennes. Point fondamental : Helmert Tower à Postdam.
-  Coordonnées géographiques : en degrés, méridien de référence : Greenwich
-  Projection et coordonnées associées : UTM

NTF :

-  Ellipsoïde de référence : Clarke 1880 IGN grand axe : 6 378 249.200 m, petit axe : 6 356 515.000 m.
-  Triangulation de l'IGN, point fondamental : Panthéon à Paris.
-  Niveau de référence des altitudes : niveau moyen de la mer à Marseille
-  Coordonnées géographiques : en grades, méridien de référence : Paris
-  Projections et coordonnées associées : Projections coniques conformes Lambert.

vi. Nivellement

La représentation de la configuration du sol (c'est-à-dire topographie) doit être homogène pour tout un pays et se faire selon une première projection sur une surface de référence :- la direction de la projection est celle de la verticale du lieu (direction donnée par le fil à plomb et par les axes des instruments calés à l'aide d'une nivelle),- la surface de référence choisie est une surface de niveau (équipotentielle). On a pris pour origine celle qui correspond au niveau moyen des mers, supposé

prolongé sous les continents, et qui est appelée géoïde terrestre. La forme du géoïde est très proche d'un ellipsoïde de révolution dont le petit axe est la ligne des pôles.

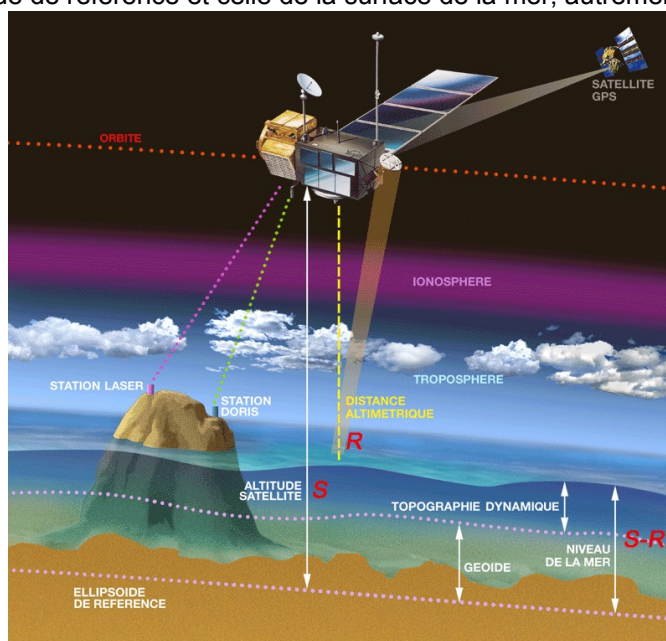
Comment passer de l'altitude à la hauteur ?

Puisque l'altimètre ne fournit que la distance entre le satellite et la surface de la mer (qu'on appellera R) il est nécessaire de calculer la hauteur des océans par rapport au référentiel terrestre.

Pour cela, il faut d'abord définir une surface de référence, choisie arbitrairement. Les informations sur le fond des océans n'étant pas connues partout avec précision, on se réfère à une surface régulière et immatérielle, approchant la forme élémentaire de la Terre, c'est-à-dire une sphère aplatie aux 2 pôles : l'ellipsoïde de référence.

Les données peuvent ainsi être étalonnées de façon précise et homogène. L'altitude du satellite par rapport à l'ellipsoïde de référence (qu'on appellera S) est calculée avec une précision de 3 cm, à partir des paramètres orbitaux du satellite et des instruments de localisation.

Le niveau des océans ou hauteur des mers correspond ainsi à la différence entre l'altitude du satellite par rapport à l'ellipsoïde de référence et celle de la surface de la mer, autrement dit S-R



Le principe de l'altimétrie. Le niveau des océans correspond à la différence entre l'altitude du satellite par rapport à l'ellipsoïde de référence (S) et celle de la surface de la mer (R), autrement dit S-R. (Source : CNES)

Cette hauteur résulte du niveau supposé de la mer en l'absence de toute perturbation, le géoïde, et de la circulation océanique plus ou moins variable, appelée topographie dynamique, conséquence de la rotation terrestre, des vents et des marées.

vii. Réseau géodésique

De nos jours, on se positionne à terre sur un réseau géodésique constitué de points repérés entre eux et reliés au système de positionnement. La méthode la plus ancienne et la plus utilisée pour construire un réseau géodésique, consiste à déterminer la position des points géodésiques sur l'ellipsoïde de référence par triangulation et leur altitude par nivellement. En France, l'IGN a établi le RGF, Réseau Géodésique Français structuré hiérarchiquement en 3 parties :

- 📖 Le réseau de Référence Français (RRF) comprenant 23 sites.
- 📖 Le réseau de Base Français (RBF) obtenu par densification et comprenant 1009 sites soit un site tous les 25 km environ. La précision de ce réseau est de 1,5 cm pour la planimétrie et de 1.5cm à 5 cm pour la composante verticale.
- 📖 Et le réseau de détail, constitué essentiellement des points de la NTF (Nouvelle Triangulation de la France). la précision de ce réseau dans la référence est de 5cm.

La principale difficulté rencontrée lors du positionnement sur la verticale vient du fait qu'il nécessite la connaissance du champ de gravité. En effet, seule la connaissance des variations du champ de pesanteur peut indiquer la direction et le sens de l'écoulement des eaux et définir ainsi la direction du « haut » et du « bas ». La technique traditionnelle pour déterminer les hauteurs fait intervenir le nivellement combiné avec la gravimétrie.

La France avec l'IGN ainsi que de nombreux pays ont leur propre système de positionnement créé à partir d'un réseau de points géodésiques. Sur de petites distances, le nivellement atteint la précision du millimètre mais cette précision se perd lorsque l'on augmente les échelles et on assiste à d'importantes incohérences lorsque l'on doit passer d'un système à un autre. C'est lorsque les terres sont séparées par de grandes surfaces d'eau que l'on observe les plus fortes discontinuités entre les systèmes de hauteur.

viii. levés aériens

Qu'il s'agisse de photogrammétrie ou de laser aéroporté, la démarche de levé se fait en deux temps : la prise de vue d'une part, le traitement et la restitution d'autre part. Ces deux étapes peuvent être exécutées séparément, avec un temps d'arrêt significatif, par exemple pour profiter des meilleures conditions climatiques et hydrologiques possibles pour la prise de vue, et attendre ensuite les spécifications techniques idoines du prestataire hydraulique.

Deux contraintes significatives pèsent sur l'étape de prise de vue :

- 📖 il faut, en plus d'un ciel dégagé et d'un temps clair, que la couverture hydraulique et végétale des sols soit minimale, c'est-à-dire, effectuer les prises de vue plutôt en hiver, mais hors période de crue qui masquerait toute une partie de lit moyen ;
- 📖 il faut préciser dès la commande, l'échelle de prise de vue, ou l'échelle de restitution, qui déterminent directement la précision des données finales ; l'échelle du 1/5 000ème en restitution est généralement bien adaptée.

La stéréopréparation consiste à repérer et niveler précisément des éléments topographiques qui seront parfaitement identifiables sur les photographies aériennes et serviront, de ce fait, à la déduction des altitudes de tous les autres points figurant sur la photographie. Elle répond à des contraintes différentes en fonction de la forme de la zone à lever (couples isolés, bandes, blocs), mais le choix des points de stéréopréparation doit toujours s'attacher à ce que :

- 📖 aucun point de stéréopréparation ne se trouve à moins de 1 cm du bord de cliché ;
- 📖 les points de stéréopréparation soient parfaitement repérables en atelier (bonne définition géométrique et bon contraste photographique ;
- 📖 la taille de l'image de chaque point de stéréopréparation soit voisine de 50 μm à l'échelle des clichés ;
- 📖 les points retenus, autant que faire se peut, soient pérennes.

Le produit de cette première phase est un canevas photogramétrique associé aux prises de vues.

La restitution des plans est l'opération qui, exploitant ces éléments, permet d'obtenir des données utiles pour la modélisation. Elle doit s'attacher à respecter les prescriptions suivantes :

- 📖 la restitution du relief par courbes de niveaux au pas de 0,5 mètre dans les zones de talus (lit mineur entre le niveau d'eau d'étiage et le débordement), au pas de 1,0 mètre ailleurs (moyennant, par application de l'article 9 de l'arrêté interministériel du 21/01/1980 et de son instruction du 28/01/1980, l'addition de lignes intercalaires lorsque l'écartement entre courbes de niveaux au pas de 1,0 m dépasse 2 cm sur plan) ;
- 📖 la fourniture, par défaut, d'un semis de points de base $[x,y,z]$ au pas d'espacement de 30 mètres ;
- 📖 les points devront rendre compte du terrain naturel et du sol remanié (remblais, déblais), en faisant abstraction du bâti (maisons, ponts, etc.) et de la couverture végétale (sommets d'arbres, canopée, etc.) ;
- 📖 la fourniture, par défaut, des lignes structurantes du terrain naturel (remblais, fossés, berges, talus, routes, voies ferrées, digues) par une polyligne 3D $[x,y,z]$ rendant compte de la crête (ou deux polygones en cas de crête épaisse, comme pour une autoroute, voie ferrée, etc.), une polyligne 3D $[x,y,z]$ rendant compte de chaque pied de talus, une polyligne 3D $[x,y,z]$ rendant

compte du fond des fossés et deux polygones 3D [x,y,z] rendant compte des lignes de débordement (pseudo-berges) ;

- 📖 le cas échéant, la fourniture de profils demandés par le maître d'ouvrage ou par le prestataire d'étude hydraulique.

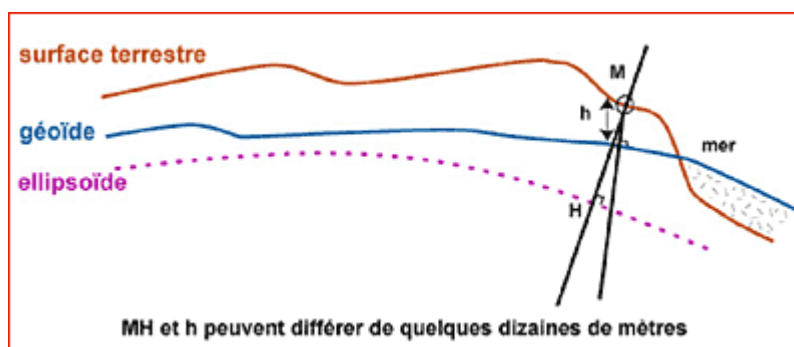
ix. Levés Lidar

Les mesures Lidar doivent être géoréférencées dans le système de coordonnées adapté.

Trois types d'altitude sont en présence :

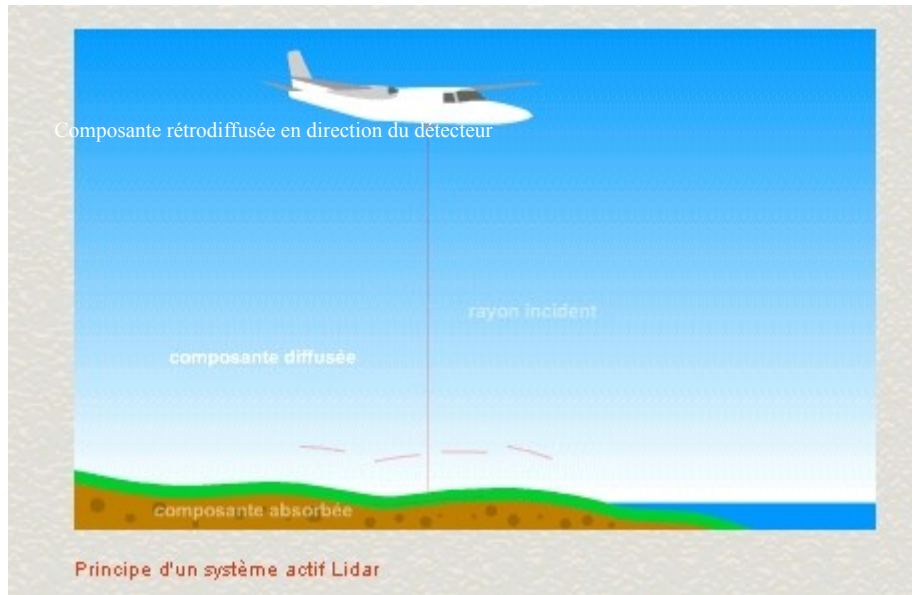
- 📖 la hauteur sur l'ellipsoïde IAG-GRS 80, qui est celle mesurée par le dGPS,
- 📖 l'altitude sur le géoïde, surface équipotentielle servant de référence aux altitudes en France et appelée " IGN 69 ", Le rattachement entre ces deux altitudes se fait facilement par utilisation d'une grille (la RAF 98) qui en donne les écarts tous les 2.5 km.
- 📖 Enfin, le zéro hydrographique (si l'on doit raccorder données de relief et données de profondeur).
Ce dernier est proche du niveau des plus basses mer (voir http://www.shom.fr/fr_page/fr_act_oceano/maree/ports.htm).
Son écart au repère IGN69 n'est connu qu'aux ports principaux et secondaires, en attendant que soit disponible une grille le précisant en tout point, à l'instar de la RAF98.

Les données Lidar sont acquises en coordonnées géographiques (WGS84). On les transforme aisément en tout système de coordonnées planes ([logiciel Circé de l'IGN](#)), la référence française aujourd'hui étant le Lambert 93.



Systeme de référence altimétrique

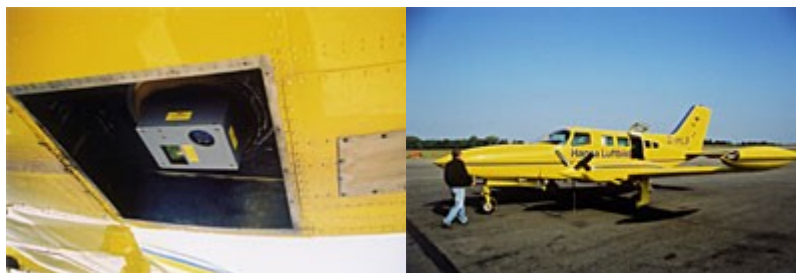
Le Lidar est une technique de télédétection "active" avec émission de lumière. Une partie de la lumière est diffusée ou absorbée par le milieu, l'autre est rétrodiffusée en direction de la source du rayonnement.



L'écart en temps entre l'instant d'émission et l'instant de réception du signal est représentatif de la distance parcourue par ce dernier.

Le télémètre laser émet un rayonnement à haute fréquence (jusqu'à 80000 Hz), dans l'infrarouge proche (typiquement 1064 μm) en topographie, dans le visible (secteur vert 532 μm) en bathymétrie.

Il est accompagné sur la plate-forme (avion ou hélicoptère) d'un système de positionnement GPS (Global Positioning System), qui détermine très précisément la position de l'avion et par conséquent celle de l'altimètre laser au cours de la télémétrie, ainsi que d'une centrale de navigation interne INS (Inertial Navigation System), composée d'inclinomètres et d'accéléromètres, utilisée pour déterminer les accélérations et les changements d'attitude du capteur occasionnés par les mouvements de l'avion au cours du vol (roulis, lacet, tangage).



Vue de l'avion Cessna et du système laser



Capteur Optech ALTM 1033 à gauche, INS et récepteur GPS à droite

Le plan de vol est ici illustré sur la baie du Mont Saint-Michel. Les axes de vol sont des lignes parallèles de recouvrement 30 %, qui doivent être les plus longues possible afin de diminuer la part relative des demi-tours. La largeur de fauchée est de 0,7 fois l'altitude, soit 700 mètres pour un vol à 1000 mètres. Le vol démarre un peu après mi-marée descendante (axe 1) de manière à descendre avec la marée. Le taux typique de couverture en zone côtière se situe à 30-40 km² par heure.



Levé au GPS différentiel ou dGPS (utilisé avec le levé laser)

L'idée fondamentale du dGPS est que deux récepteurs observant les mêmes satellites feront des erreurs de mesure d'autant plus semblables que ces récepteurs sont proches. En plaçant un récepteur dit de référence sur une position parfaitement connue, il est possible d'évaluer non pas cette position à partir des mesures qu'il effectue, mais la valeur théorique que devraient avoir ces mesures à partir de la position connue et de les comparer ensuite avec les mesures réelles. La différence de ces valeurs donne l'erreur de mesure, qui va servir à corriger les erreurs de mesure des récepteurs placés sur des positions inconnues.

Sous sa forme la plus simple, le dGPS ramène la précision du GPS à quelques mètres, sous sa version la plus sophistiquée, à quelques millimètres. Cette précision est largement fonction de la " pseudo-distance " entre les deux récepteurs (le mobile et le fixe), qui doit rester inférieure à 15 km environ. Dans le cas de la mesure en temps réel, les corrections sont calculées et diffusées immédiatement par voie hertzienne vers le récepteur mobile.

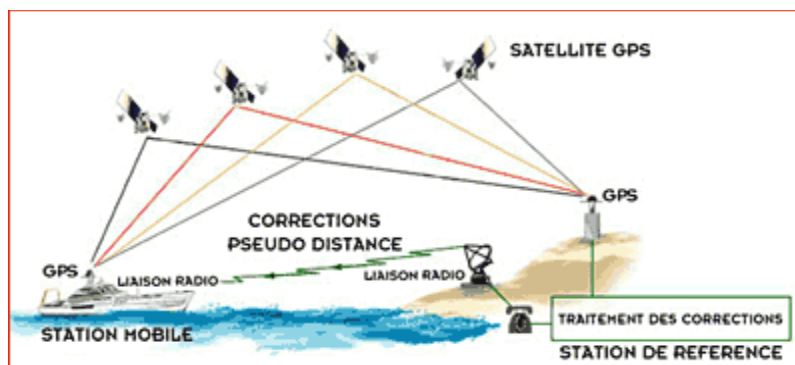


Illustration du fonctionnement du GPS différentiel

x. levés terrestres

Les levés terrestres sont des opérations indispensables pour compléter les prises de vue aériennes ou lidar. Les levés sont ciblés sur des objets choisis préalablement pour leur intérêt dans le cadre de l'outil d'analyse (modélisation hydraulique par exemple) envisagé. Ces objets peuvent être notamment :

- 📖 des points d'enjeux vulnérables pour lesquels les objectifs de l'étude sont spécifiquement définis ;
- 📖 des laisses de crues identifiées au préalable ;
- 📖 des profils particuliers d'ouverture libre sous ouvrage dans un calcul simplifié lié à une abaque (pont, seuil, etc) ;
- 📖 des profils en travers décrivant l'écoulement global dans une modélisation filaire (1D) ;
- 📖 des profils en long du fond, des berges, de la ligne d'eau, etc. ;
- 📖 des lignes structurantes délimitant des casiers dans une modélisation filaire à casiers ou susceptibles d'influencer les écoulements dans une modélisation bidimensionnelle ou une modélisation physique à échelle réduite.

La première étape de la formalisation de la commande consiste donc à implanter les traces de ces objets sur une carte lisible (généralement, l'échelle 1/25 000^{ème} est bien adaptée). Une erreur courante, génératrice d'incompréhensions nuisibles entre le géomètre et le maître d'ouvrage, est de ne pas tenir compte de l'accessibilité des objets à niveler. Autant il n'est pas techniquement impossible de procéder à un rattachement de niveau à une borne éloignée, autant il peut être strictement impossible de se rendre sur un lieu donné sans procéder au débroussaillage et à l'arrachage de haies denses de ronces et d'arbustes séparant ce lieu d'une borne de rattachement toute proche ! Généralement, il faut prévoir, dans le cas de profils en travers pour une modélisation filaire, un profil toutes les 5 à 10 largeurs de rivière (c'est-à-dire la largeur du lit figurée au 1/25 000^{ème}), et un profil à chaque singularité géométrique encadré par un profil en amont et un profil en aval, chacun à une distance comprise entre 1 et 2 largeurs de rivière du profil de la singularité géométrique (généralement, il faut identifier les sections non-perturbées par la singularité géométrique et encadrant cette dernière).

Il n'est pas inutile de rappeler que l'implantation de profils en travers dédiés à une modélisation devrait être faite par un spécialiste (AMO et/ou prestataire). On peut également conseiller de prévoir une visite du terrain en compagnie du géomètre retenu pour convenir précisément sur site des éventuels arrangements imposés par la configuration effective des sites prévus pour l'implantation des profils en travers.

A l'issue des travaux du géomètre, il devra être fourni un plan de récolement faisant figurer les objets effectivement nivelés, avec une identification claire et les bornes de rattachement IGN employées.

Pour les objets subaquatiques (portion de profil en travers de lit mineur sous l'eau au moment des levés), le nivellement consistera en au moins 5 points, avec un espacement d'au plus 10 mètres, réduit d'autant qu'il faudra pour disposer d'un point supplémentaire dès que la dénivellation avec

le point précédent atteint 0,50 mètre, sauf si cela conduit l'espacement entre deux points consécutif à faire moins de 1,00 mètre. Le niveau d'eau sera systématiquement nivelé et daté. Pour la partie exondée du lit mineur (au moment du nivellement des objets subaquatiques), le nivellement suivra les mêmes prescriptions que pour les objets recouverts par l'eau, en veillant au parfait raccordement entre les deux levés.

Concernant les profils en lit majeur, les points seront espacés en moyenne de 25 mètres environ, espacement réduit d'autant qu'il faut pour assurer une dénivellation maximale entre deux points consécutifs de 1,00 mètre, sans toutefois que cet espacement soit inférieur à 2,00 mètres.

Les lignes structurantes du terrain sont à niveler. Il faut impérativement niveler la ligne de crête et les lignes de pied de part et d'autre des remblais, ou les deux lignes de berge (limite de débordement) et la ligne de fond des fossés et autres talwegs.

Les ouvrages singuliers (ponts, barrages, seuils) doivent également être nivelés en fonction de leurs éléments caractéristiques.

Lorsqu'il s'agit simplement de vérifier le rattachement d'un profil existant, le nivellement d'un seul point représentatif et réputé stable doit suffire, mais il n'est pas inutile de procéder également au nivellement d'un point dans le cours d'eau lui-même pour vérifier simplement la stabilité du lit et la validité des données anciennes.





xi. Le Référentiel à Grande Echelle (RGE®): référentiel national de précision métrique.

L'Etat a confié par décision interministérielle du 19 février 2001 à l'IGN, le développement du Référentiel à Grande Echelle (RGE®) qui intègre des données de référence, issues de ses propres bases ou provenant d'autres producteurs.

Que ce soit au niveau de l'Etat, d'une collectivité ou d'une entreprise, la numérisation de l'information géographique a profondément modifié les usages de la carte. La possibilité d'adapter la représentation de l'information à chaque besoin particulier, de l'enrichir de données statistiques ou réglementaires, d'y associer des modèles d'analyses ou de prévision... multiplie les utilisateurs et les usages. La cartographie devenue outil de gestion, d'aide à la décision et interface de concertation est d'autant plus efficace qu'elle s'appuie sur un référentiel commun à des utilisateurs qui sont aussi des producteurs d'informations. Le Référentiel à Grande Echelle (RGE) est une infrastructure sur laquelle chacun peut superposer ses propres données.

Composantes du RGE

Le RGE est constitué de 4 composantes:

-  une composante image BD ORTHO® : ce sont les photos aériennes couleur orthorectifiées de résolution 50 cm. La 1^{re} couverture nationale date de fin 2003. La mise à jour est quinquennale.
-  une composante topographique : BD TOPO® : la BDTopo pays qui est la description métrique en 3 D du territoire et de ses infrastructures. La disponibilité complète pour la France est prévue mi-2007.
-  une composante parcellaire : BD PARCELLAIRE® : Il s'agit de la description des limites et l'identification des parcelles cadastrales géoréférencées et assemblées. Les communes livrées en format vecteur par la Direction Générale des Impôts sont disponibles à partir de 2006; en ce qui concerne les territoires mis à disposition par la DGI en 2003 sous forme scannée (cadastre scanné par la DGI), 60% de ces communes seront disponibles en 2006
-  une composante adresse : BD ADRESSE® : il s'agit de la localisation des adresses postales et des noms de voies; Fin 2006, 70% du territoire sera disponible.

Annexe 6

Suivi de la réalisation de l'étude hydraulique

Table des matières

1. Préambule.....	2
1.1. la formulation des exigences et leur bonne compréhension.....	2
1.2. le juste équilibre entre formalisation et confiance.....	2
1.3. assumer les incertitudes.....	3
2. Déroulement général d'une étude.....	4
2.1. lancement de l'étude (réunion avec le maître d'ouvrage).....	4
2.2. collecte et analyse des données.....	5
2.3. construction, calage et validation de l'outil d'analyse.....	5
2.4. fonctionnement actuel du secteur d'étude.....	6
2.5. conception de l'état projeté.....	6
2.6. livraison du résultat final.....	7
3. Les critères de validation de l'étude.....	8
3.1. comptes-rendus des observations de terrain.....	8
3.2. synthèse bibliographique.....	8
3.3. fonctionnement hydrologique.....	10
3.4. choix de l'outil d'analyse.....	10
3.5. pertinence du calage de l'outil d'analyse.....	11
3.6. cohérence des résultats.....	12
3.7. vérification des hypothèses de calculs.....	13
4. Les tests de sensibilité.....	13
4.1. de l'incertitude en hydraulique.....	13
4.2. les sources de l'incertitude.....	14
4.2.1- les incertitudes liées aux mesures de données.....	14
4.2.2- les incertitudes liées à la représentativité de l'information.....	15
4.2.3- les incertitudes liées aux données reconstituées.....	15
4.2.4- les incertitudes liées aux hypothèses de modélisation.....	15
4.2.5- incertitudes spécifiques liées au régime transitoire.....	16
4.2.6- l'évolution des données significatives.....	17
4.3. description des tests de sensibilité.....	18
4.3.1- étape n°1a : les tests de sensibilité portant sur les valeurs imposées.....	18
4.3.2- étape n°1b : les tests de sensibilité portant sur les paramètres de calage.....	19
4.3.3- étape n°2 : analyser le faisceau des lignes d'eau.....	20
4.4. spécifier les tests de sensibilité.....	20
5. Les produits de l'étude.....	21
5.1. les notes intermédiaires et rapports provisoires.....	21
5.2. les annexes techniques.....	22
5.3. le rapport final.....	23
5.4. les produits de communication.....	23

1. Préambule

1.1. la formulation des exigences et leur bonne compréhension

Face à un prestataire de service qui dispose d'une forte expertise, la tentation de tout maître d'ouvrage est de s'assurer pas à pas de la qualité de la prestation fournie. Nombre de ces mêmes maîtres d'ouvrages découvrent au cours de l'étude hydraulique combien les subtilités de cette discipline imprégnée de dires d'experts et de choix de modélisation ouvrent un abîme d'incertitude autour des résultats obtenus. Contraint d'assurer son rôle de décision, le maître d'ouvrage ressent alors le besoin de disposer d'éclairages complémentaires, sous des angles qui tiennent compte des marges d'incertitude autour des choix proposés par le prestataire.

Ces éclairages nécessitent de nombreux calculs qui peuvent compromettre l'économie de l'étude s'ils n'ont pas été correctement compris et pris en compte au niveau de l'offre. Il est donc essentiel que la maîtrise d'ouvrage exprime clairement dans le cahier des charges de l'étude, son besoin de connaissance des marges d'incertitude dans lesquelles elle prendra sa décision.

Ce besoin ne doit pas faire seulement l'objet d'une demande générique, laissée à l'appréciation des candidats de la consultation. Afin de permettre un jugement équitable des offres sur ce volet, il faut s'assurer, par une description assez précise de la consistance des vérifications et autres éclairages complémentaires demandés au futur prestataire, que les candidats proposent des éléments comparables.

1.2. le juste équilibre entre formalisation et confiance

Pour autant, il est très difficile de prévoir, dès le stade de la rédaction du cahier des charges, l'ensemble des hypothèses qui nécessiteront des analyses complémentaires. Un cahier des charges qui prévoirait systématiquement des vérifications sur toutes les hypothèses qui peuvent être émises durant l'étude conduirait à une augmentation substantielle des coûts sans que la qualité de l'étude soit mieux garantie pour autant. Et un cahier des charges qui expliciterait des analyses complémentaires a priori sur des points qui se révèlent, à la pratique de l'étude, sans réel objet, risquerait de négliger d'autres points qui semblaient a priori sans difficulté ni incidence, et qui peuvent influencer la constitution du produit final de l'étude.

Par ailleurs, si les prestataires sont en général favorables à l'exécution d'analyses complémentaires sur les incertitudes liées aux résultats notamment, pour peu qu'elles soient correctement rémunérées, ils ne seraient pas dupes d'un cahier des charges aux exigences mal cadrées et mal vérifiées durant la prestation. A moins de disposer d'une compétence approfondie dans le domaine de l'hydraulique, le maître d'ouvrage devrait prendre garde à ne pas perdre sa crédibilité en exigeant des contrôles dont il ne maîtrise pas vraiment la portée.

Le rôle du prestataire ne se cantonne pas à l'exécution des tâches demandées dans le cahier des charges. Il est aussi de faire valoir son expertise technique, non pas en affirmant péremptoirement la justesse de ses résultats, mais en délimitant les contours des incertitudes qui pèsent nécessairement sur ces résultats, et de faire porter les efforts de clarification sur les points qui influenceront réellement sur les décisions de la maîtrise d'ouvrage.

Il y a donc un équilibre à trouver entre formalisation de la consistance du travail qui sera demandé au prestataire dans les analyses complémentaires et les contrôles formels de résultats, et liberté laissée à la relation de confiance qui doit s'établir entre le prestataire

et le maître d'ouvrage pour l'orientation de ces efforts sur les points les plus significatifs à dire d'expert pendant l'exécution de la prestation.

1.3. assumer les incertitudes

Enfin, cette démarche équilibrant formalisation et dire d'expert doit reposer sur une approche des incertitudes parfaitement assumée de la part de la maîtrise d'ouvrage, notamment lorsqu'un maître d'œuvre ou un assistant à maîtrise d'ouvrage assure la liaison avec le prestataire. Car si les experts techniques du domaine de l'hydraulique ont souvent parfaitement conscience de l'existence des incertitudes et de leur nature gérable, les maîtres d'ouvrage sont au moins aussi souvent déstabilisés par les incertitudes qu'on leur présente, s'agissant d'une discipline scientifique ancienne et adossée désormais à des outils de calcul puissants et coûteux.

Il appartient donc au maître d'œuvre ou à l'assistant au maître d'ouvrage d'expliquer au maître d'ouvrage la nature et l'incidence générale des incertitudes pesant sur les différentes étapes de l'étude, et de le préparer à assumer les choix qu'il devra faire en connaissance de cause.

Ce chapitre présente les différentes clefs d'un contrôle rationnel et raisonnable que le maître d'ouvrage peut mettre en place avec son prestataire,

- pour parer à tout risque d'erreur pouvant compromettre la pertinence de l'étude et de ses conclusions,
- pour disposer d'un éclairage compréhensible et pragmatique sur les incertitudes irréductibles avec lesquelles il devra composer au moment de ses décisions.

et leur formalisation souhaitable, afin de disposer,

- au moment de la contractualisation, d'une expression suffisamment précise de la consistance attendue du volet « contrôles du suivi de l'étude » pour que les candidats en fassent une estimation technico-financière fiable,
- mais aussi d'une base de relations de confiance entre le maître d'ouvrage et le prestataire pour adapter les efforts aux éléments les plus pertinents en fonction de l'évolution de l'étude,

sans compromettre la crédibilité du maître d'ouvrage par des contrôles demandés au prestataire dont il ne serait pas capable d'éprouver la pertinence technique.

2. Déroulement général d'une étude

Le déroulement technique d'une étude répond à un certain nombre de nécessités qui imposent au maître d'ouvrage une segmentation maximale en points d'arrêt au-delà de laquelle il est déraisonnable d'aller.

A rebours, la confrontation des résultats avec leurs incertitudes doit avoir lieu à certains moments clefs du déroulement de l'étude pour produire des effets productifs sans contrarier la cohérence globale de l'étude.

Le maître d'ouvrage devra toutefois se garder de procéder à une validation progressive de l'étude sur visa de résultats partiels, et réservera sa validation formelle au rapport final. En effet, parce qu'une étude hydraulique est souvent évolutive, il n'est pas rare qu'à la lumière de résultats intermédiaires, il faille revenir, par exemple, sur un calage initial ou des hypothèses de répartition de débits. Si ces hypothèses ou ces résultats intermédiaires ont été formellement validés au moment de leur formulation, des risques sérieux de critiques, voire de contentieux, entre le maître d'ouvrage et son prestataire sont susceptibles d'apparaître à la fin de l'étude.

2.1. lancement de l'étude (réunion avec le maître d'ouvrage)

Cette phase est généralement souhaitée par le maître d'ouvrage ne serait-ce qu'au titre de son utilité pour rappeler les paramètres administratifs et financiers de l'étude et les éléments temporels contractuels.

Elle peut comporter un volet plus technique dont la portée n'est pas à négliger : la reformulation des objectifs de l'étude.

Le chapitre 1 du présent document a eu l'ambition de présenter au lecteur combien une définition claire et complète des objectifs contribuait à la réussite de l'étude hydraulique. Il serait utopique de croire que la formalisation de cette définition dans le cahier des charges aura suffi à tout coup pour établir une compréhension mutuelle des objectifs entre le maître d'ouvrage et son prestataire.

En effet, la rédaction du cahier des charges par le maître d'ouvrage (ou son assistant) d'une part, le degré d'attention portée à la lecture dudit cahier des charges par le candidat à l'appel d'offres d'autre part, peuvent escamoter en partie ces objectifs et leur portée réelle.

La reformulation des objectifs de l'étude par le prestataire lui permet d'explicitier les souhaits du maître d'ouvrage, et de s'assurer qu'il les a lui-même bien compris. Elle fournit aussi au maître d'ouvrage l'occasion de signifier la hiérarchisation qu'il opère sur les préoccupations listées, la teneur des arbitrages qu'il entend effectuer, le contexte politique et social dans lequel se situe l'étude et ses conclusions. Elle peut aussi permettre au maître d'ouvrage, ainsi qu'à ces partenaires, de préciser certains éléments liés à leur connaissance du fonctionnement hydraulique du secteur d'études.

La réunion de lancement est également l'occasion pour le prestataire de faire connaître ou de préciser les éléments qu'il attend de la part des partenaires de l'étude : données techniques, éléments de bibliographie, autorisations d'accès, etc. Aussi, est-il raisonnable de faire démarrer l'étude à l'issue de la fourniture de ces éléments au bureau d'études prestataire, tant il est dommageable pour la qualité de l'étude que le prestataire, tenu par un délai courant en dépit de la non-fourniture de toutes les données nécessaires, soit forcé de produire un résultat de calcul sans disposer de certaines informations indispensables qu'il doit deviner (au risque de se tromper ou d'avoir à reprendre tout ou partie de son calcul lorsque la donnée réelle lui parvient enfin) ou négliger (à tort ou à raison). La réunion de lancement sera ainsi l'occasion pour le maître d'ouvrage de faire

préciser par chacun de ses partenaires, les délais respectifs de fourniture des éléments demandés ; la date de l'ordre de service (O.S.) de démarrage des prestations¹ pourra être fixée en conséquence à cette occasion.

Le cadrage de l'incidence de cette disposition sur le planning global de l'étude peut être très efficace si le recensement de ces données a été effectué dès la préparation du cahier des charges, et la liste correspondante, explicitée dans le cahier des charges.

2.2. collecte et analyse des données

Cette phase est laborieuse et chronophage tant pour le prestataire que pour les partenaires de l'étude.

Les données existantes doivent être recueillies et soigneusement référencées. En particulier, les unités, les référentiels (lieu de prise d'information, référentiel géographique, altimétrique, etc), les dates, les sources d'information doivent être précisés pour qu'une donnée constitue une information complète et exploitable. Les contrôles de cohérence adaptés à chaque type de données doivent être mis en œuvre pour trier les informations a priori fiables et les informations a priori erronées, et pour identifier les lieux ou les événements mal connus pour lesquels des investigations complémentaires ou des hypothèses spécifiques doivent être menées ou émises.

La matière d'œuvre bibliographique doit être consultée et analysée de manière à faire apparaître les constats convergents d'une part, les points de divergence et les contradictions d'autre part, que ce soit au niveau des ajustements effectués sur les données ou au niveau des conclusions tirées par l'auteur. Ces contradictions doivent être expliquées par le prestataire d'après ce qu'il a compris de ses lectures comparées et les données peut-être plus récentes ou révisées dont il dispose.

Au moins une visite sur le terrain doit permettre d'étayer les analyses du prestataire sur des observations in situ, mais aussi, de consolider les constats sur une base pragmatique en vue de les faire partager par tout connaisseur du site de l'étude.

A l'issue de cette phase, le prestataire est capable de produire une analyse qualitative du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude.

2.3. construction, calage et validation de l'outil d'analyse

Contrairement à une idée très répandue parmi les maîtres d'ouvrages, la phase de construction, calage et validation du modèle, bien qu'elle regroupe un certain nombre de tâches bien identifiées, n'est pas dissociable de la phase précédente d'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude.

En effet, l'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude permet au prestataire d'ébaucher des hypothèses de fonctionnement, et donc, de topologie des écoulements, et par suite, de modélisation appropriée de ces écoulements. La construction et le calage du modèle viennent confronter le fruit de cette analyse qualitative à la réalité des données quantitatives. Si bien qu'il est fréquent que l'hydraulicien ait à amender son analyse initiale du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude, en fonction des premières difficultés rencontrées pour caler son modèle.

- On peut cependant décomposer le travail du modélisateur en trois sous-phases. Il commence par le choix d'un modèle approprié à la topologie des écoulements, et l'identification des hypothèses de simplification des écoulements réels et de leurs conséquences sur la nature et la qualité des résultats. Il peut s'agir du type et des caractéristiques des débordements, des conditions hydrauliques aux limites de chaque secteur, de tri par rapport aux données disponibles, de construction par interpolation ou extrapolation de données manquantes, de raffinement de données existantes pour augmenter leur densité apparente, du mode de représentation des singularités

¹ Pour cette raison, au niveau de l'Acte d'Engagement (ou du Cahier des Clauses Administratives Particulières), on précisera de préférence que les délais de réalisation de l'étude débutent à la date de l'ordre de service prescrivant le démarrage des prestations, et non à la date de notification du marché.

hydrauliques sous forme de lois hydrauliques, de géométries d'obstacles, de coefficients de perte de charge, etc.

- Ensuite, il convient de faire coïncider le résultat du calcul hydraulique (généralement, une ligne d'eau) avec les points de mesure connus réputés représentatifs de la ligne d'eau réelle d'un événement hydrologique effectivement survenu dans le secteur d'étude. Cette coïncidence est effectuée à l'aide du calage de paramètres du calcul laissés à l'appréciation du modélisateur, mais n'est pas forcément absolue. En effet, la qualité relative et la représentativité variable des données utilisées pour cette sous-phase (qu'il s'agisse des données utilisées pour le calcul ou des données auxquelles les résultats sont confrontés) ne permettent que très rarement un calage parfait, c'est-à-dire, sans écart entre simulation et réalité.

Il appartient alors au prestataire d'explicitier les zones de son calcul qui sont sensibles, et à quel point, aux incertitudes liées aux données de calage. Cette dernière sous-phase est communément appelée « étude de sensibilité ». Enfin, une simulation de validation doit être tentée dès lors qu'il existe une forte crue différente de la crue de calage, pour laquelle on dispose de laisses de crue. Cette étape constitue la validation du modèle, et permet d'apprécier a minima l'incertitude liée au calage du modèle et la capacité de prédiction du modèle.

2.4. fonctionnement actuel du secteur d'étude

Trop souvent négligée, cette phase fait écho à la réunion de lancement. Il s'agit d'y présenter au maître d'ouvrage l'éclairage technique qui a pu lui faire défaut lors de la définition de ses objectifs.

Ainsi, le prestataire doit décliner les objectifs du maître d'ouvrage en termes techniques, par zone et par variable physique significative, et il doit se prononcer sur l'opportunité et la faisabilité de ces objectifs « a posteriori ». L'échange qu'il doit avoir à ce sujet avec le maître d'ouvrage doit permettre à ce dernier de décider, en connaissance de cause :

- de l'abandon des objectifs aventureux ou hasardeux ;
- de l'amendement de la hiérarchisation initiale des objectifs de l'étude ;
- d'une éventuelle optimisation des scénarios d'aménagement initialement proposés à l'étude dans le cahier des charges, en respectant une équivalence de consistance entre les nouvelles tâches et celles auxquelles elles se substituent.

Le prestataire présente également, lorsqu'ils sont différents de l'état actuel, les états de référence. Il les décrit complètement et indique clairement ce qui les distingue qualitativement et quantitativement de l'état actuel. Il précise et explique les quantifications des niveaux de satisfaction des objectifs qu'il est raisonnable d'envisager compte-tenu des écoulements identifiés dans le secteur d'étude.

2.5. conception de l'état projeté

Sur les indications du maître d'ouvrage et sous la direction du maître d'œuvre, le prestataire élabore le ou les modèles de variantes de l'état projeté.

Pour ce faire, il modifie la topologie des écoulements, dans des proportions qui ne doivent pas bouleverser le modèle au point de compromettre la pertinence de la comparaison des résultats entre les situations de l'état actuel, des états de référence et des états projetés. Puis il modifie les données structurelles du modèle pour modéliser les projets, et procède aux simulations selon des conditions semblables à celles des états actuel et/ou de référence.

L'analyse des résultats ne se limite alors pas à une simple énumération plus ou moins exhaustive des différences quantitatives entre les différentes situations. Elle aborde aussi de manière approfondie les différences qualitatives entre les divers fonctionnements hydrauliques du secteur étudié.

Mais surtout, le prestataire doit apprécier, au vu des analyses des résultats, le niveau de satisfaction des objectifs du maître d'ouvrage. La synthèse de ces analyses n'appartient qu'au maître d'ouvrage, mais le prestataire doit avoir fourni, pour chaque objectif, les éléments compréhensibles qui étayeront cette appréciation de synthèse.

Cette étape peut faire l'objet de deux temps : le premier consistant à esquisser les tendances hydrauliques en fonction d'options de conception de l'ouvrage, et le second visant à dimensionner l'ouvrage en fonction du choix de la maîtrise d'ouvrage parmi les options (et tendances) présentées. Un dédoublement des réunions et du délai d'exécution doit alors être prévu.

2.6. livraison du résultat final

Le rapport final de l'étude et ses annexes ne constituent qu'une fraction du produit de l'étude. Le maître d'ouvrage qui n'exigerait que ce produit pour livraison du résultat final céderait au prestataire la jouissance d'une masse importante d'informations élaborées par lui pour son compte et sur ses deniers.

Il n'est donc pas inutile de rappeler que le maître d'ouvrage peut réclamer, pour peu que le cahier des charges n'ait pas négligé de le mentionner :

- les données informatiques
- les données topographiques
- les fichiers de commande du modèle
- les fichiers des résultats (lignes d'eau, notamment).

Il faut toutefois s'assurer que la livraison s'effectue selon des formats archivables et lisibles par les moyens techniques du maître d'ouvrage, et que l'organisation de ces fichiers informatiques est expliquée clairement dans un document informatique ou papier livré en même temps au maître d'ouvrage.

3. Les critères de validation de l'étude

Le Maître d'ouvrage (ou son assistant) devra déceler les éventuelles erreurs commises par le prestataire, les incohérences dans les résultats des différentes variantes, les points de non conformité avec le programme de l'étude, ou tout autre sujet de désaccord. Il devra soutenir le débat technique qui en découlera et amènera le prestataire à rectifier ce qui doit l'être... ou se laissera convaincre par lui.

3.1. comptes-rendus des observations de terrain

La confrontation des résultats de calculs avec les observations de terrain est le filtre le plus efficace et le plus accessible pour écarter les erreurs manifestes d'analyse. Encore faut-il pour cela que ces observations de terrain fassent l'objet de constats à la fois exhaustifs et compréhensibles, notamment par le maître d'ouvrage.

Il n'est généralement pas utile, à moins de nourrir d'importants soupçons quant au sérieux du prestataire, d'exiger la présentation des fiches de prise d'information sur le terrain, c'est-à-dire les minutes des observations faites par le prestataire durant l'arpentage du terrain. Celles-ci ne seraient pour le maître d'ouvrage que des preuves du passage du prestataire sur le terrain, et pour le prestataire, qu'un brouillon de prises de notes répondant à des critères de formalisation et de contenu propres à son organisation professionnelle.

Les comptes-rendus des observations de terrain doivent être un récapitulatif synthétique du dire d'expert du prestataire sur les lieux significatifs du site de l'étude, étayé par les observations de terrain présentées en des termes non-équivoques et intelligibles par le maître d'ouvrage. Ainsi, ils doivent autant permettre au maître d'ouvrage de valider les options d'analyse retenues par le prestataire, que permettre au prestataire de partager ses constats techniques avec le maître d'ouvrage.

Il peut s'agir de fiches d'hydromorphologie, de laisses de crues, etc. Ils doivent comprendre une ou plusieurs photographies du site, une indication des dates et auteurs du constat, et des éléments descriptifs du lieu et de ses caractéristiques intéressantes.

A moins de connaître très finement le site de l'étude, le maître d'ouvrage ne peut pas vraiment exercer un contrôle de la pertinence de ces constats. Par contre, il peut apprécier à quel point le prestataire justifie ses choix techniques dans l'élaboration de l'outil d'analyse et l'interprétation des résultats obtenus à partir de ces observations de terrain. Il ne devrait notamment pas tolérer que ces deux phases (observations de terrain et analyses) soient manifestement déconnectées : ce serait un indice d'un risque de manque d'ancrage de l'outil d'analyse dans la réalité du site, pouvant conduire à de sérieuses aberrations. Une simple vérification « orale » en interrogeant précisément le chargé d'études sur l'un ou l'autre lieu du site de l'étude devrait lui permettre de dissiper ou confirmer ces doutes.

3.2. synthèse bibliographique

Quelque soit le site étudié, le prestataire ne doit jamais considérer qu'aucune étude n'y a été menée ; il doit plutôt considérer, a priori, que son étude vise à compléter une connaissance du fonctionnement hydraulique du secteur d'études déjà existante. Sur la base de la bibliographie fournie par le maître d'ouvrage si des études antérieures sont répertoriées, ou à défaut sur la base de ses propres recherches, en prenant alors soin de répertorier les organismes consultés, et de mentionner l'ensemble des documents consultés, le prestataire synthétisera les connaissances disponibles, pour identifier leurs convergences et leurs contradictions, et positionner ses propres analyses dans ce contexte technique.

Ainsi, il pourra être amené à positionner sur une carte schématique l'ensemble des données rassemblées, ce qui permet de faire côtoyer des informations de nature comparable provenant de sources différentes, et de rendre évidents quelques constats de divergence ou de convergence de ces informations. Ces informations pourront être les valeurs des débits de période de retour donnée, les niveaux supposés atteints ou calculés pour des événements identiques, les lois de fonctionnement d'ouvrages, les répartitions de débits entre bras principal et bras secondaire..

Parmi les plus courants, on peut citer :

- un débit statistique de période de retour donnée dont la valeur varie sensiblement au même endroit en fonction des études : il s'agit alors de comprendre si cette variation provient de méthodes hydrologiques différentes² (et d'en tirer des enseignements pour le choix de la méthode de l'étude présente), d'échantillons de données différents (soit qu'une valeur jugée aberrante et écartée de l'ajustement par l'un ait été conservée et intégrée dans l'ajustement par l'autre, soit qu'une période de mesure plus longue profite à l'une des études), d'une modification structurelle du bassin versant et de ses modes de production d'un débit, ou encore d'une extrapolation plus ou moins correcte de débits calculés en d'autres lieux. On pourra aussi, s'ils figurent au niveau des études consultées, mentionner les intervalles de confiance correspondant aux différentes valeurs répertoriées ;
- un débit de pointe variable pour une même crue connue selon les sources : il s'agit alors de comprendre si cette variation provient d'une mise à jour des données hydrométriques (courbe de tarage rectifiée, suite par exemple à la réalisation de nouveaux jaugeages), d'une méthode d'estimation hydraulique différente (lois hauteurs-débits différentes, ou étalonnées différemment), de choix différents d'extrapolation de valeurs mesurées en d'autres lieux (extrapolation des valeurs en amont, extrapolation des valeurs en aval, interpolation des deux, hypothèses d'apports sur les affluents) ; - une série de niveaux de crue incohérente, constituant une courbe hauteurs-débits improbable à cet endroit (typiquement : une crue de débit supérieur à une autre donnant un niveau inférieur à l'autre) : des explications ont pu être fournies (circonstances particulières telles qu'embâcles dans l'ouverture d'un pont, rupture d'un bassin de retenue sur le parcours, modification sensible du lit mineur, mesure indisponible et valeur « devinée ») ou doivent être trouvées ;
- une répartition variable des débits entre bras : à moins de trouver des explications relatives à des hypothèses de concomitance différentes entre les études antérieures ou à des positions différentes des ouvrages de régulation des niveaux et des débits (moulins, vannages, barrages de navigation, micro centrales hydroélectriques), il faut examiner la stabilité des lits mineurs et les incidences de ces clefs de répartition différentes sur les coefficients de calage des bras concernés ;
- des valeurs de coefficients de calage (notamment rugosité du lit) sensiblement différentes (plus de 5 unités de Strickler, par exemple) : les valeurs aberrantes par rapport aux valeurs usuelles reconnues par les règles de l'art doivent être identifiées, les circonstances particulières pouvant expliquer ces différences doivent être recherchées (occupation du sol variable selon la saison ou les pratiques agricoles en zone rurale, urbanisation différente), les erreurs anciennes ne doivent pas être renouvelées. Il ne faut pas oublier, dans le cadre d'une modélisation filaire, que les coefficients de Strickler ou de Manning sont, en pratique, des coefficients intégrateurs des différentes contributions à la perte de charge linéaire et qu'ils ne rendent donc pas compte uniquement de la rugosité du fond de la rivière (voir par exemple la formule de Cowan.

² par exemple quelle méthode d'évaluation des débits d'occurrence rare ?

3.3. fonctionnement hydrologique

L'étude hydraulique n'étant qu'une focalisation sur une portion restreinte d'un réseau hydrographique auquel elle est intimement liée, elle ne peut être pertinente que si l'expression des interrelations entre le niveau «étendu» (hydrologique) et le niveau «localisé» (hydraulique) est correcte. Le maître d'ouvrage doit donc s'assurer que le fonctionnement hydrologique dans lequel s'inscrivent ses objectifs d'étude est suffisamment bien restitué pour fournir des données pertinentes au projet.

Il ne s'agit toutefois pas nécessairement pour le maître d'ouvrage de juger de l'utilisation adéquate de formules spécialisées de l'hydrologue, mais de vérifier que les interrelations entre stations hydrologiques et limites du secteur d'étude hydraulique ont bien été établies.

Les principales questions qui doivent trouver réponse dans l'analyse du fonctionnement hydrologique sont :

- quelles stations hydrométriques ont servi de base à l'établissement des débits de calage et de référence ? Quelle est la durée d'exploitation de ces stations, et quelle méthode a utilisé le prestataire en vue d'évaluer les débits d'occurrence rares ? ;
- quelle analyse des crues historiques a été menée sur le secteur concerné ? Le débit de référence pris en compte est-il le débit de crue centennal calculé ou le débit de la crue correspondant aux Plus Hautes Eaux Connues ? Peut-on évaluer les marges de sécurité correspondant à ces évaluations ?
- de quelle manière les influences des divers affluents sont-elles intégrées ? Sur quelle base leur contribution respective a été déterminée (analyse de la pluviométrie, de la géologie, de la forme du bassin versant, des hydrogrammes de crue etc....) : comment se combinent les hydrogrammes, quel débit de pointe (ou hydrogramme) retenu pour chacun d'entre eux ?
- comment a été déterminée la contrainte aval (cote ou limnigramme), dans le cas d'une modélisation en régime fluvial (condition amont dans le cas d'un régime torrentiel) ?
- la durée de submersion (ou, ce qui est assez proche, le volume de la crue) est-elle un paramètre de décision à déterminer ?
- doit-on effectuer les calculs en régime transitoire ou en régime permanent (une réponse affirmative à la question précédente induit une réponse affirmative à celle-ci) ? Si le calcul doit être mené en régime transitoire, comment ont été déterminés les hydrogrammes retenus : à savoir si l'étude vise à déterminer un volume de crue (ou une durée de submersion), ou si la modélisation vise à déterminer la cote de la ligne d'eau pour le débit de référence, les hydrogrammes à prendre en compte pourront être différents.

On se reportera à l'annexe 3 - données hydrologiques, ainsi qu'aux Recommandations pour le calcul des aléas hydrologiques dans le cadre des plans de prévention des risques inondation (MEDD, juillet 2005).

3.4. choix de l'outil d'analyse

On ne trouve bien que ce qu'on cherche bien. C'est dans cet esprit que le chapitre 2 – **analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude** donne des pistes pour assurer une analyse qualitative du secteur d'étude avant le lancement des calculs dans lesquels le novice risque de se perdre.

Le choix de l'outil d'analyse repose sur la pertinence des interprétations du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude. Il ne pose pas forcément de problème particulier, mais il convient d'être vigilant une fois pour toutes au moment de ce choix.

La vérification du maître d'ouvrage porte sur la concordance entre le schéma de la topologie des écoulements dans le secteur d'étude et l'outil d'analyse proposé par le prestataire. Cette concordance devrait être *expliquée par le prestataire*, en répondant notamment aux interrogations suivantes :

- lorsque deux laisses voisines et fiables d'une même crue sont à des altitudes sensiblement différentes : s'agit-il d'une progression normale du profil en long d'un écoulement continu et régulier entre ces deux points, ou de témoignages de deux écoulements distincts qu'il conviendra de distinguer dans l'outil d'analyse ?
- pour chaque zone immergée, l'outil d'analyse permet-il d'identifier et de quantifier les écoulements qui vont entrer puis sortir ? Sinon, quelles hypothèses et quelles informations permettent de simplifier le fonctionnement analysé ?
- pour chaque cheminement significatif de l'écoulement identifié dans le schéma topologique, existe-t-il bien une représentation conceptuelle équivalente dans l'outil d'analyse ?
- pour chaque île et chaque dérivation de moulin, le modèle tient-il compte de la séparation des écoulements, et sinon, quels sont les indices permettant de valider l'hypothèse simplificatrice ?
- lorsque des connections conditionnelles existent entre plusieurs zones, comment le prestataire a-t-il réglé (ou étalonné) les paramètres significatifs, à partir de quelles données ?

Quelle que soit la situation, le maître d'ouvrage ne devrait jamais laisser cette question de l'adéquation entre le modèle d'analyse choisi et la situation hydraulique du secteur d'étude faire l'objet d'un traitement diffus ou implicite par le prestataire.

Au choix de l'outil d'analyse se rattachent les choix des paramètres de calcul. Ceux-ci sont plus spécialisés et sont difficiles à contrôler directement. Il est toutefois intéressant pour le non-expert de demander au prestataire la fourniture des fourchettes usuelles de valeurs prises par chaque paramètre et la signification (qualitative) des bornes.

3.5. pertinence du calage de l'outil d'analyse

Tout outil d'analyse hydraulique, qu'il s'agisse d'une formule empirique ou d'un modèle numérique complexe, est une formulation générale ou théorique représentative d'une tendance ou de propriétés spécifiques des écoulements, encadrée par des hypothèses explicites, et comprenant des paramètres ajustables en fonction des conditions particulières du site à l'étude.

Le calage (ou « étalonnage ») des paramètres ajustables est une étape décisive pour la qualité de l'étude : il permet de vérifier quantitativement le respect des hypothèses de validité de l'outil d'analyse, et de s'assurer de la concordance entre les simulations et la réalité modélisée.

Lorsque les données de description de la réalité (ou points de calage) manquent, le calage consiste essentiellement à choisir des valeurs pertinentes des paramètres en similitude avec des situations hydrauliques analogues et mieux connues, qui peuvent être présentées et expliquées.

Lorsque les données de description de la réalité abondent, le calage n'en est pas forcément facilité. Le **thème 4 – données hydrauliques** a montré combien les informations descriptives d'un même événement hydrologique peuvent être incertaines sans pour autant être fausses. Il n'est toutefois pas question de laisser un prestataire indelicat se contenter d'une simple appréciation de la moyenne des écarts et d'un commentaire laconique et commode sur le peu d'influence de cet écart moyen.

L'analyse de la qualité du calage doit être plus fine, en précisant :

- l'écart absolu entre l'information et le calcul en chaque point de calage ;

- le graphique du profil en long de la ligne d'eau et des points de calage pour apprécier visuellement ces écarts, à l'aide d'une échelle de représentation significative à cet égard ;
- pour chaque tronçon homogène, la pente moyenne calculée et la pente moyenne connue pour les lignes d'eau simulées ;
- à l'aide des points précédents, la nature générale des écarts constatés (translation globale de portions de la ligne d'eau, rotation par rapport à un point à identifier, etc) et les explications relativement au fonctionnement hydraulique du secteur d'étude.

La précision que l'on est en droit d'attendre d'un calage dépend essentiellement des informations disponibles pour décrire la réalité, tant au point de vue des données hydrauliques de calage que des données topographiques. Les analyses fines de ces deux sujets (cf. en particulier **thème 4 – données hydrauliques**) doivent permettre de conclure à des appréciations de la précision attendue du calage.

D'une manière générale, compte tenu des incertitudes usuelles, sur un cours d'eau naturel, en régime fluvial, on pourra retenir :

- que le maître d'ouvrage est en droit d'attendre un écart sur les niveaux d'eau inférieur ou égal à 10 cm ;
- qu'un écart compris entre 10 et 20 cm sera considéré comme satisfaisant sous réserve de la concordance des tendances générales (pente du profil en long et concordance de niveaux meilleure en plusieurs autres points) de l'écoulement ;
- qu'un écart supérieur à 20 cm n'est pas satisfaisant, à moins d'être localisé précisément à un endroit que l'analyse des données hydrauliques au point de vue de l'information disponible. Il devra être accompagné d'un commentaire de la part du bureau d'études.

Ces limites indicatives peuvent être amendées pour les cours d'eau à pente très faible et sur les tronçons de cours d'eau très courts, en fonction du dénivelé moyen entre les limites amont et aval du secteur d'étude. En effet, si le dénivelé est de 60 cm sur 6 km (pente en forte crue de 1/10.000^{ème}), un écart compris entre 10 et 20 cm est moins admissible que si le dénivelé était de 180 cm (pente de 3/10.000^{ème}).

Même si l'écart moyen constaté est finalement assez modeste, les écarts doivent être analysés point de calage par point de calage, et surtout, les tendances de l'écoulement doivent être fidèlement restituées. Ainsi, le maître d'ouvrage ne devrait pas se satisfaire d'une modélisation qui fournit, pour les situations de calage, une ligne d'eau de pente globalement différente de la pente des mesures de calage, quand bien même l'écart en chaque point resterait dans une enveloppe satisfaisante, avec une valeur proche de zéro vers le milieu du secteur modélisé, et une valeur (absolue) maximale aux extrémités. En effet, la dynamique d'écoulement, dont la pente est le paramètre le plus significatif, n'est pas fidèlement représentée dans un tel cas, et les réactions de l'écoulement aux modifications de cette dynamique ne peuvent être correctement prédites.

3.6. cohérence des résultats

Il arrive bien plus souvent qu'on ne le croit qu'un chargé d'études concentre tant son attention sur la détermination au plus d'une ligne d'eau en un endroit donné, qu'il en oublie de s'assurer de la cohérence d'ensemble des résultats qu'il obtient.

L'hydraulique d'un cours d'eau est un domaine intégrateur des influences de la topographie et de l'hydrologie, à tel point que toute variation significative du profil en long doit trouver une explication dans une combinaison particulière de ces facteurs.

Le maître d'ouvrage devrait au moins exiger un profil en long des lignes d'eau de résultat associé à un profil en long du fond du lit mineur, et si possible, superposé à ce dernier, un

profil en long de la ligne de charge hydraulique. Et il devrait demander au prestataire des explications pour :

- tout écartement visible entre le profil en long des niveaux et le profil en long de la charge hydraulique, qui traduit une accélération significative des écoulements ; un profil en long des vitesses moyennes devrait confirmer ce diagnostic en amplifiant les variations visibles ;
- toute brisure visible dans le profil en long de la ligne d'eau, qui traduit la présence d'une singularité hydraulique ;
- toute discontinuité entre deux branches de lignes d'eau calculées séparément, qui traduit souvent une erreur dans la condition limite aval de la branche amont, prise différente de la cote amont obtenue pour la branche aval, ou encore une erreur dans le débit de projet retenu dans l'une ou l'autre branche.

3.7. vérification des hypothèses de calculs

Lorsque l'analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude a conduit le prestataire à simplifier ses calculs selon des hypothèses de prépondérances de phénomènes, il lui appartient de démontrer la pertinence de ces hypothèses, en vérifiant que les ordres de grandeur relatifs des phénomènes négligés par rapport aux phénomènes calculés sont effectivement en faveur des simplifications opérées.

Par ailleurs, lorsque le prestataire a identifié des singularités hydrauliques dans sa modélisation, il doit avoir ensuite réalisé un calage des paramètres dimensionnants. Les lois de fonctionnement des seuils, piles de pont et autres ouvrages mobiles comportent toujours un paramètre de forme, un coefficient de débit, un coefficient de perte de charge qui demeure à l'appréciation du modélisateur. Il appartient donc au prestataire d'expliquer ses choix quant aux valeurs de ces paramètres.

4. Les tests de sensibilité

4.1. de l'incertitude en hydraulique

La complexité des écoulements hydrauliques dans une géométrie naturelle de lit elle-même complexe, avec des interactions perturbées par les fluctuations du type de couverture végétale des sols immergés, rend tout calcul hydraulique sujet fortement à l'incertitude.

La possibilité de disposer, grâce aux outils numériques de calcul hydraulique, de lignes d'eau fournissant des niveaux d'eau calculés au centimètre ou au millimètre près ne doit jamais masquer l'incertitude inhérente au modèle hydraulique. **Seuls les plus inexpérimentés des hydrauliciens peuvent encore afficher une confiance absolue dans les résultats de leurs calculs.**

A contrario, cette incertitude ne doit pas jeter un opprobre systématique sur les outils d'analyse hydraulique, numériques ou physiques à échelle réduite. Car si elle est pratiquement inévitable et à certains égards irréductible, elle n'en est pas moins connaissable, et dès lors, les décisions qui doivent découler des résultats de ces calculs peuvent être éclairés par cette connaissance.

Si les tâches usuelles de l'étude hydraulique peuvent être assurées par un hydraulicien peu expérimenté sous le contrôle d'un hydraulicien plus confirmé, le recours à un hydraulicien expérimenté peut être décisif pour la phase d'appréciation des marges d'incertitudes dans lesquelles devra se former la décision du maître d'ouvrage.

L'incertitude ne contrarie pas foncièrement l'analyse hydraulique : le calage des paramètres ajustables permet de faire coïncider « de force » les résultats de calcul avec les données disponibles, à quelques écarts interprétables près. Mais l'incertitude demeure lovée dans le meilleur des calages. En effet, les paramètres ajustables calés contiennent

une fraction de valeur « vraie », représentative fidèlement de la réalité des écoulements, et une fraction de valeur « fausse », absorbant la part d'incertitude au droit du point de calage sur lequel l'hydraulicien a ajusté son calcul.

4.2. les sources de l'incertitude

Les sources de l'incertitude sont nombreuses :

- les données mesurées, soumises aux incertitudes de la mesure elle-même ;
- la représentativité des données peut être affectée par leur provenance, leur âge, etc ;
- les hypothèses faites par l'hydraulicien pour remplacer les données manquantes ;
- les hypothèses faites par l'hydraulicien pour mettre en œuvre un outil d'analyse ;
- l'évolutivité des données significatives.

A ces sources « techniques » d'incertitude peut s'ajouter l'incertitude « décisionnelle » liée aux choix de la maîtrise d'ouvrage pour la définition sécuritaire ou non des hypothèses de travail (notamment, choix d'un débit de projet dans un intervalle de confiance). Cette incertitude-ci ne nous paraît cependant pas devoir être traitée sur le même plan que les incertitudes « techniques », à l'aide de simples tests génériques de sensibilité, mais plutôt, par l'élaboration d'un scénario « moyen » et d'un scénario « précaution » ou encore d'un scénario « minorant ».

4.2.1- les incertitudes liées aux mesures de données

Les mesures d'altitudes (de sol, de lit mineur, de laisse de crue, de niveau d'eau, d'ouvrage hydraulique, etc) par levés terrestres sont rendues difficiles par l'emplacement des informations recherchées, souvent éloignées des lieux de concentration urbaine et des infrastructures routières où l'on trouve usuellement des points de repère altimétriques de l'IGN. Le géomètre est souvent contraint à un cheminement relativement long pour rattacher l'altitude recherchée, à travers des lieux ruraux qui perturbent fréquemment la visée (végétation arbustive, haies), et ne dispose que rarement d'un deuxième point de rattachement permettant de boucler le cheminement dans les règles de l'art. On n'espère jamais mieux qu'une incertitude moyenne de +/- 5 cm sur de telles mesures, et il n'est pas anormal de considérer une incertitude de +/- 10 cm lorsque les conditions de nivellement sont difficiles.

Les mesures d'altitudes dans le lit majeur par télémétrie (photogrammétrie, laser aéroporté, etc), outre les incertitudes statistiques liées à l'échelle de prise de vue, peuvent poser problème dans les zones humides où le couvert végétal fausse l'information recueillie. La précision des données descriptives du lit moyen le long des cours d'eau peut s'en trouver perturbée. Cette précision, en planimétrie, et en altimétrie, est directement liée aux échelles des clichés pour la photogrammétrie ; elle est annoncée d'une dizaine de centimètre en altimétrie, et d'environ 50 cm en planimétrie, pour la technique du laser aéroporté³.

Les mesures de débits aux stations hydrométriques sont soumises à une incertitude directement liée à la technique de jaugeage. Mais plus généralement, lorsque les simulations concernent des débits de fortes crues, les valeurs fournies au niveau d'une station hydrométrique correspondent soit à un jaugeage forcément délicat de la pointe de crue, soit à une extrapolation de la courbe de tarage de la station. Il est commun de considérer que les débits disponibles pour des stations jaugées sont à +/- 10%, et que les extrapolations de débits de fortes crues sont à +/- 20% près. Attention à ne pas confondre

³ Cf. Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques. CETE Méditerranée, juin 2001.

ces incertitudes liées à la mesure avec l'intervalle de confiance relatif à l'ajustement statistique des débits permettant d'associer une valeur de débit à une période de retour donnée. On se reportera ici au *thème 3 - données hydrologiques*.

4.2.2- les incertitudes liées à la représentativité de l'information

Quand bien même on ferait abstraction de l'incertitude de mesure, les données dont on recherche la valeur portent en elles-mêmes une incertitude liée à leur représentativité relative à ce pour quoi on souhaite les employer.

Ainsi, une valeur de débit de pointe qui ne correspond pas exactement à la hauteur maximale mesurée, une laisse de crue qui ne reflète pas véritablement le niveau atteint par les eaux au droit du lit actif, un profil en travers dont le positionnement est biais par rapport à l'écoulement, ou tombe exactement sur une singularité topographique mineure mais non-négligeable, jettent une ombre sur l'étude.

Les analyses conduites au niveau des thèmes **3 - données hydrologiques**, et **4 - données hydrauliques** permettent de quantifier les valeurs probables de ces incertitudes.

4.2.3- les incertitudes liées aux données reconstituées

Plusieurs situations exigent de la part de l'hydraulicien qu'il dispose d'une information spécifique pour effectuer un «forçage» de son calcul hydraulique par une loi hydraulique : seuil, déversoir, moulin, ouvrages de décharge, barrage de navigation, et plus généralement : section de contrôle, etc.

Quand bien même on disposerait de données mesurées à cet endroit en nombre suffisant pour caler leurs paramètres ajustables (coefficients de débit notamment), les lois hydrauliques à mettre en œuvre comprennent elles-mêmes une incertitude qui prend une grande importance lorsque la situation de projet est éloignée de la situation de référence.

L'analyse comparée de différents types de lois hydrauliques disponibles montre que les lois de déversoirs sont les seules qui comportent une sensibilité significative, et que cette sensibilité est en grande partie liée au type de loi choisie. Rien ne permet de préférer objectivement une loi à une autre, aussi la sensibilité a-t-elle été quantifiée par une fourchette fixe d'écart à l'amont immédiat du seuil.

A titre d'exemple, dans le cadre de la modélisation de seuils de biefs de navigation, selon le type de loi hydraulique choisi (Carlier, EDF-LNHE, USACE), en fonction de l'estimation des coefficients de débit et de noyage notamment, et en l'absence de contournement en lit majeur, la formule d'estimation d'une charge amont en fonction d'un débit franchissant une crête de seuil mince ou épais en régime noyé ou dénoyé induit une incertitude de +/- 15 cm.

4.2.4- les incertitudes liées aux hypothèses de modélisation

Dans le cas où la situation étudiée (topologie hydraulique, conditions hydrologiques et hydrauliques, topographie) est compatible avec les hypothèses de validité des outils d'analyse mis en œuvre, il est prouvé que la sensibilité des calculs aux hypothèses «internes» de la modélisation numérique est quasiment nulle⁴. Ces incertitudes sont donc intégralement négligeables.

Les hypothèses «internes» testées sont :

- la valeur du coefficient de Boussinescq prise égale à 1, supposant une parfaite homogénéité de la répartition des vitesses dans un profil en travers ;

⁴ C'est-à-dire que l'explicitation des incertitudes pesant sur ces hypothèses internes n'occasionne qu'une variation infime (inférieure à 1 unité de coefficient de Strickler), et donc, non-significative, du paramètre usuel de calage.

- la valeur du pas de planimétrage pour la description d'un profil en travers.

Par contre, le choix de l'espacement (et donc, du nombre total) de sections de calcul a une influence significative (plusieurs dizaines de centimètres en certains points) sur les résultats.

4.2.5- incertitudes spécifiques liées au régime transitoire

Au préalable, il convient de mentionner les difficultés liées au choix des hydrogrammes de projet (cf. *thème 3 - données hydrologiques*) qui conditionnent les résultats d'une modélisation réalisée en régime transitoire, à savoir :

- que la construction des hydrogrammes de projet doit être réalisée en fonction de l'objectif recherché de la modélisation : une crue réelle exceptionnelle en débit de pointe peut s'avérer courante en volume. Cette construction doit permettre une interprétation satisfaisante en terme de fréquence de l'événement modélisé ;

- que cette construction doit aussi tenir compte du type de crue modélisée : répartition spatiale et concomitance des apports sur le bassin, onde de rupture de digue ou de barrage...

Le CETMEFa, par ailleurs, montré :

- d'une part combien la non-prise en compte du laminage de l'onde de crue pouvait fausser l'étalonnage des valeurs de coefficients de rugosité de lit majeur, de manière croissante depuis l'amont vers l'aval,

- et d'autre part que la construction de la courbe de tarage (débit en fonction du temps) nécessaire en condition limite aval d'une simulation en régime transitoire était très sensible à la position des jaugeages de référence dans l'hystérésis de crue (avant ou après l'instant du passage de la pointe de débit), dès que la pente est assez faible pour provoquer une hystérésis ample.

Ces influences combinées font peser une forte incertitude sur le calage de l'outil de simulations, c'est-à-dire qu'une fraction importante des paramètres ajustés est « fausse ». Ceci n'a pratiquement aucune incidence si les événements de projet sont du même ordre que les événements de calage (moins de 20% de différence de débit de pointe). Ainsi dans tous les autres cas, et si ni la topologie du site (par exemple influence de la marée sur la cote aval dans le cadre d'une modélisation en régime fluvial), ni les autres résultats recherchés (durée de submersion, volume...) l'exigent, il est déconseillé de recourir à une modélisation en régime transitoire en vue de déterminer les niveaux maximum atteints.

Malgré tout, l'aspect dynamique de la crue est une donnée importante pour apprécier les objectifs de l'étude, la sensibilité de la courbe de tarage doit être évaluée :

- si elle est implantée à moins de 15 km de l'aval de la zone d'objectifs : en testant sa translation en altitude d'une valeur de +30 cm.

- si elle est implantée entre 15 et 30 km de l'aval de la zone d'objectifs, et si la pente moyenne de la rivière en crue est inférieure ou égale à 1/10.000 : en testant sa translation en altitude d'une valeur de +10 cm.

Il n'est pas inutile de rappeler ici qu'il est préférable (aux points de vue technique et économique) de choisir une modélisation en régime permanent du maximum de l'événement hydrologique plutôt qu'une modélisation en régime transitoire de l'ensemble de l'événement hydrologique dès lors que la longueur de cours d'eau à étudier est inférieure à 30 km pour des pentes inférieures à 1/10.000 ou à 15 km pour des pentes supérieures à 5/10.000, sauf dans le cas de crues éclairs ou dans le cas où la durée de submersion, la modification du laminage de l'onde de crue, la modification du volume écoulé ou encore les durées de submersion sont des données décisives pour le choix final du maître d'ouvrage.

Le prestataire peut s'affranchir de ces tests de sensibilité en construisant artificiellement une condition limite aval en prolongement de son modèle vers l'aval à pente identique sur une distance adaptée (15 à 30 km).

4.2.6- L'évolution des données significatives

La quasi-totalité des outils d'analyse hydraulique supposent que les caractéristiques géométriques des lits mineur et majeur sont invariables durant l'événement hydrologique simulé. Ceci est bien sûr vérifié lorsque l'évolution géométrique du lit a lieu à des échelles de temps très supérieures (années, décennies, siècles) à celles des écoulements (secondes, minutes, heures, voire jours). Mais dans plusieurs situations, il faut tenir compte d'évolutions du lit susceptibles de perturber les écoulements, ou du moins, leur simulation.

Un premier cas de figure concerne la simulation d'événements si anciens qu'il y a fort à craindre que le lit mineur, le lit majeur et les conditions hydrauliques résultantes aient significativement changé, rendant caduques les laisses de crues notamment. A moins de disposer des informations historiques correspondantes, et de simuler l'ensemble de la configuration hydrologie – hydraulique – topographie ancienne, le prestataire est obligé de se limiter à une étude du détarage de la ou des stations hydrométriques disponibles, permettant d'associer aux laisses de crues anciennes une situation hydrologique actualisée en fonction de l'état actuel du lit. Il s'agit toutefois d'une étude hydrologique en soi, qui doit faire l'objet de prescriptions spécifiques telles que décrites dans le thème 3 – données hydrologiques, et de laquelle le prestataire peut conclure quant à la fourchette d'incertitudes pesant sur les données résultantes.

Un deuxième cas de figure concerne les fluctuations rapides des fonds bathymétriques, voire du lit majeur, pendant l'événement hydrologique. Il peut s'agir d'un transport solide intense en lit mineur (la Garonne à Bordeaux pendant les marées, la Loire pendant les crues, etc), d'une tendance au dépôt de matériaux en lit majeur (la Meuse) ou encore d'une destruction d'obstacle (remblai routier, ferroviaire, etc) à l'écoulement en lit majeur. De telles occurrences devraient avoir été identifiées dans les étapes d'analyse des données, et les valeurs de fluctuations potentielles, quantifiées (et donc, utilisables dans les tests de sensibilité). Si la quantification de tels phénomènes clairement identifiés n'a pu être possible, du fait d'un manque de données de comparaison notamment, le prestataire pourra s'appuyer sur les valeurs connues suivantes pour proposer des valeurs relatives à sa propre situation d'étude :

- le Loir peut voir son fond fluctuer de +/- 50 cm pendant une forte crue ;
- la Loire peut voir son fond fluctuer de +/- 100 cm, voire 200 cm dans les zones d'écoulement rapide ;
- la Meuse peut déposer jusqu'à 50 cm dans les points bas de son lit majeur à la décrue d'une forte crue.

Il faut toutefois noter que si le prestataire dispose d'événements hydrologiques de calage suffisamment intenses pour être le siège de mobilité significative des fonds, son calage des paramètres ajustables du modèle sur ces événements intègre de facto l'existence de cette mobilité. Aussi, les tests de sensibilité à une mobilité quantifiée au jugé devrait être réservée aux études pour lesquelles les événements hydrologiques de calage sont nettement moins intenses que les événements hydrologiques de projet (débit de calage inférieur de plus de 20% au débit de projet).

Enfin, on se souviendra, qu'au delà de la problématique liée au caractère évolutif des données significatives pour la réalisation d'une modélisation hydraulique, la compréhension des phénomènes constatés et la détermination de leur évolution dans le temps sont des compléments souvent indispensables, en particulier lorsque l'étude répond à un besoin de dimensionnement d'ouvrages ; les approches hydrogéomorphologique et courantogique (modélisation bidimensionnelle) permettent d'y répondre.

4.3. description des tests de sensibilité

Les sources d'incertitudes sont si nombreuses et si variées qu'il serait vain et contre-productif de tenter de décrire les tests de sensibilité les concernant, au risque d'en oublier certains qui n'apparaîtraient qu'au fur et à mesure de l'analyse des données disponibles par le prestataire.

Il s'agit plutôt ici de décrire les tests de sensibilité tels que le prestataire devra les concevoir durant son étude. Le maître d'ouvrage veillera à expliciter dans son cahier des charges les attentes méthodologiques qu'il souhaite reprendre du présent paragraphe, et bien sûr, le temps ou la fraction d'étude qu'il souhaite voir consacré à ces tests de sensibilité.

Au croisement de cette trame méthodologique souhaitée et de la consistance prévue au contrat, le prestataire et le maître d'ouvrage pourront convenir, en temps utile, des tests de sensibilité auxquels il sera effectivement procédé au vu de la révision des objectifs de l'étude d'une part, et de l'analyse des données disponibles et des contraintes hydrauliques d'autre part.

Il suffit de savoir qu'en général, un test de sensibilité correspond à la reprise d'un calcul en modifiant les conditions aux limites ou les données géométriques générales, ce qui ne prend que quelques heures supplémentaires par série de tests portant sur un type de données.

Il faut distinguer les tests de sensibilité portant sur les valeurs imposées au modèle, des tests de sensibilité portant sur les paramètres de calage du modèle.

4.3.1- étape n°1a : les tests de sensibilité portant sur les valeurs imposées

Dans toute modélisation, et par extension, dans tout calcul hydraulique, les conditions aux limites sont des données intangibles à partir desquelles se déduisent toutes les autres quantités, aux paramètres de réglage près. Aussi, toute erreur portant sur ces conditions aux limites s'impose sur toute une zone du calcul. De même, lorsqu'une loi hydraulique est utilisée pour restituer le fonctionnement d'un ouvrage de régulation de niveaux ou de débits, le calcul subit un forçage direct et restituera nécessairement les valeurs imposées, qu'elles soient justes ou fausses.

Si l'erreur porte sur la valeur du débit, toutes choses étant égales par ailleurs, l'étalonnage des paramètres de réglage tendra à corriger cette erreur sur tout le linéaire étudié et concerné par cette erreur de valeur de débit. Les valeurs ainsi étalonnées pourront dévier significativement par rapport aux valeurs usuelles ou attendues, et alerter le technicien sur une probable erreur de valeur de débit. Il est donc raisonnable de considérer que cette erreur devrait être décelée par le technicien au cours de son calcul, ou, en dernière extrémité, par le technicien pressé de justifier ses valeurs aberrantes d'étalonnage lors de la présentation de ses résultats (cf. §3.5).

Par contre, si l'erreur porte sur la valeur d'une altitude à la limite aval du modèle, et si elle demeure dans une gamme raisonnable (inférieure à 50 cm environ), c'est-à-dire qu'elle correspond à une mésestimation « normale » plutôt qu'à une valeur aberrante, rien ne permettra de déceler l'erreur comme telle : les remous d'abaissement ou d'exhaussement résultants ne seront pas significatifs. Ce cas-là mérite tout particulièrement une étude de sensibilité.

L'analyse des données hydrauliques a normalement fourni au prestataire les informations nécessaires pour jauger la qualité relative de sa condition à la limite aval. S'il n'a pas directement quantifié la fourchette des valeurs équiprobables prises par cette condition à la limite aval, faute d'information suffisante ou faute de demande de cela dans le cahier des charges, l'étude de sensibilité doit être menée, sur des valeurs génériques.

Nous proposons des valeurs de base qui peuvent être amendées au cas par cas en fonction, par exemple, d'expériences de calculs antérieurs dans la même zone ayant fourni des idées plus « régionalisées » des amplitudes des incertitudes.

Nous recommandons de tester deux situations alternatives à la situation Z_{aval} sur laquelle est fondé le calcul de référence : l'une avec $Z_{\text{aval}}+20\text{cm}$, l'autre avec $Z_{\text{aval}}-20\text{cm}$.

De même, lorsque la détermination de la loi de fonctionnement hydraulique d'un ouvrage a laissé entrevoir une incertitude quant aux paramètres décisifs (coefficient de débit, par exemple), le prestataire devra établir la fourchette des valeurs de niveau d'eau correspondant à la fourchette de valeurs équiprobables de ces paramètres décisifs.

A partir de cotes d'eau connues, le débit estimé par les lois de seuil varie dans une fourchette d'amplitude de 30% centrée sur la valeur moyenne. L'emploi d'au moins deux formules d'estimation différentes permet de préciser la fourchette du test de sensibilité. Dans le cas où les deux formules choisies donnent le même couple débit – niveau amont, un test de sensibilité sur $Z_{\text{amont}}(0,85.Q)$ et $Z_{\text{amont}}(1,15.Q)$ est recommandé.

A titre d'exemple, dans le cadre de la modélisation de seuils de biefs de navigation, et en l'absence de contournement de l'écoulement en lit majeur, lorsque le débit est connu et que la loi hydraulique sert à déterminer le niveau d'eau amont en régime dénoyé, nous recommandons, de tester deux situations alternatives à la situation $Z_{\text{amont}}(Q)$ sur laquelle est fondé le calcul de référence : l'une avec $Z_{\text{amont}}(Q)+15\text{cm}$, l'autre avec $Z_{\text{amont}}(Q)-15\text{cm}$.

Enfin, lorsque la loi hydraulique a pu être étalonnée avec des valeurs fiables de débit et de niveaux d'eau, il est inutile de tester la sensibilité de cette loi.

4.3.2- étape n°1b : les tests de sensibilité portant sur les paramètres de calage

La problématique des incertitudes pesant sur les résultats d'une étude hydraulique comprend deux étapes distinctes :

- d'une part (étape n°1), le modélisateur, face à un jeu de données dont il est tributaire, fait un choix de valeurs du paramètre intégrateur K supposé minimiser l'écart entre son outil de calcul et la réalité ;

- d'autre part (étape n°2), disposant de son outil de calcul supposé étalonné, il procède à une extrapolation qui comporte en soi une incertitude que le modélisateur ne peut maîtriser, et qui dépend des conditions générales de l'extrapolation.

On peut donc considérer que le modélisateur, fort de sa connaissance des meilleurs choix possibles de valeurs de K par rapport à son jeu de données, peut présumer de la validité relative de son choix, en la traduisant sous forme d'une fourchette de valeurs équivalentes de K (étape n°1). Puis, il peut prédire l'incertitude pesant sur son résultat final à partir du faisceau de profils en long de ligne d'eau obtenu à partir de la fourchette de valeurs équivalentes de K (étape n°2).

Un calage habituel de modèle hydraulique correspond à une minimisation plus ou moins pragmatique des écarts entre les valeurs issues du calcul (niveaux d'eau calculés) et les valeurs de référence (laises de crues). En fait, ces valeurs de référence ne sont généralement pas des valeurs intangibles, mais elles comprennent elles-mêmes une certaine incertitude. Si bien qu'on peut considérer que, pour un jeu de données topographiques et hydrauliques, il y a en fait plusieurs calages équiprobables.

Dès lors qu'on ne considère plus une donnée de calage comme intangible, mais plutôt, comme intervalle, la minimisation comme stratégie de calage ne paraît plus pertinente. Il faut plutôt viser l'inscription de l'ensemble de la ligne d'eau calculée dans tous les intervalles des données de calage.

Or, l'inscription des lignes d'eau dans les intervalles des données de calage peut se faire par valeurs inférieures, c'est-à-dire que la ligne d'eau calculée correspondante s'inscrit dans tous les intervalles de référence, en passant par au moins une borne inférieure de

l'un de ces intervalles. Mais elle peut aussi se faire par valeurs supérieures, c'est-à-dire que la ligne d'eau calculée correspondante s'inscrit dans tous les intervalles de référence, en passant par au moins une borne supérieure de l'un de ces intervalles.

Les jeux de valeurs des paramètres de calage correspondant d'une part au calage « minorant » et d'autre part au calage « majorant » déterminent l'enveloppe de la ligne d'eau réelle pour l'événement de calage.

4.3.3- étape n°2 : analyser le faisceau des lignes d'eau

Indépendamment de tout autre calcul de sensibilité portant sur le calage, traité au paragraphe suivant, le calcul de sensibilité sur la fourchette des conditions à la limite aval (dans le cas d'une modélisation en régime fluvial) fournit une enveloppe de valeurs (et donc, d'écarts par rapport à la valeur de référence émanant du calcul avant sensibilité) minorant et majorant la valeur « vraie » du niveau d'eau, et ce, sur toute une zone en amont de la condition à la limite dont on teste la sensibilité.

Les deux informations (sensibilité altimétrique en fonction de l'éloignement de la condition à la limite aval) sont cruciales pour juger de l'imprécision du calcul de référence. La première indique l'amplitude maximale de l'imprécision, la deuxième indique, par défaut, la zone (en amont de la zone sensible au test) qui ne subit plus l'influence de la condition à la limite aval. Si les recommandations du choix des limites de la zone de calcul (*thème 2 – analyse du fonctionnement hydraulique du secteur d'étude*) ont été suivies, le lieu de la limite aval a été choisi suffisamment en aval de la zone d'objectifs de résultats pour que la zone sensible au test ne la recoupe pas : en clair, le test de sensibilité effectué sur la contrainte aval (dans le cas d'une modélisation en régime fluvial) n'a alors pas d'impact sur la ligne d'eau calculée au droit du secteur d'études. Si tel n'est pas le cas, le test de sensibilité fournit, dans la zone d'objectifs, l'amplitude des imprécisions altimétriques, que le prestataire devra indiquer à côté de chaque information altimétrique issue de son calcul dans cette zone.

Exemple : au droit de la zone d'objectif, le test de sensibilité montre un écart compris entre -6 cm et + 4 cm. Il conviendra, dans la présentation finale des résultats de l'étude à cet endroit, d'indiquer, par exemple : « côte de référence pour le déclenchement de l'ouverture du vannage : 23,45^[23,39-23,49] m NGF IGN69 ».

Il est important de noter que le test de sensibilité n'est pas un test de validation ou de rejet du modèle, à moins de compromettre gravement l'utilité des résultats dans la zone d'objectifs. En particulier, lorsque l'étude vise à déterminer des impacts d'aménagements en vallée inondable, il suffit de savoir qu'une imprécision altimétrique raisonnable sur la ligne d'eau de référence n'invalide quasiment pas l'impact calculé par différence entre la ligne d'eau de projet et la ligne d'eau de référence, l'imprécision étant quasiment égale pour les deux lignes d'eau, et disparaissant de la quantification de l'impact lors de la soustraction.

4.4. spécifier les tests de sensibilité

La spécification précise des tests de sensibilité dépend directement des incertitudes du modélisateur face aux données qu'il manipule. Il est donc très difficile d'envisager cette spécification au stade de la rédaction d'un cahier des charges. Pour autant, si ces tests ne sont pas prévus dans le cahier des charges, le prestataire est en droit de refuser de les faire en surplus de sa prestation, même s'il en réalise quelques-uns, simples, de manière informelle, pour avoir une idée de cette sensibilité.

Le degré de formalisme des tests de sensibilité, souhaité par le commanditaire, peut par contre être précisé, ainsi que la méthode. Nous recommandons naturellement de reprendre la méthode proposée au § 3.3.3., mais il est possible que, pour une simple étude d'impact dans laquelle on est presque assuré de voir les erreurs systématiques commises au niveau des données de base s'annuler lors de la soustraction de l'état

aménagé de l'état de référence, le commanditaire se contente d'une analyse sur les seules valeurs imposées.

A cette commande spécifique doit correspondre un budget spécifique, seule garantie contractuelle de ce que les tests de sensibilité laissés à l'appréciation du modélisateur dans le cadre formel précisé par le commanditaire seront réalisés sérieusement sans empiéter sur les autres calculs de l'étude.

Une ligne doit donc être prévue dans le bordereau des prix. Une petite étude de sensibilité, portant uniquement sur les valeurs imposées, devrait coûter entre 500€ et 1500€. Une étude de sensibilité normale, portant à la fois sur les valeurs imposées et sur les paramètres de calage, devrait coûter entre 1500€ et 4000€ selon le nombre d'informations de calage. Si plusieurs événements font référence pour l'étude, ou si le prestataire doit tenir compte d'hypothèses invérifiables portant sur les ouvrages de régulation notamment, l'étude de sensibilité peut coûter entre 4000€ et 6000€ (mais dans un tel cas, l'étude complète sera également plus coûteuse en proportion).

5. Les produits de l'étude

Même dans les cas où le maître d'ouvrage (ou son éventuel AMO) a fait l'effort de formaliser un cahier des charges détaillé de spécifications, l'expérience montre que, lors de l'exécution de l'étude, la tendance naturelle non-seulement du prestataire, mais également, du maître d'ouvrage, est de se laisser porter par l'enchaînement naturel (intuitif) des tâches. Il arrive souvent que le prestataire, une fois l'étude démarrée, suive sa propre idée de l'étude, et que le maître d'ouvrage oublie de faire valoir les objectifs et les tâches précises qui avaient motivé ses spécifications de cahier des charges.

Un effort de formalisation des produits intermédiaires et définitifs permet de concrétiser les exigences du cahier des charges en éléments que le prestataire doit fournir et par lesquels le maître d'ouvrage s'assure de l'atteinte de ses objectifs.

Au-delà du strict suivi de l'étude, on peut également souhaiter que les réflexions nourries dans le cadre d'une étude portant sur un site donné soient capitalisées de manière à permettre à la maîtrise d'ouvrage, autant que faire se peut, d'exploiter les informations obtenues pour éclairer ses stratégies ultérieures d'aménagement sur ce même site. L'archivage, la propriété et les droits d'usage des produits de l'étude, ont fait l'objet du chapitre 3.4. du *thème 0 - fondamentaux d'une étude hydraulique*.

En outre, il nous paraît systématiquement nécessaire de prévoir, au niveau du marché, un délai maximum de validation de la part du maître d'ouvrage, des rapports provisoires et final : la réutilisation d'un modèle à plusieurs mois d'intervalle est, non seulement, délicate, mais il convient aussi, de préférence, que son exploitation soit réalisée par le même chargé d'études.

5.1. les notes intermédiaires et rapports provisoires

A chaque réunion, le maître d'ouvrage doit exiger la production préalable d'une note technique (paginée, datée, et signée) adossée ou non à une présentation vidéo-projetée, qui permettra d'asseoir la discussion et surtout la validation de l'étape sur un matériel objectif. Cela suppose naturellement que ces notes intermédiaires et autres rapports provisoires soient fournis par le prestataire au moins une semaine avant la date de réunion, pour laisser le temps à une réelle relecture de la part du maître d'ouvrage et de son assistance.

La présentation du prestataire et les discussions qui s'ensuivent avec la maîtrise d'ouvrage visent à expliquer la démarche employée, les hypothèses retenues, et par voie de conséquence, à justifier les résultats intermédiaires obtenus. Disposant de l'ensemble de ces informations écrites et orales, le maître d'ouvrage peut se prononcer formellement sur la validation du travail du prestataire, ou demander des précisions ou des compléments,

le cas échéant. Les décisions correspondantes font alors l'objet d'un document contractuel, auquel est joint la note du bureau d'études sur laquelle s'appuie le maître d'ouvrage.

Aussi, il convient, au niveau des délais du marché, d'intégrer le temps compris entre la fourniture des éléments écrits et oraux pour la validation, et la validation elle-même par le maître d'ouvrage. Cette disposition doit être prévue, soit au niveau des délais globaux de l'étude (en mentionnant un délai maximum de validation par le maître d'ouvrage⁵), soit en prévoyant des délais d'études propre à chaque phase, dont le démarrage est alors conditionné par un ordre de service spécifique. Seul un travail manifestement non-conforme au cahier des charges, ou manifestement insuffisant par rapport à la tâche demandée et aux engagements du prestataire dans son offre, peuvent justifier l'application de mesures de coercition à l'encontre du prestataire, sans suspension du délai d'exécution de l'ensemble de l'étude.

Lorsque la prestation porte sur la conception d'un ouvrage (cf. § 2.5.), la présentation d'une note intermédiaire est l'occasion d'examiner avec le maître d'ouvrage les différentes options (fussent-elles un peu caricaturales, c'est-à-dire, destinées à fournir des grandes tendances hydrauliques) qui se présentent, et de choisir l'orientation finale à suivre pour la conception définitive de l'ouvrage.

Il est important de noter que la forme de ces notes intermédiaires ne préjuge en rien de la forme du rapport final, et que ces documents sont des étapes de travail susceptibles d'évoluer en fonction des orientations de la maîtrise d'ouvrage et des calculs ultérieurs. L'exigence de la maîtrise d'ouvrage, au plan notamment de la forme de ces documents, doit donc être modulée en conséquence.

5.2. les annexes techniques

La fourniture des éléments de calcul et d'analyse mis en œuvre par le bureau d'études doit suivre un certain degré de formalisme si le maître d'ouvrage la désire. Il s'agit d'une tâche longue, fastidieuse, que le prestataire n'effectuera de bonne grâce que si le cahier des charges le spécifie, au contraire de quoi il ne le fera qu'*a minima*, sous une forme inexploitable par le maître d'ouvrage. Le maître d'ouvrage doit donc s'interroger sur l'utilité de réclamer ces données et d'en payer le prix, par rapport à son souhait de réaliser ultérieurement d'autres études dans le même secteur.

Lorsque des calculs ont été effectués dans un tableur (de type Excel, par exemple), le maître d'ouvrage peut en demander la fourniture, avec une notice de lecture.

Les fichiers de commande des logiciels utilisés peuvent être demandés. Les fichiers des données géométriques ou des conditions aux limites (notamment en cas de simulations en régime transitoire) peuvent également être demandés, éventuellement avec une version ASCII simple lisible dans n'importe quel éditeur de texte informatique.

Ce qui importe, dans le cadre de ce type de demandes, c'est de bien s'assurer que ces fichiers sont compréhensibles. Le prestataire devra fournir un fichier « lisez-moi.txt » dans lequel il explique le format d'organisation des fichiers qu'il fournit, la version du logiciel utilisé, les conditions de compatibilité avec les systèmes informatiques.

La fourniture du logiciel permettant de refaire les calculs sans l'assistance du bureau d'études est une option a priori séduisante, qui pose toutefois de graves problèmes. Le coût d'une telle licence, même bridée pour ne servir qu'à la répétition de calculs sur un modèle existant, est souvent élevé. La maîtrise du logiciel nécessite

- soit l'existence d'une interface conviviale, ce qui n'est généralement pas le cas pour les logiciels d'hydraulique, et d'une documentation didactique ;

- soit une prise en main accompagnée de compagnonnage, fort coûteuse.

⁵ A l'image de ce qui est prévu au niveau des marchés de maîtrise d'œuvre, où le délai de validation de chaque élément de mission, par le maître d'ouvrage, est spécifiquement mentionné au marché.

La plupart des expériences connues de livraison de logiciels montrent un investissement conséquent de moyens humains et matériels pour prendre en main l'outil, qui ne doit pas être sous-estimé par le maître d'ouvrage.

5.3. le rapport final

Le rapport final devrait être livré en version non-reliée (« reproductible ») et en version informatique compatible avec les logiciels d'édition de texte informatique.

Des exemplaires reliés peuvent naturellement être demandés, mais le maître d'ouvrage veillera à préciser le nombre d'exemplaires reliés contractuel.

La version informatique ne sera pas nécessairement modifiable (type Word, par exemple), et il est même préférable qu'elle ne le soit pas (type Acrobat Reader) : outre la question de la taille du fichier informatique (qui peut être facilement résolue par l'emploi du support de stockage adapté), la modification d'un rapport par le maître d'ouvrage peut dénaturer le propos du prestataire d'études tout en lui conservant en apparence son statut d'« auteur » du document.

Dans tous les cas, la livraison du rapport sur un support informatique devra viser des objectifs évidents de compatibilité et de pérennité. Ainsi, le maître d'ouvrage devrait indiquer les logiciels (et surtout leurs versions) dont il dispose pour lire ces rapports. Et le support devra être résistant : un CD-ROM paraît convenir pour la livraison. Il faut toutefois savoir que les CD-ROM ne sont pas réputés fiables au-delà de quelques années. Il appartiendra donc au maître d'ouvrage de s'assurer dans le temps du changement de version des documents livrés parallèlement aux changements de versions de ses propres logiciels, et de veiller à renouveler régulièrement le support de stockage des données informatiques.

5.4. les produits de communication

Bien souvent, l'étude hydraulique trouve un prolongement apparemment naturel dans le porté à connaissance de ses résultats, et surtout, de ses incidences en termes d'aménagements des cours d'eau et d'amélioration de leur gestion, auprès des « tiers concernés » (cf. thème 1). Ce prolongement est toutefois bien moins naturel qu'il y paraît, et un bureau d'études compétent pour assurer la conception d'un aménagement peut se révéler désarmé des bagages pédagogiques et infographiques pour mener à bien cette mission. A contrario, un infographiste aura souvent du mal à transposer clairement et à vulgariser les résultats d'une étude hydraulique pour laquelle il n'a pas de compétence spécifique sans trahir le propos de l'étude, tant l'hydraulique peut jouer des tours au bon sens commun.

La consultation devrait donc toujours spécifier cette demande du maître d'ouvrage pour alerter les candidats à la consultation sur la nécessité d'intégrer ce volet spécifique. Elle peut réclamer au prestataire

- qu'il s'associe avec un infographiste (ou démontre sa compétence en la matière à partir d'exemples d'autres études),
- qu'il se mette à disposition d'un infographiste avec lequel le maître d'ouvrage a un contrat direct, pour un forfait de disponibilité de plusieurs jours.

La participation du prestataire d'études aux réunions de présentation auprès des élus, du public, des associations, etc, devra être spécifiquement demandée. Elle ne peut exonérer le maître d'ouvrage de sa responsabilité de maître d'ouvrage, mais peut constituer un renfort appréciable lorsque le débat technique est biaisé par des incompréhensions de la chose hydraulique. Il s'agit toutefois d'un exercice éprouvant et chronophage, que les bureaux d'études peuvent facturer assez cher.

Annexe 7

Rendu cartographique de l'étude

Table des matières

1. introduction.....	2
2. informations à cartographier.....	2
2.1. Données de l'étude hydraulique.....	2
Données géométriques et géographiques.....	3
Données topographiques.....	3
Données en plan.....	6
Données hydrauliques.....	6
2.2. Résultats de l'étude hydraulique.....	7
Résultats types courants.....	7
Résultats atypiques et intermédiaires.....	11
3. Élaboration de la carte.....	13
3.1. Caractéristiques globales des cartes et objectifs.....	13
Cas des PPRI et AZI.....	16
3.2. Les supports cartographiques.....	16
3.3. La légende.....	22
3.4. Échelle et précision.....	23
Choix de l'échelle.....	23
Précision, résolution.....	24
Cohérence entre support cartographique et objets cartographiés.....	27
3.5. Représentation des éléments à cartographier.....	29
4. préoccupations d'archivage.....	30
5. Catalogue des outils de cartographie.....	31
6. rattachement à un SIG.....	34

1. introduction

L'objectif de ce chapitre est de résumer les pratiques en matière de cartographie des résultats d'études hydrauliques. Nous nous attachons en priorité à traiter du contenu des cartes, avec des éléments de mise en forme les plus importants.

La première étape d'une étude hydraulique comporte obligatoirement l'examen détaillé de l'objectif de l'étude en fonction de la problématique et des moyens. En particulier, les cartes sont un moyen de résumer les étapes de l'étude et de faire passer un message. Pour cela, la cartographie doit être prévue en fonction de trois aspects majeurs :

- Ce que l'on veut montrer
- Le public auquel est destinée la carte
- L'utilisation de la carte : rapport d'étude, communication, publication,...

L'examen de l'objectif de l'étude conduit à définir les grandeurs hydrauliques à évaluer et leur qualité (étendue géographique, débits de projet, incertitude,...) puis la méthode à utiliser (technique géomorphologique, modèle numérique,...). Ceci conduit à définir les résultats à attendre, c'est à dire les données brutes de la représentation cartographique. Ces données sont combinées via des manipulations de post-traitement (calculs de moyennes, sélection par types,...) qui sont tout à fait distincts et postérieurs aux calculs hydrauliques à proprement parler, pour aboutir aux données de la représentation cartographique.

2. informations à cartographier

2.1. Données de l'étude hydraulique

Généralement, la synthèse des données de l'étude, par exemple sur une carte, n'est pas nécessaire à l'élaboration des conclusions.

Cependant, ces données sont souvent utiles à la réflexion pendant l'étude, par exemple lors de points d'arrêt prévus pour décider d'une des orientations (d'aménagement par exemple) pressenties a priori.

Les données de l'étude sont par exemple celles utilisées dans une modélisation (topographie, données de calage, conditions aux limites hydrauliques). Mais elles peuvent aussi être constituées de résultats d'études antérieures (limites de zones inondables dans un contexte historique d'occupation des sol, carte géomorphologique,...), utiles pour alimenter une étude basée sur la comparaison et la réflexion sur une stratégie, sans nécessité d'une modélisation numérique.

L'intérêt de la cartographie des données est :

- L'aide à l'interprétation des résultats lorsque la précision ou la concentration des données peut expliquer un écart avec des résultats attendus (calage des modèles)
- La consignation de la qualité des données (origine, précision,...), utile lorsque ces données sont susceptibles d'être réutilisées ultérieurement (voire insérées dans une base de donnée)
- L'utilisation comme support (fond de plan) pour des cartes de résultats qu'il faut positionner en plan avec une précision fine (études de variantes de tracés routiers par exemple)
- La présentation de la méthode utilisée pour un souci de communication
- La justification de l'ampleur du travail de tri et saisie, voire complément, pour constituer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de précision et densité adaptées au type de modèle ou à la méthode utilisée (cf. Chapitre 7).

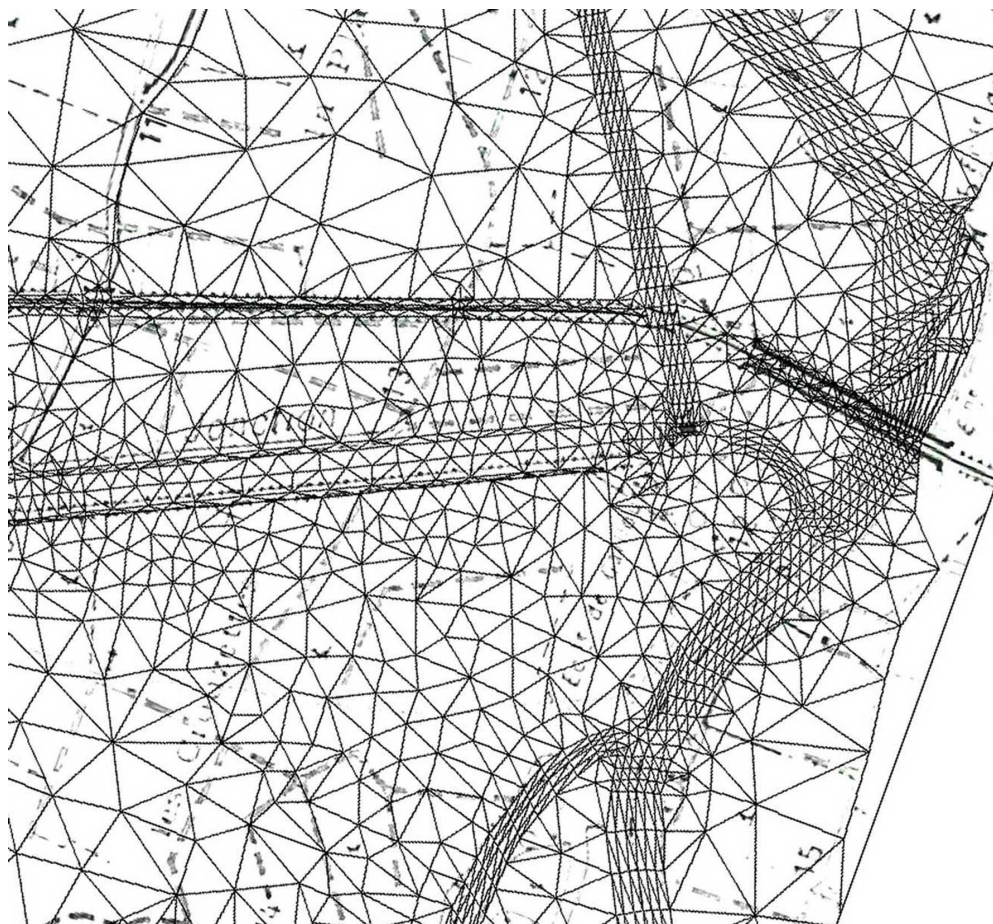
Données géométriques et géographiques

Données topographiques

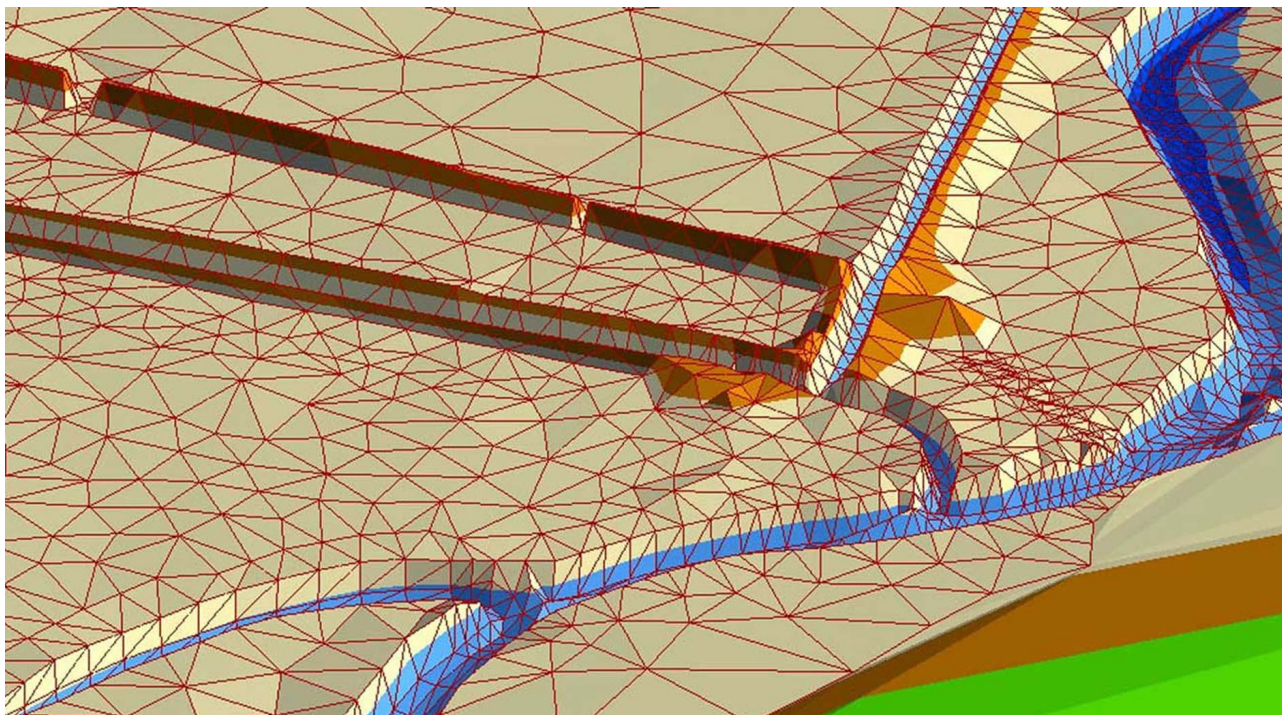
Il s'agit des données géométriques (topologie du lit majeur, géométrie géoréférencée des ouvrages,...) contenant une information de cote.

Dans le cas d'études hydrauliques nécessitant un modèle numérique, il est souvent nécessaire de savoir jusqu'à quel degré de résolution spatiale le maillage, et donc le MNT, a été élaboré. Par exemple, pour une étude d'écoulement autour d'ouvrage tels que des endiguements linéaires (digues, remblais routiers, remblais d'accès), l'objectif de l'étude peut conduire à ne représenter que les pieds du talus et une ligne de crête (par exemple la ligne centrale pour une digue trapézoïdale), ou bien à affiner le maillage pour représenter la largeur de la crête de la digue.

Ceci entraîne la définition de plusieurs étapes de l'étude, dont la cartographie dépend. En effet, c'est l'objectif de l'étude qui conduit à définir la finesse du maillage. Cette dernière implique à son tour l'échelle de représentation des résultats, mais aussi le type de représentation cartographique : en effet, une représentation de détail en 3D peut être utile d'une part au bureau d'étude exécutant et au bureau d'étude contrôleur pour vérifier et valider son maillage, d'autre part à tous les participants à l'étude pour interpréter d'éventuels résultats problématiques.



Exemple de maillage 2D coté, vue en plan [CETEméditerranée]



Exemple de maillage 2D coté, vue 3D [CETEméditerranée]

De même, pour un modèle à casiers, un plan des limites de casiers est utile pour apprécier l'adéquation entre la taille des casiers et les gradients d'altimétrie du terrain, surtout en cas de difficulté d'interprétation des résultats qui sont liés à une moyenne sur chaque casier. Ainsi, le fond de la carte correspondante devrait être constitué d'une carte d'altimétrie plutôt que d'un SCAN 25 qui ne permet de repérer que les ruptures de pente les plus importantes. Du point de vue de la lisibilité, notons qu'un fond de plan constitué de points altimétriques est très peu lisible (trop de texte, pas d'interpolation permettant d'apprécier les variations relative de cote en plan). Une carte d'iso valeurs de cotes en couleur permet par contre une vue d'ensemble, avec l'adjonction d'un SCAN 25, et conserve la lisibilité puisque seules les limites des casiers sont représentées.

La position des profils en travers utilisés pour un modèle 1D peut être représentée selon le même principe, à ceci près que le nombre de sections en travers ou leur position en plan devrait figurer sur la carte pour représenter entièrement le maillage du modèle. Notons qu'en cas de crue débordante et donc d'utilisation de profils en travers généralisés, en cas d'apports et de pertes de débits, de singularité, les caractéristiques du modèle devraient pouvoir figurer sur la même carte.

Enfin, quel que soit le type de modèle, une carte extraite de la carte globale et agrandie suffisamment doit représenter les zones de maillage plus fin, pour permettre leur lisibilité graphique.

① Dans le cas **d'études nécessitant des modélisations numériques**, le cahier de cartes relatives aux données topographiques et aux résultats intermédiaires associés (MNT, maillage) devrait comporter les cartes suivantes :

- Position en plan et origine des données topographiques (levé photogrammétrique, levé terrestre, saisie manuelle d'après plan papier géoréférencé ou dimensions relatives d'ouvrages avec un point coté géoréférencé, interpolation arbitraire d'après visite terrain,... + les dates associées). Le fond de plan le mieux adapté pour servir de repérage est le plus souvent un SCAN 25, mais une base de données comme la BD ORTHO peut aussi être utilisé.

- Iso valeurs ou iso-surfaces d'altimétrie du domaine d'étude, le fond de plan associé pouvant être un SCAN 25. Rappelons que le tirage sous forme de plans photogrammétriques (cotes indiquées sous forme de texte) est totalement illisible. De plus, il ne constitue pas une

carte du MNT, qui est le résultat de tri, complément et interpolation des données, mais le reflet brut des données.

- Maillage (2D, casiers ou sections de calculs du modèle 1D). Comme il est dit plus haut, le fond de plan peut être utilement plus élaboré qu'un SCAN 25, et les agrandissements sont nécessaires dans les zones maillées plus finement. Cette carte représente implicitement les limites du modèle.

- Eventuellement un ou plusieurs détails 3D du MNT et / ou du maillage selon la lisibilité des représentations en plan globales.

② Dans le cas d'**études nécessitant peu ou pas de modélisation**, la réflexion issue de la comparaison de cartes prend une importance prépondérante. Les cartes représentant la géographie du domaine d'étude doivent donc être à la fois claires et suffisamment renseignées. L'utilisation d'une base de données IGN peut être utile pour un fond de plan comme pour une des cartes thématiques, mais le SCAN 25 est là encore le plus souvent utilisé.

Pour ce type d'études, les données topographiques sont souvent des données historiques d'une part, des informations sur la configuration actuelle récente mais pas nécessairement précise ou dense d'autre part. En effet, le fait qu'un modèle numérique ne soit pas nécessaire permet de ne pas investir dans des levés topographiques élaborés. Le Bureau d'Etude cherche alors à tirer profit de toute information existante en plus des données topographiques déjà disponibles (cartes de différents type (dont géologiques), photographies, témoignages, rapports d'études antérieures,...). Ainsi, les formats peuvent être très diversifiés.

Même sur un SCAN 25 qui ne sert que comme repérage pour les modèles, le géomorphologue tire parti du fait qu'il n'a pas besoin d'une grande précision planimétrique et altimétrique pour exploiter cette source. En effet, et souvent sur un agrandissement, il utilise les courbes de niveau, les repérages de talus, la toponymie (qui renseigne sur l'histoire ou la proximité de singularités, exemple: "Pas de la source"),...

Ceci conduit souvent à ne pas pouvoir synthétiser l'ensemble des informations topographiques sur une carte thématique créée à l'occasion de l'étude courante. Par contre, le fond de plan de la carte thématique présentant un résultat (carte géomorphologique ou AZI par exemple) est alors constitué des données de base (du SCAN 25 aux levés de précision pour les études de variantes de tracés routiers) qui sont alors particulièrement lisibles.

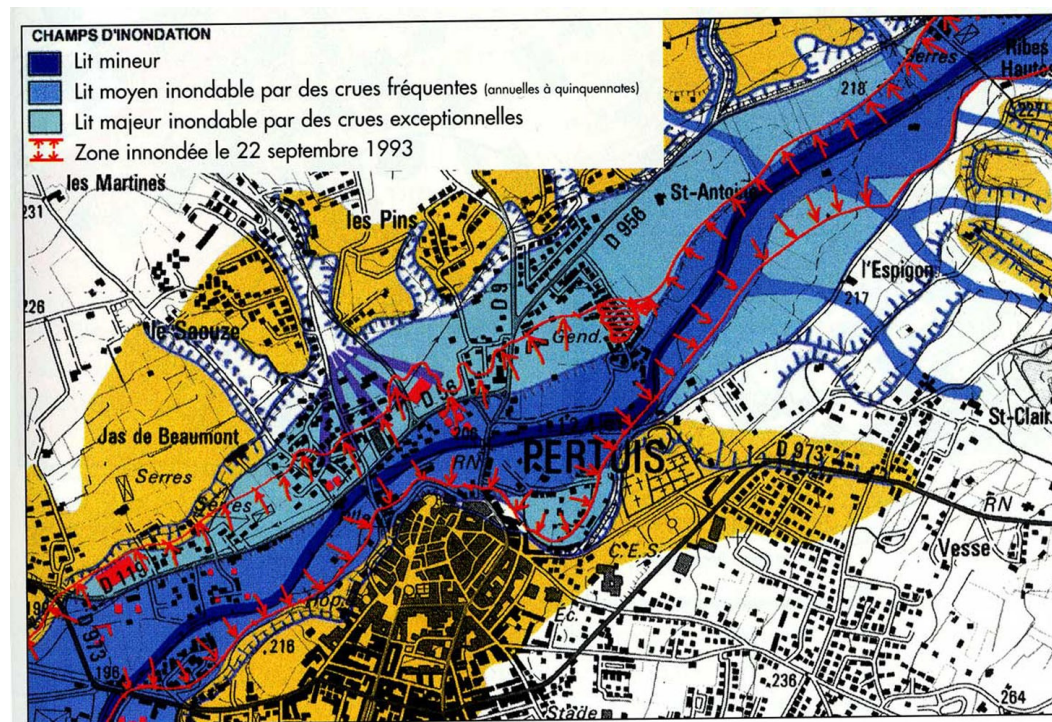


Figure 31 a :
 Pertuis (Vaucluse)
 - Cartographie :
 juillet 1993
 - Inondation :
 22 septembre 1993

Extrait de [iii]

Données en plan

Il s'agit des données géométriques dont l'information d'altimétrie n'est pas nécessaire. C'est par exemple :

- Les limites de ruptures de pentes importantes qui servent à définir des zones à exclure de l'étude parce qu'elles ne sont à coup sûr pas inondables (falaises et talus très hauts repérés lors d'une réflexion sur la géomorphologie, bâtiments,...).

La précision des données en plan est un critère plus ou moins important selon l'objectif de l'étude. Pour un modèle numérique étendu (typiquement plus d'une dizaine de km² pour un modèle 2D, au-delà pour des casiers ou du 1D), la précision de positionnement en plan des limites du modèle n'est pas un critère majeur pourvu que les conditions hydrauliques sur ces limites soient bien prises par rapport à la même référence. Par contre, il peut être nécessaire de définir la position de limites intérieures (bâtiments) avec précision lorsque l'objectif de l'étude est relatif à l'écoulement dans une zone où les résultats hydrauliques doivent être définis avec une grande précision (vitesses en bordure d'éléments encombrant le lit d'écoulement préférentiel).

Le fond de plan, l'échelle et le rapport d'agrandissement des cartes doit alors être adapté en fonction de ce que l'on cherche à observer.

- La limite d'une zone inondable ou inondée lors d'une crue antérieure. Dans le cas d'études utilisant des modèles, cette information est souvent utilisée plutôt comme un élément qualitatif qui permet de définir une stratégie (limites du modèle lorsqu'il n'y a pas de ruptures de pentes évidentes à proximité de la zone d'étude). Cette donnée peut par contre être d'une grande valeur dans le cas d'études comme l'élaboration ou la mise à jour d'Atlas de Zones inondables ou de PPRI, qui par définition utilisent majoritairement des données historiques (événements passés ou résultats d'études antérieures).

Le fond de plan peut être d'une importance majeure pour l'observation des zones inondées (proximité aux zones à enjeux ou à aménager). Même si un SCAN 25 est souvent suffisant, il faut que celui-ci soit bien visible. Il n'est donc pas question de l'atténuer, quitte à élaborer plusieurs cartes thématiques (une pour chaque crue historique par exemple) pour préserver la lisibilité. Ici, le fond de plan constitue finalement une "couche" d'information à part entière.

- La position en plan des laisses de crue. Ce sont des données de calage pour les modèles hydrauliques. Lors des calculs de calage l'altimétrie de la ligne d'eau est utile, mais la position en plan du jeu de calage est utilisée comme une donnée géométrique dans l'étape antérieure qui consiste à évaluer la quantité de données disponibles. En effet, l'extension des limites de l'étude vers des zones ou des laisses de crue sont disponibles est éventuellement à prévoir pour disposer d'informations supplémentaires. Pour les études types AZI ou PPRI, la position en plan des laisses de crues est d'une importance majeure non seulement lors de l'élaboration de la stratégie (détails de la méthode à utiliser selon les éléments disponibles et les objectifs) mais tout au long de l'étude (comparaison de PHE historiques par rapport à une hypothèse d'évolution de la morphologie des lits).

Les cartes thématiques peuvent éventuellement contenir plusieurs éléments en plus des positions des laisses de crues, surtout si celle-ci sont rares. Le nombre d'informations pouvant figurer sur la même carte (nombre de limites de zone inondée pour plusieurs crues par exemple) est alors limité par la lisibilité, si le fond de plan contient des informations plus utiles qu'un simple repérage général.

Notons enfin que pour plusieurs des exemples cités ici, les cartes devraient logiquement couvrir une zone plus importante que la zone d'étude : examen de la proximité de laisses de crues précieuses par exemple, qui justifierait d'étendre légèrement les limites d'un modèle pour bénéficier soit d'une donnée de calage supplémentaire, soit d'une condition hydraulique en limite pour la même crue de projet).

Données hydrauliques

Dans le cas des études nécessitant des modélisations, les données hydrauliques sont les conditions aux limites du domaine d'étude, et sont rarement représentées sur une carte. En effet,

il s'agit soit de données de débit ou cote d'eau, éventuellement de vitesse d'écoulement (calage d'un modèle de courantologie), définies soit à partir de mesures (station hydrométrique, observations bien validée à l'occasion d'une crue antérieure,...), soit à partir d'une étude antérieure ou parallèle (cf. Chapitre 7). Ces données sont localisées aux limites du domaine d'étude qui ne sont pas fermées (falaises ou bâtiments). Il est donc rarement utile de les faire figurer sur une carte, puisque l'information ne suit pas une évolution en plan et qu'il n'y a pas d'information géographique autre que celle des limites du modèle, cartographié par ailleurs. On préfère souvent détailler cet aspect, majeur pour les hypothèses de l'étude et l'interprétation des résultats, dans le rapport. Au lieu de cartes spécifiques, on a plutôt recours à des schémas, dont la forme est variable selon le type de condition aux limites : débits constants ou cotes d'eau pour une étude en écoulement permanent, hydrogrammes ou limnigrammes pour une étude en instationnaire. On peut éventuellement faire figurer ces schémas sur une carte, mais il faut alors souvent faire un montage spécifique pour insérer les schémas sous forme d'images à insérer dans la base des données à positionner sur la carte. La qualité du géoréférencement n'est pas importante, mais la manipulation oblige souvent à pré-traiter les images à l'extérieur de l'outil DAO ou SIG pour les insérer ensuite sur une "couche" de la carte.

Pour les études de type AZI ou PPRI, les données hydrauliques correspondent à des variations en plan beaucoup plus propices à la cartographie. En effet, les données utiles sont les cartes de Zones Inondables ou inondées, et toutes les données historiques contenant une information de cote d'eau, sur l'ensemble du domaine et pas seulement à ces limites.

Comme pour les données géométriques, le choix du fond de plan et du nombre d'informations à faire figurer sur une même carte est variable en fonction de la quantité de données.

D'autres types de données peuvent être classées dans les informations hydrauliques, dans le sens où elles influencent directement les résultats hydrauliques. Il s'agit par exemple des valeurs de rugosité du terrain, qui sont fonction en majeure partie du type de sol. Les cartes représentant ce type de paramètre sont atypiques, mais quelquefois incontournables, lorsque la sensibilité des résultats aux paramètres de rugosité est pressentie comme importante, ou bien lorsque le calage ne peut pas être effectué correctement (absence de précédent d'inondation pour les études de vulnérabilité aux ruptures de digues ou bien occupation du sol très différentes de l'époque des données de calage). Le fond de plan et les éléments à cartographier doivent alors être définis explicitement dans la commande. Notons au passage que les cartes noircies de chiffres représentant les valeurs de rugosité sont généralement à proscrire au profit d'iso-valeurs surfaciques.

2.2. Résultats de l'étude hydraulique

Résultats types courants

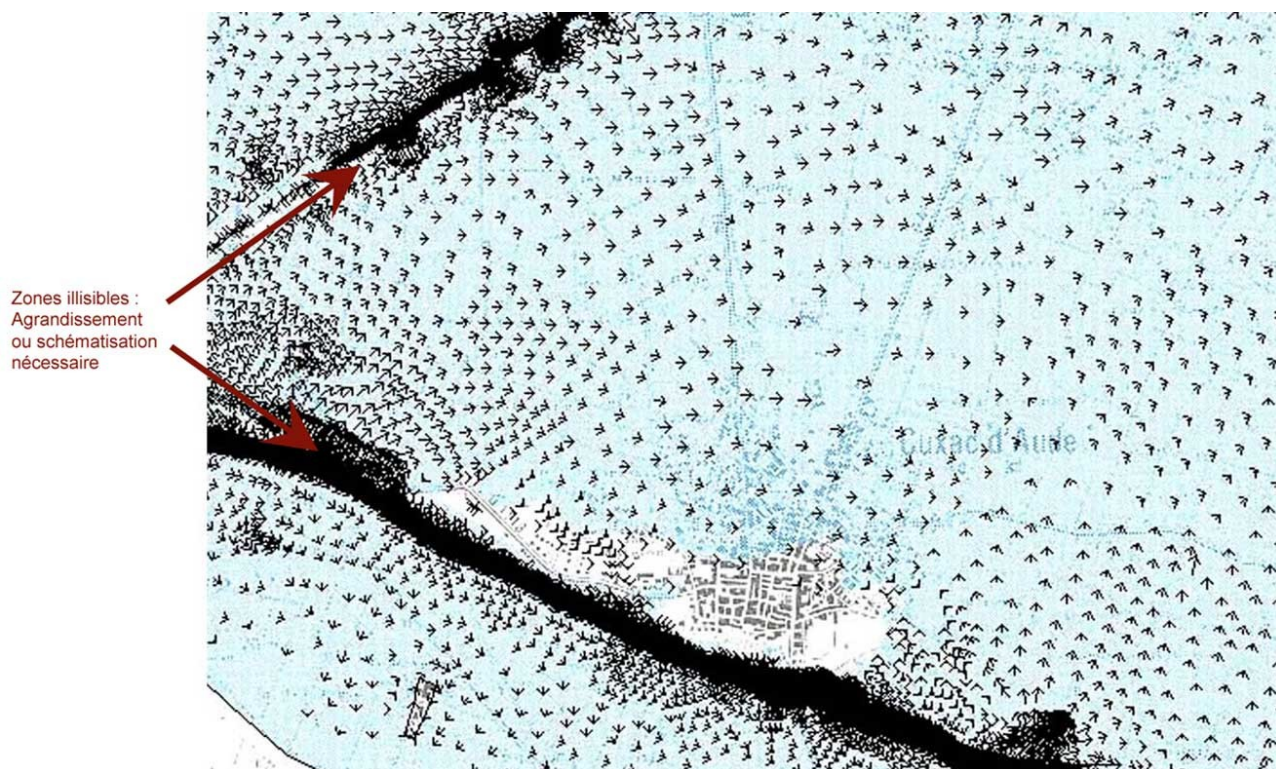
Ce sont les limites des zones inondables, les valeurs de hauteur d'eau, de cote d'eau, de vitesse d'écoulement, de durée de submersion,... pour chaque crue de projet ou de calage, ou encore des synthèses historiques (AZI, PPR).

Une carte présentant les conclusions d'une étude ne contient pas nécessairement une majorité d'informations originales. En effet, le résultat d'une étude peut consister en une synthèse de données antérieures (historiques, PHE,...) organisées, triées et complétées, éventuellement par une petite étude (modèle, technique géomorphologique,...). C'est souvent le cas des cartes liées aux AZI et PPRI.

Pour repérer les résultats en plan par rapport au terrain, le fond de plan est indispensable. Pour le cas des études utilisant des modélisations, ce repérage est général, parce que l'élaboration du modèle et sa validation ont permis d'accoutumer le lecteur au géoréférencement des calculs par la consultation des cartes des étapes précédentes.

Les résultats étant les éléments décisionnels sur les conclusions de l'étude, les cartes doivent être cadrées et éventuellement zoomées en fonction des objectifs et de la lisibilité. En général, si la réflexion sur le type de cadre et d'agrandissement adaptés a eu lieu en début d'étude en fonction des objectifs, ce qui est évidemment fortement conseillé, le même type de cadrage

doit être disponible sur les données de l'étude. Ceci permet une interprétation plus aisée des résultats, avec une rigueur facilitée par l'absence de problèmes d'échelle de représentation.



Exemple de cartographie de vitesses d'écoulement brutes : sans post-traitement des objets [CETEMéditerranée]

Le problème quelquefois rencontré réside dans le fait que le Bureau d'Etude peut cartographier ses résultats dans la forme la plus pratique (gain de temps, par exemple à l'aide de scénarios de post-traitement standards), plutôt que la plus appropriée à l'interprétation. Ceci est surtout observable pour les études basées sur la modélisation, le Maître d'Ouvrage étant moins intéressé par les cartographies des résultats que par l'interprétation du Bureau d'Etude. Le "flou" quelquefois rencontré sur la transparence des résultats, y compris les résultats intermédiaires comme ceux du calage, est entretenu pas la complexité de l'outil numérique. Or cette complexité ne devrait en aucun cas empêcher de produire des résultats assez clairs et didactiques pour être discutées avec des profanes de la technique, par exemple à l'occasion de points d'arrêt élaborés pour orienter la suite de l'étude.

Or la mauvaise qualité des cartes est issue de la contrainte du coût de l'étude, qui est subie par le Bureau d'Etude pour le succès de sa proposition. C'est donc au Maître d'ouvrage à expliciter le nombre et la forme des cartes souhaitées dans sa commande, de manière à ce que tous les prestataires intègrent ce poste spécifique dans leur proposition (quelques éléments sont fournis en fin du présent paragraphe).

Résultats temporels

Dans le cas d'études basées sur des modélisations, et selon l'objectif, il peut être souhaitable de disposer de variations des grandeurs hydrauliques au cours du temps, en cas d'étude d'écoulement instationnaire (étude d'une crue dans son ensemble, par opposition au cas virtuel d'une crue caractérisée par un débit constant au cours du temps partout dans le domaine d'étude). En effet, lorsque des valeurs sans précision de temps sont présentées sur une carte, il s'agit en général de maxima de hauteur d'eau ou de vitesse d'écoulement. Notons au passage que ces valeurs ne correspondent jamais à une "photographie" de la crue à un instant donné. En effet, même à l'instant qui correspond au maximum de la crue en un point donné, toutes les valeurs instantanées ne constituent pas le maximum de la grandeur considéré au même endroit. Par exemple, l'hydrogramme de référence est nécessairement situé en un point

précis. Le maximum de débit apparaissant sur cet hydrogramme se propage en aval, y provoquant un maximum de débit plus tard, ce délai pouvant varier de quelques minutes à plusieurs jours selon le type de crue et la taille du domaine d'étude.

Lorsque l'aléa hydraulique n'est pas recherché uniquement pour son maximum, mais que la dynamique de la crue est aussi à examiner (ce qui le cas assez souvent), il faut pouvoir disposer des résultats de grandeurs instantanées à plusieurs moments de la crue. Pour un hydrogramme de type triangulaire, trois instants peuvent être suffisants : montée de crue, maximum au point de situation de l'hydrogramme (ou en un autre point, à préciser alors), décrue. Dans tous les cas de type de crue, il peut être nécessaire de caractériser en plus des instants précis comme les premiers débordements ou le début de submersion d'une zone à enjeux ou à aménager.

Une autre utilisation des cartes de valeurs instantanées est la validation du modèle sur la dynamique de la crue. En effet, on dispose souvent d'un chronogramme de crue, qui permet de dresser une synthèse des événements hydrauliques au cours de la crue, établie principalement à partir de témoignages et de mesures aux stations hydrométriques sion a de la chance. L'événement le plus courant est la submersion d'une zone donnée à telle heure. La validation d'un modèle à partir d'un chronogramme de crue constitue un très bon complément au calage "forfaitaire" à partir de laisses de crues, qui ne valide pas l'aspect dynamique du modèle.

Spécifications du cahier des charges

Les spécifications du cahier des charges sur la représentation cartographique devraient contenir a minima pour chaque crue de projet :

- Le type de résultat à cartographier : le plus souvent hauteur maximum de submersion, maximums de vecteurs et module de vitesses, mais d'autres résultats comme les durées de submersion peuvent aussi être concernées selon l'objectif
- Le nombre de pas de temps pour une étude en instationnaire : trois pas de temps est un minimum
- L'échelle
- La présence éventuelle de fond de plan souhaité (la nature n'est pas nécessairement à préciser, il s'agit souvent d'un SCAN 25)

D'autres spécifications plus orientées vers les objectifs permettent au Bureau d'Etude de chiffrer correctement son offre :

- Nombre ou valeurs extrêmes des classes de valeurs (cas des études d'aménagement ou de variantes de tracés)
- Agrandissements ou échelles atypiques
- Schémas de variation de la submersion en un nombre minimum fixé de points (limnigrammes locaux)
- Cartes d'écart de résultats par rapport à une configuration topographique ou hydraulique de référence : ces écarts peuvent être représentés pour tous les points de calculs en plan ou bien en un nombre fini à préciser.
- Compilation des limites de la zone inondable au cours du temps
- ...etc...

PPRI et AZI

Pour des études de type PPRI, le nombre de cartes est souvent plus faible que pour des modélisations en régime instationnaire [viii]. Le type de représentation de résultats est souvent dicté par le contexte réglementaire destiné au zonage. Par exemple, pour les PPRI, les classes typiques de hauteurs de submersion sont 0-50 cm, 50 cm-1 m, plus d'1 m. Ces valeurs peuvent

être adaptées en fonction du type de crue ou des variations plus ou moins sensibles des résultats en plan. En effet, les classes minimum de vitesses sont 0 m/s, 0.5 m/s, 1 m/s, mais en pratique les représentations les plus courantes concernent les classes 0 à 0.2 m/s, 0.2 à 0.5 m/s, 0.5 à 1 m/s, plus de 1 m/s.

Un type de résultat typique est aussi la géomorphologie d'un site, selon la méthode préconisée par le MEDD pour les cartographies de Zones Inondables. La carte géomorphologique est élaborée à partir de plusieurs types de démarches, dont la plus précise (et la plus laborieuse) est l'interprétation stéréoscopique (évaluation qualitative) à partir d'un stéréoscope et des couples de clichés classiquement définis pour la photogrammétrie [iii], [iv]. La richesse des informations tirées de l'étude géomorphologique conduit souvent à dissocier la restitution cartographique en plusieurs cartes thématiques : géomorphologie naturelle, occupation du sol, hydrogéomorphologie (champs d'inondation avec l'aspect morphologie simplifié pour une meilleure lisibilité,...).

Mise en œuvre de la méthode hydrogéomorphologique

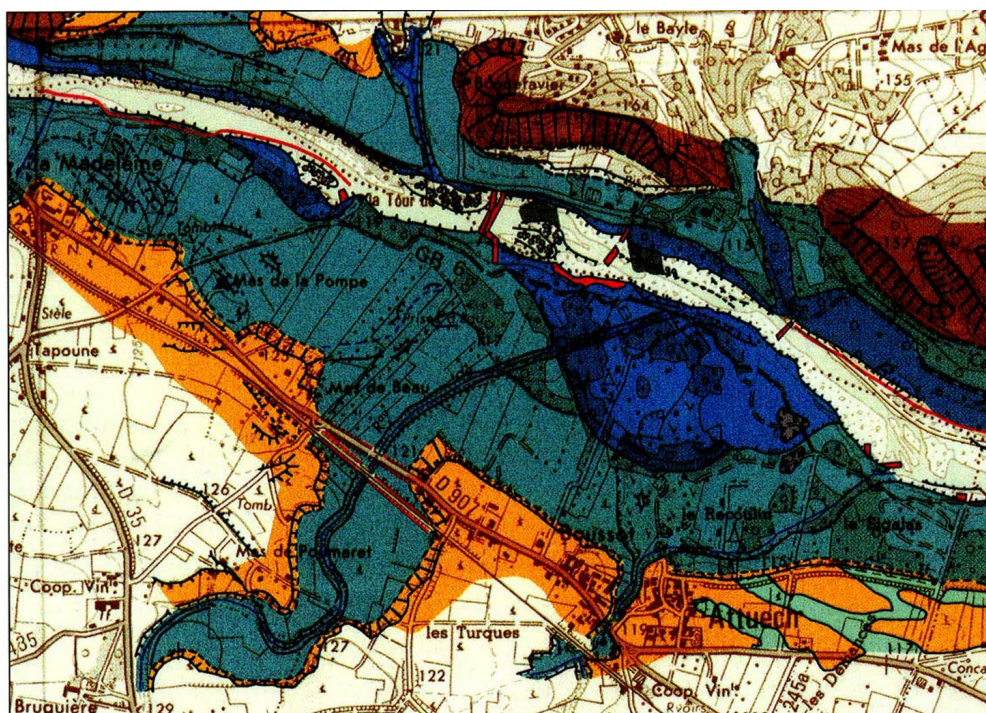
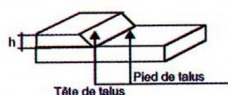


Figure 29 a :
Carte géomorphologique
du Gardon d'Anduze
(extrait)

Talus d'érosion

TTTT h < 1m

TTTTT 2m < h < 3m



Champs d'inondation

- Lit mineur
- Lit moyen, inondable par des crues fréquentes annuelles à quinquennales
- Lit majeur inondable par des crues exceptionnelles
- Basses terrasses non inondables
- Chenaux peu marqués sur la basse terrasse accessibles aux crues exceptionnelles

Travaux à incidence hydraulique

- Seuils dans le lit mineur
- Remblais d'infrastructure (route, voie ferrée)

Lit mineur

- Atterrissements
- Affleurements rocheux en bancs

Divers

- Pistes d'exploitation des gravières
- Dépôts de graviers en merlon
- Anciennes gravières
- Réseau hydrographique affluent au moyen Gardon
- Axe de drainage en lit moyen

Extrait de [iii]

Ainsi, selon l'objectif de l'étude et la quantité d'informations disponibles, la complexité des cartes géomorphologiques peut varier dans les proportions énormes.

Notons au passage l'originalité de la technique géomorphologique par rapport à l'étude hydraulique plus classique : le Bureau d'Etudes indique directement sur une carte (papier ou écran, sur SCAN 25 ou Base de Donnée IGN) la situation des éléments repérés à partir de photographies ou visites de terrain.

En matière d'AZI, une carte d'inondabilité regroupe l'ensemble des informations spatialisées, brutes (occupation des sols, historiques) ou interprétées (hydrogéomorphologie). Des exemples sont données dans [v].

Dans tous les cas, le fond de plan (souvent un SCAN ou EDR25) est très clairement visible, l'utilisation de couleurs bien distinguables est quasiment toujours nécessaire, la légende prend souvent une taille beaucoup plus importante que dans le cas des résultats de modèles (grand nombre de symboles différents).

Enfin, il est à remarquer que les cartes géomorphologiques sont souvent par nature très esthétiques et pédagogiques, ne serait-ce que par le contenu universel des pictogrammes, qui représentent des phénomènes ou objets naturels facilement identifiables par tous.

Résultats atypiques et intermédiaires

Nous avons déjà traité de cartes contenant des éléments dérivés de résultats classiques (ligne d'eau selon une coupe du terrain, superpositions de plusieurs limites de zones inondées par différentes crues de projets,...). Ici, il s'agit plutôt de cartographies plus rarement nécessaires à cause de l'originalité des objectifs ou la rareté des outils, ou bien de résultats qui servent plutôt à la validation d'une technique ou d'une hypothèse (résultats intermédiaires, souvent présentés au cours de points d'arrêt).

Un nombre illimité de combinaisons de résultats hydrauliques peut être créé, selon l'objectif de l'étude et l'originalité des données et contraintes. On peut citer par exemple les représentations de l'influence du vent ou de la marée autour de valeurs de référence dans des proportions correspondant à des observations historiques, les écarts de résultats pour une combinaison de situation d'aménagements en plan,...

Dans tous les cas, la préoccupation de lisibilité doit être la première, quitte à produire plusieurs cartes sur le même thème. Il est ainsi d'usage de ne combiner que rarement plusieurs types de crues dans la représentation de résultats de hauteurs de submersion ou de vitesse.

D'autre part, l'interprétation des résultats est toujours facilitée lorsque le lecteur peut identifier des éléments qu'il est accoutumé à assimiler par ailleurs (symboles, grain / hachures, jeux de couleurs,...). Les modes de représentation doivent donc être adaptés au message cartographique, toute originalité devrait être exclue même si elle est plus esthétique ou permet de superposer un grand nombre d'informations. La spécification dans la commande de la forme des cartes attendues est donc ici particulièrement souhaitable.

Certains résultats utiles à cartographier sont relatifs à des étapes intermédiaires de l'étude. Par exemple une carte de géomorphologie peut être soit élaborée lors d'une des premières étapes de l'étude pour étudier les possibilités de limiter la zone d'étude. D'autre part, les cartes de calage sont l'exemple le plus répandu de résultats intermédiaires, souvent associé à un point d'arrêt.

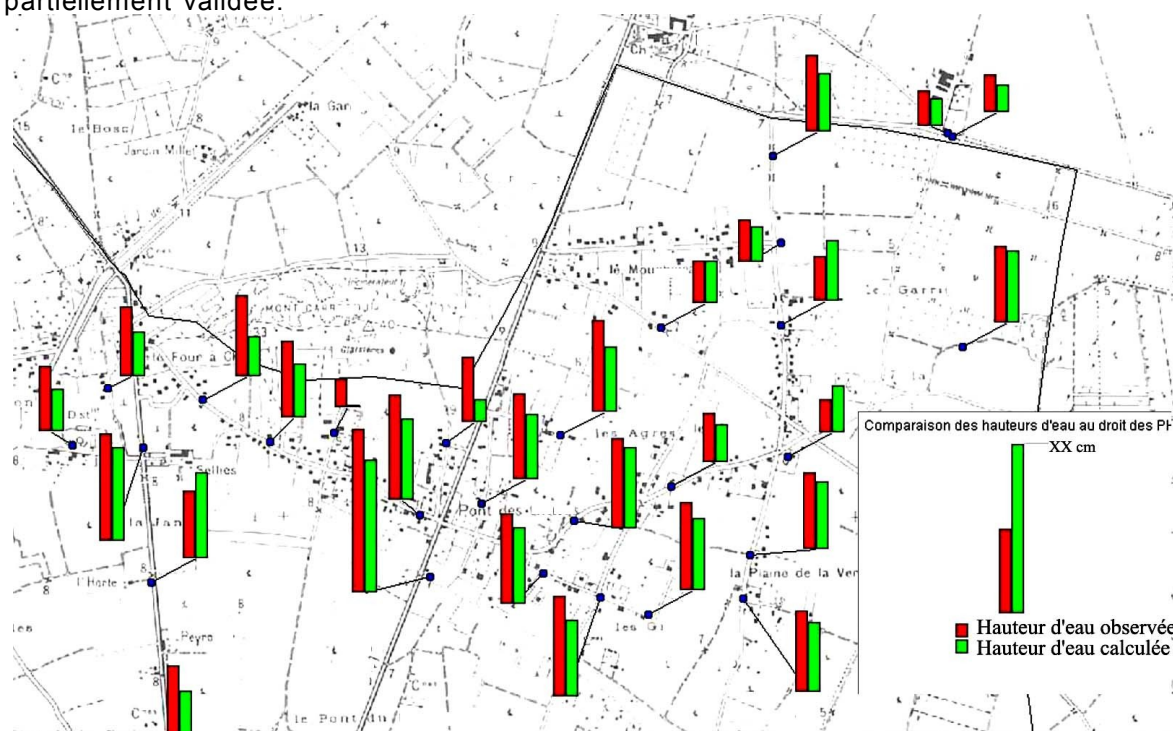
La carte de calage ne figure pas systématiquement dans le cahier des cartes de l'étude en pratique, ce qui semble inadmissible. En effet il n'est pas cohérent que le Bureau d'Etude, qui est juge et partie, puisse résumer l'étape de calage à partir de son interprétation. Or, le calage est une étape majeure pour garantir la qualité des résultats, et surtout évaluer au moins globalement l'incertitude de ces résultats. Cette évaluation peut s'avérer très importante dans des études de longue haleine, où plusieurs métiers interviennent et où des orientations (d'aménagement par exemple) non pressenties a priori peuvent apparaître en cours d'étude.

Une carte de calage doit contenir la position en plan des laisses de crues et l'écart entre calculs et cotes observées. Cet écart peut être représenté par un chiffre, mais alors il est difficile d'examiner laquelle des deux valeurs est la plus grande (pour voir par exemple si les calculs sont systématiquement sous-estimés ou sur-estimés). Les deux informations sont donc souhaitables, mais alors la lisibilité (nombres) se trouve dégradée. L'utilisation de symboles est donc préférable. Rappelons que les écarts sont à comparer à l'incertitude du calcul, qui est au moins égale à celle des données topographiques (cf. Chapitre 7).

Idéalement, l'information de calage devrait donc être pourvue de "barres d'erreurs", avec les marges d'incertitude mais aussi de tolérance, notion qui est mieux adaptée à la notion de valeur isolée comme la laisse de crue [iv]. Mais ce type de représentation n'est pas pratiqué, notamment à cause du manque de connaissances sur l'incertitude à prendre en considération pour tel ou tel type de calcul. L'incertitude sur les données topographiques seules pourrait être au moins utilisée, mais la responsabilité à prendre pour la déclaration de cette incertitude, qui est issue de celle du géomètre ou du producteur de bases de données, est probablement une entrave à une pratique courante des barres d'erreurs.

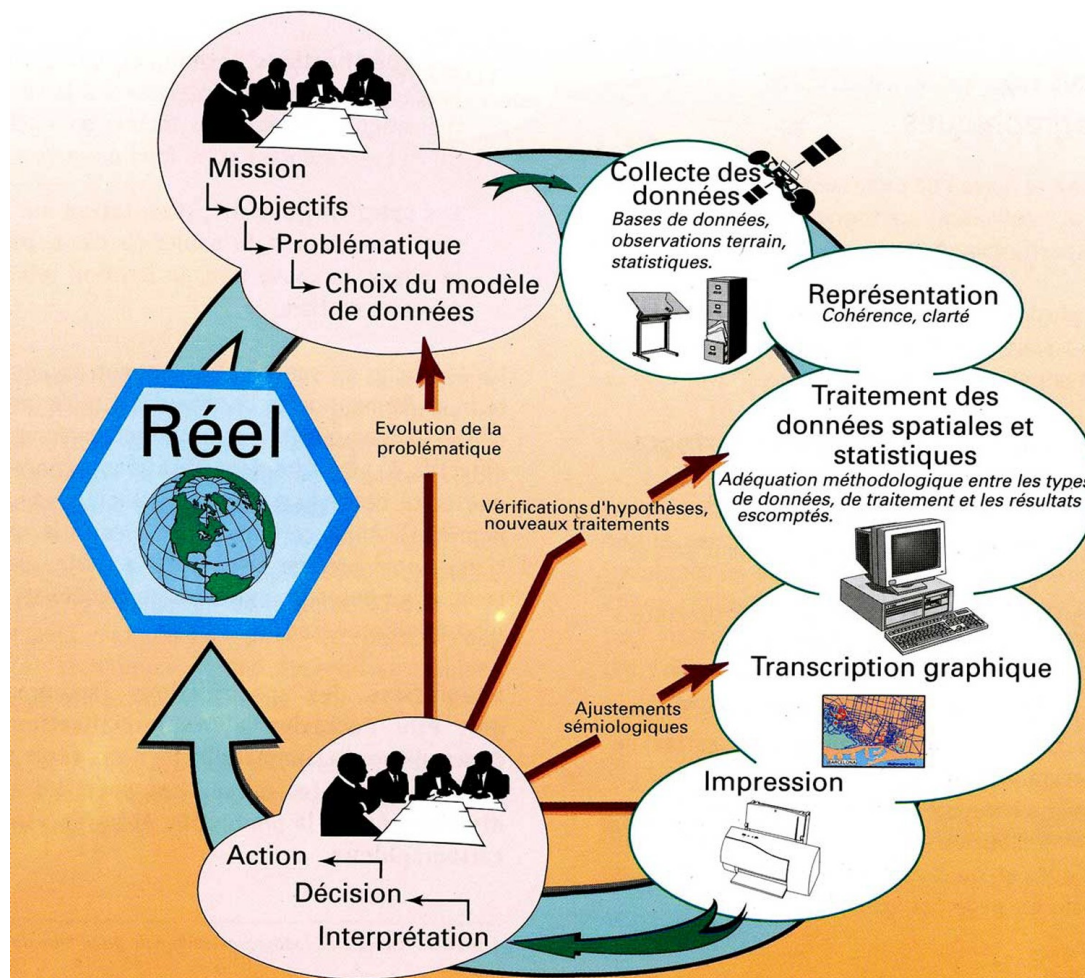
Notons enfin que la carte de calage est un bon exemple pour remarquer que l'examen de la carte ne peut être un critère de validation à lui seul. En effet, le rapport accompagnant les cartes contient souvent des compléments nécessaires à la validation. Or, il arrive encore trop souvent que les réunions de points d'arrêt aient lieu alors que seules les cartes, en version provisoire, sont disponibles, le rapport étant fourni en fin d'étude. Le Maître d'Ouvrage peut palier ce défaut, en spécifiant la fourniture de rapports d'avancement succincts, à fournir une semaine avant la réunion, ce qui ne devrait pas augmenter le prix de la prestation puisque ces rapports partiels constituent des parties du rapport final.

Pour le cas de l'étape du calage, la carte présente des écarts le plus souvent variables selon telle ou telle laisse de crue, surtout si le nombre de données est assez important. La validation consiste alors à comparer les écarts par rapport aux incertitudes, puis à examiner le contexte entourant le repérage de la laisse de crue lorsque les écarts paraissent inacceptables sur ce seul critère (la fiche de description, et éventuellement la photo). Certains écarts peuvent ensuite être déclarés acceptables, par exemple lorsque la laisse de crue n'est que partiellement validée.



Exemple de résultats de calage d'un modèle 2D [CETEméditerranée]

3. Élaboration de la carte



Processus général de construction d'une carte - Extrait de [i]

3.1. Caractéristiques globales des cartes et objectifs

Comme le montrent les chapitres précédents, une étude hydraulique est définie par un ensemble de données, de résultats et de caractéristiques nécessaires et suffisants définis à partir de l'objectif de l'étude :

- données géométriques et historiques
- résultats de cotes d'eau, hauteurs de submersion, vitesses d'écoulement,...
- Caractéristiques de précision de données, des résultats,...

Les cartes associées à l'étude hydraulique sont elles aussi définies par les mêmes types éléments, mais leur nature est spécifique aux cartes :

- Les données géographiques ou géométriques sont des fonds de plans, la représentation graphique des résultats de l'étude hydraulique, des données ou résultats d'études antérieures,...
- Les produits sont des planches papier, des plans numérisés, des éléments de SIG, des animations,...
- les caractéristiques sont l'échelle, l'adéquation à un ou plusieurs types d'archivage,...

Ainsi, les réflexions préalables à l'élaboration de cartes doivent être liées à l'objectif de l'étude comme pour l'étude hydraulique elle-même, mais il faut en plus définir les caractéristiques de la cartographie en fonction du public auquel est destinée la représentation cartographique. En

effet, la carte est souvent l'outil principal de valorisation de l'étude et de communication vers le public concerné par ses résultats.

Il y a donc un ensemble de caractéristiques orientées vers la didactique, la lisibilité,... qui constitue un minimum commun à tout type d'étude hydraulique, tandis que d'autres éléments constituant les cartes sont nécessairement dépendants de l'objectif de l'étude.

Quelque soit le contexte, les cartes doivent au minimum être caractérisée par [] :

- Une bonne lisibilité de manière à faciliter l'assimilation du message. En particulier, les informations doivent toutes figurer dans la carte sans redondance (surcharge) et cadrées au plus près (pas d'informations inutiles). Les éléments doivent être tous lisibles (exemple ci-contre).

- Un cadrage de fond de plan approprié : limité à la zone contenant des résultats d'étude hydraulique le plus souvent, sans être pour autant systématique : il peut être nécessaire de faire figurer sur la carte des zones voisines. Par exemple, la non-submersion de certains secteurs zones peut constituer en soit une information (vérification de non aggravation de l'inondabilité de secteurs voisins de celui de l'ouvrage dont l'aménagement est projeté).

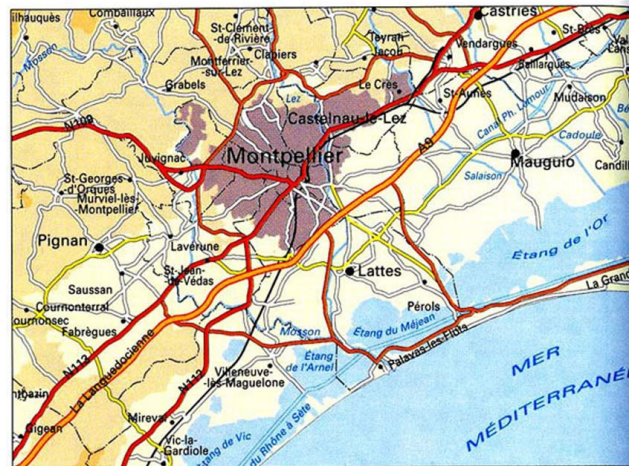
- Le fond de plan doit être choisi pour répondre à son objectif premier, qui est le repérage global des éléments cartographiés dans un contexte connu du public auquel la carte est destinée

- Pour ne pas charger la carte, il est souvent utile d'atténuer l'intensité visuelle du fond de plan, et de le représenter en monochrome ou niveaux de gris

- Les pictogrammes doivent être facilement assimilables, par exemple en correspondance avec des images courantes (symboles de panneaux indicateurs, objets courants,...)

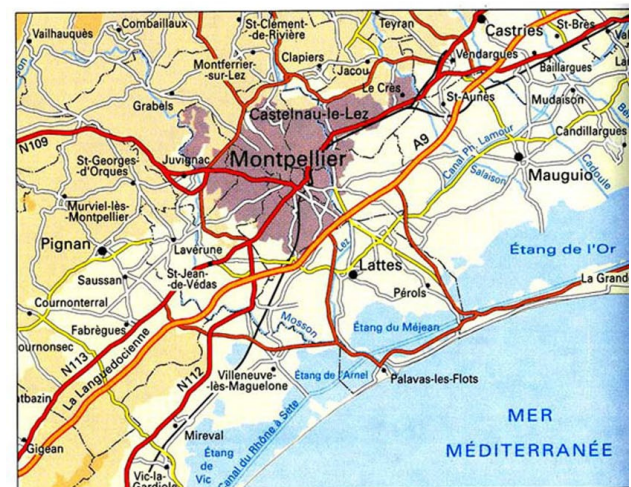
- La taille relative des divers éléments représentés doit être adaptée.

Exemple de placement de toponymes



Mauvais placements

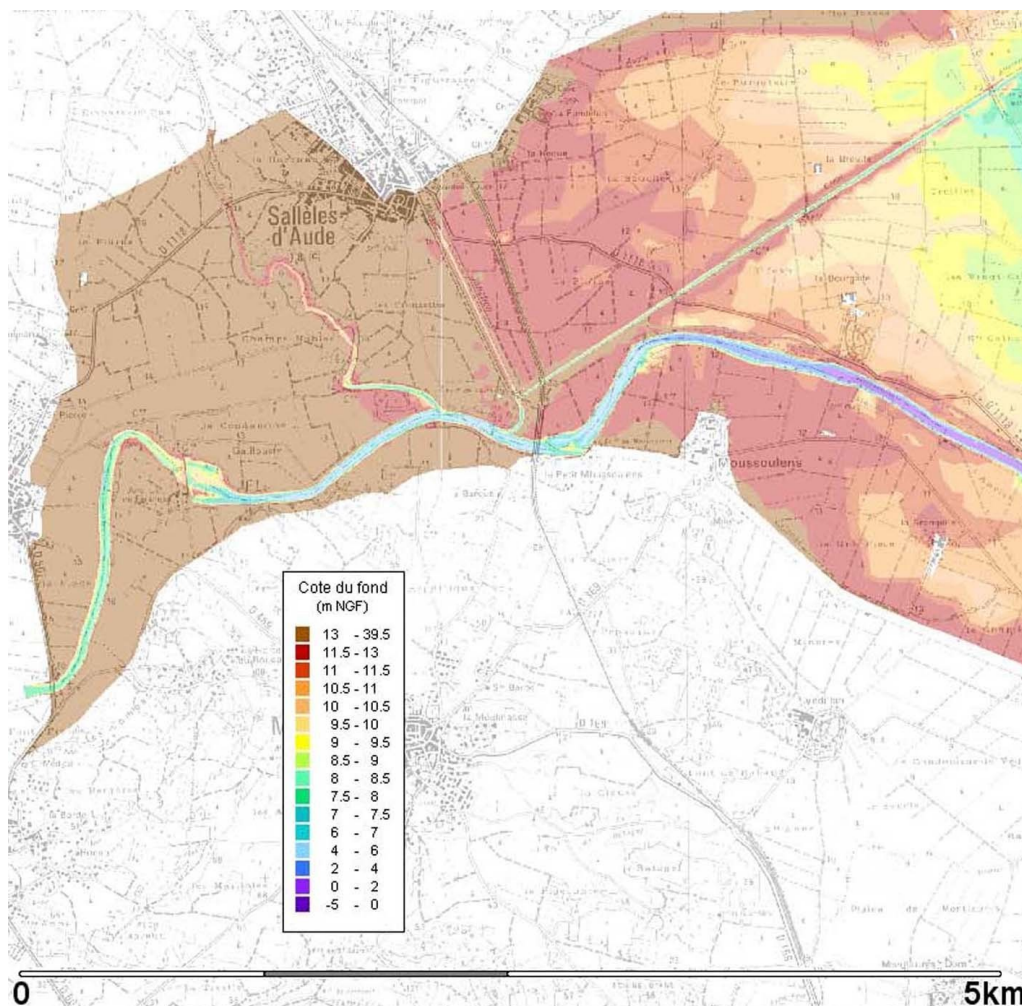
BD carto[®] de l'IGN



Bons placements

BD carto[®] de l'IGN

Extrait de [i]



Exemple de scan 25 en fond de plan atténué [CETEMéditerranée]

D'autres caractéristiques des cartes sont définies par l'objectif de l'étude. Cet objectif contient implicitement la considération du public et des collectivités locales qui vont consulter ces cartes.

Par exemple, les études nécessitant des modélisations numériques complexes sont typiquement illustrées de cartes récapitulant les caractéristiques des données géométriques souvent denses, du maillage, des résultats de calage, des écarts de résultats entre variantes,....

D'autres types d'études nécessitent des modélisations plus simples, mais la complexité réside alors dans la compatibilité des résultats hydrauliques avec d'autres résultats ou données d'études parallèles. Les exemples les plus connus sont les études PPRI, qui doivent comparer des cartes d'aléas hydrauliques avec des cartes d'enjeux, de zonage,....et les AZI.

C'est parce que les caractéristiques des représentations cartographiques dépendent étroitement de l'objectif de l'étude qu'elles illustrent que nous sommes souvent conduit, tout au long de ce chapitre, à considérer deux grands types d'études :

- Modélisation complexe, études hydrauliques de projets d'aménagement (projets routiers, dimensionnement d'ouvrages hydrauliques),... : plusieurs des éléments à cartographier sont souvent définis de manière spécifique selon l'objectif et les contraintes de l'étude, les paramètres importants sont l'incertitude des données et des résultats, les cartes sont à grandes ou très grandes échelles, avec des agrandissements. De plus, pour les études d'aménagement, les variations d'écarts de grandeurs hydrauliques entre deux états, avec et sans projet sont le plus souvent recherchées.
- PPR, AZI et autres dossiers reliés à un cadre réglementaire : le plus souvent, les éléments à cartographier sont fixés, en valeurs absolues plutôt qu'écarts, les échelles sont plus petites,

l'incertitude joue un rôle moins important sur les résultats de l'étude (mais pas sur sa cartographie), les aspects liés à la compatibilité avec d'autres cartes thématiques que l'aléa hydraulique et l'archivage (voire les aspects SIG) sont d'importance majeure.

Puisque ces derniers types d'étude font appel à plusieurs cultures plutôt qu'à des études hydrauliques complexes, ils n'ont pas été traités de manière spécifique dans les chapitres précédents. Nous décrivons donc rapidement ci-dessous en quoi ces études consistent.

Cas des PPRI et AZI

Les Plans de Prévention des Risques naturels prévisibles (PPR) sont des documents réalisés par l'Etat qui réglementent l'utilisation des sols en fonction des risques naturels auxquels ils sont soumis, de l'interdiction de construire à la possibilité de construire sous certaines conditions [ii], ¹, ².

Pour le risque inondation, l'aléa hydraulique est élaboré à partir d'éléments historiques (crues antérieures), et éventuellement d'une étude hydraulique spécifique en l'absence d'éléments existants suffisants, par exemple absence d'informations sur une crue exceptionnelle d'occurrence supérieure à la centennale ou une étude antérieure correspondant au moins à la crue centennale.

Cette carte d'aléa constitue l'une des trois cartes de base du PPRI, avec la carte des enjeux et le zonage PPR. Le document final du PPR est composé d'un rapport de présentation qui contient entre autres une carte réglementaire à une échelle comprise entre le 1/10 000 et le 1/5 000 en général, qui précise les zones réglementées par le PPR.

Les Atlas de Zones Inondables (AZI) portent à la connaissance des collectivités locales et du public les informations disponibles sur les risques d'inondation, sous forme de texte et de cartes, dans le cadre de la politique générale de prévention des risques [ij], ³.

Ici aussi, les cartes d'aléas sont élaborées à partir d'éléments historiques (plus forte crue connue ou crue centennale) et éventuellement d'études hydrauliques. Les Atlas sont constitués généralement au minimum d'une carte générale de repérage (1/200 000) et une série de cartes thématiques dressées sur fond de plan IGN au 1/25 000, quelquefois agrandi au 1/10 000.

Notons que de plus en plus d'AZI contiennent des informations issue d'une analyse hydrogéomorphologique, qui peut faire alors l'objet d'une carte spécifique [iii]. Les récentes circulaires [i] sur les AZI recommandent d'ailleurs principalement cette approche hydrogéomorphologique.

Plusieurs exemples de cartes de PPR, Atlas ZI, des PHEC,... sont consultables dans des documents ou sites Internet : Mission Risques Naturel⁴, sites de DIREN,...

3.2. Les supports cartographiques

Les données à cartographier sont souvent représentées sur un support, ou fond de plan, permettant leur repérage sur l'ensemble du site.

Le choix du support doit être effectué en fonction de sa capacité à permettre le repérage géographique, mais aussi la lisibilité de la carte finale, la superposition d'objets géographiques de nature différentes sur la même carte,...

Ce choix est lié aux contraintes d'échelles et précisions, issues de l'objectif de l'étude hydraulique.

Un certain nombre de supports peuvent donc faire office de référentiel. Ils doivent être impérativement compatibles (précision) avec les données à représenter. En effet, celles ci seront autant de couches d'informations interprétables par comparaison avec le fond

¹ : <http://www.environnement.gouv.fr/dossiers/risques/ppr/>

² : <http://www.alpesgeoconseil.com/risques/Zona.html>

³ http://www.environnement.gouv.fr/rhone-alpes/bassin_rmc/rdbmrc/risques/intro_risques.html#annonce

⁴ <http://www.mrn-gpsa.org/public/liens/espace11.html#2>

cartographique choisi. Un mauvais choix peut entraîner la production d'une information erronée (ex : superposition du cadastre et d'un zonage au 1/ 25 000).

Sources d'informations géographiques numériques

Des détails sur les précisions, diffusion, prix,... des sources citées ici figurent dans les sites précisés tout au long de ce chapitre, en particulier ceux de l'IGN et du Pôle Géomatique du CERTU.

Signalons en particulier qu'il existe des groupes de travail au sein du Pôle géomatique du CERTU, sur les thèmes de l'évaluation des bases de données IGN, de leur utilisation au sein du ministère de l'équipement, avec des fiches produits, des retours d'expérience,...⁵

Notons que le choix du fond de plan (support) devrait être effectué en tenant compte de l'existence ou la création prochaine éventuelle d'un SIG : le support doit pouvoir convenir à plusieurs représentations thématiques correspondant aux différentes "couches" du SIG, notamment en terme d'échelle et de cohérence planimétrique.

Le SCAN 25, l'EDR et autres images rasters

Les rasters, utilisés en fond de plan, servent au repérage global des données cartographiées. Leur apport est notamment utile lorsque les cartes sont présentées au public, qui connaît bien le site mais n'est pas habitué à lire des informations spécifiques comme les grandeurs hydrauliques (enquêtes publiques, présentations aux préfets,...).

Les rasters ne constituent pas des données dites "vecteurs", c'est à dire des données dont les propriétés (coordonnées, attributs divers,...) sont quantifiées et stockées dans une BD : ce sont plutôt des objets de type images.

Les rasters cités ci-dessous sont presque toujours utilisés pour les PPRI et les AZI, et très souvent pour les modélisations hydrauliques dans le cas de cartes qui sont destinées à un message (et donc un public) non spécialiste (impact du dimensionnement d'un ouvrage par exemple).

Le SCAN 25 est une image raster qui correspond au scannage des cartes papier IGN au 1/25 000. C'est une image réservée à l'habillage, à la lisibilité des résultats. Elle ne peut pas, dans le cadre d'une modélisation hydraulique, servir de donnée de calcul d'une variable hydraulique quelle qu'elle soit.

L'EDR25 est une reproduction numérisée des cartes IGN au 1/25 000, comme le SCAN 25, mais la numérisation étant effectuée avec des traits, les ombrages et les couleurs ou niveaux de gris sont éliminés, ce qui conduit à un fond plus allégé.

La précision planimétrique de ces documents est de 5 mètres.

Pour les AZI, la cartographie au 1/25 000 est reportée sur carte topographique IGN version monochrome, numérisée sous forme de SCAN 25 ou EDR25 dans le cas de constitution de SIG. Pour le 1/10 000 et toujours pour les AZI, le support préconisé est soit le SCAN 25 ou EDR25 agrandi version monochrome, soit un 1/10 000 existant, soit des orthophotographies [v].

D'autres images rasters peuvent aussi être utilisées comme fond de plan, bien que les SCAN 25 et EDR25, éventuellement agrandis au 1/10 000, soient largement les plus utilisés : photographies aériennes, orthophotographies, images satellitaires⁶,...

S'il apparaît que le terrain a significativement évolué depuis l'établissement du raster (mobilité du lit du cours d'eau, évolution de l'occupation du sol,...), il peut être opportun de mettre à jour le fond de plan, par exemple à partir d'orthophotographies du secteur concerné si elles existent. Il suffit alors de géoréférencer les orthophotographies (sous Mapinfo par exemple), de redessiner les contours "actualisés" des éléments qui ont été modifiés et de les intégrer au SCAN 25

La BD TOPO®

⁵ http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=5

⁶ TEXTURE réalisée par GEOSYS à partir de scènes LANDSAT 7, images des satellites Spot (http://www.spotimage.fr/html/_54_93_.php), ...

La BD TOPO® correspond à la carte TOP 25 en mode vecteur. Les objets figurant dans la BD TOPO® sont définis par 3 coordonnées et sont issus de levés photogrammétriques (photos au 1/30 000) ou d'un complètement terrain.

La précision planimétrique de la BD TOPO® est globalement métrique. Elle est variable selon la classe d'objets, elle peut être de 1.2 mètres pour les bâtiments, 2 mètres pour les routes et 2.5 mètres pour les cours d'eau. Elle pourra être de 5 mètres ou plus pour les objets non visibles sur la photo aérienne et issus du complètement terrain.

La précision altimétrique varie de 1.9 mètres à 4 mètres selon l'équidistance des courbes. (1.9 mètres pour une équidistance de 5 mètres, 2.5 mètres pour une équidistance de 10 mètres et 4 mètres pour une équidistance de 20 mètres).

Cette base de données est compatible avec une échelle de travail variant de 1/10 000 à 1/25 000. Le 1/5 000 peut être utilisé sur de petits secteurs mais une photogrammétrie issue d'une campagne de photos aériennes plus précise que le 1/25 000 (ex. 1/10 000) est recommandée s'il s'agit de grandes surfaces

Les BD CARTHAGE® et CARTO®

La BD CARTHAGE (Cartographie THématique des AGences de l'eau et du ministère de l'Environnement) est réalisée à partir de la BD CARTO® de l'IGN. C'est un outil du Réseau National des Données sur l'Eau⁷.

La BD CARTO® est une description sous forme numérique de l'ensemble du territoire national, avec une échelle de base allant du 1/50 000 au 1/100 000. Sa précision est décimétrique. La BD CARTHAGE complète la BD CARTO par une codification hydrographique qui s'appuie sur le découpage du territoire en environ 6000 zones hydrographiques, qui sont assimilables à des bassins versants élémentaires.

Cette base de donnée est donc bien adaptée à l'étude de bassins hydrographiques dans leur ensemble. Elle est d'ailleurs citée dans la circulaire récente relative à la programmation de la réalisation des AZI⁸. En particulier, la cartographie des ZI doit porter a minima sur les drains principaux des sous-secteurs hydrographiques de la BD CARTHAGE. L'état des lieux des cours d'eau cartographiés et la programmation des cartographies des ZI, demandés aux préfets coordonnateurs de bassins par le MEDD, font référence à la codification de la même BD.

La BD ORTHO®

La BD ORTHO® fournit une orthophotographie de tout le territoire français. L'orthophoto correspond à un assemblage de photos aériennes qui ont été "redressées" pour corriger les déformations dues au relief et à la prise de vue.

La précision planimétrique est de 1.50 m et la précision altimétrique est celle de la BD TOPO® si elle existe sur le secteur ou sinon celle de la BD ALTI®.



IGN BD ORTHO®

La BD ALTI®

⁷ http://www.rnde.tm.fr/francais/frame/atgen.htm?page=../at/ca/carthage_main.htm

⁸ Circulaire du 1^{er} février 2002 relative à la connaissance du risque d'inondation – programmation pluriannuelle de la réalisation des Atlas des Zones Inondables

C'est un MNT ne représentant que le relief du territoire français.

La précision altimétrique varie de 1.9 m à 4.1 m selon l'équidistance des courbes.

Méthode d'obtention BD Alti®			Equidistance des courbes			
			5 m	10 m	20 m	40 m
BD Alti®	Vectorisation	Carte 1:25 000	1,9	2,5	4,1	-
		Carte 1:50 000	2,0	2,6	4,1	-
	Photogrammétrie	P.Vue Aér. 1:30 000	1,9	2,5	4,0	-
		P.Vue Aér. 1:60 000	-	4,1	5,2	8,2

Le Cadastre

Le cadastre est un plan à l'échelle de la commune, l'échelle variant entre le 1/200 et le 1/2 000.

Le cadastre a un but avant tout fiscal et non topographique. Les parcelles cartographiées sur le plan cadastral sont en général directement issues des mesures de terrain. Les distances reportées ne subissent pas de correction due à la projection Lambert. On obtient alors un plan dans un repère local qui ne pourra pas être comparé à une véritable carte. Cela explique que souvent les limites communales de deux communes voisines ne coïncident que rarement.

De plus, les techniques de levés ne sont pas similaires selon les régions. Différentes techniques ont été adoptées : levés terrain initial, report sur plan initial (minute) de levés postérieurs, photogrammétrie.

Le géoréférencement des plans est également différent selon les zones. Cela pose évidemment des problèmes de superposition avec d'autres sources d'informations géographiques telle la BDTOPO® de l'IGN.

Le cadastre est en cours de vectorisation ou de scannerisation selon les endroits et selon les moyens mis en œuvre, afin de créer à terme la BD Parcellaire, qui viendra alimenter le RGE (Référentiel à Grande Echelle),.

La BDParcellaire issue du Cadastre devra être en concordance avec la BD TOPO® (axe de route dans la route par exemple) et la BD ORTHO®, ce qui nécessitera une remise en coordonnée du cadastre vecteur. La livraison du cadastre numérique est prévue avant avril 2006.

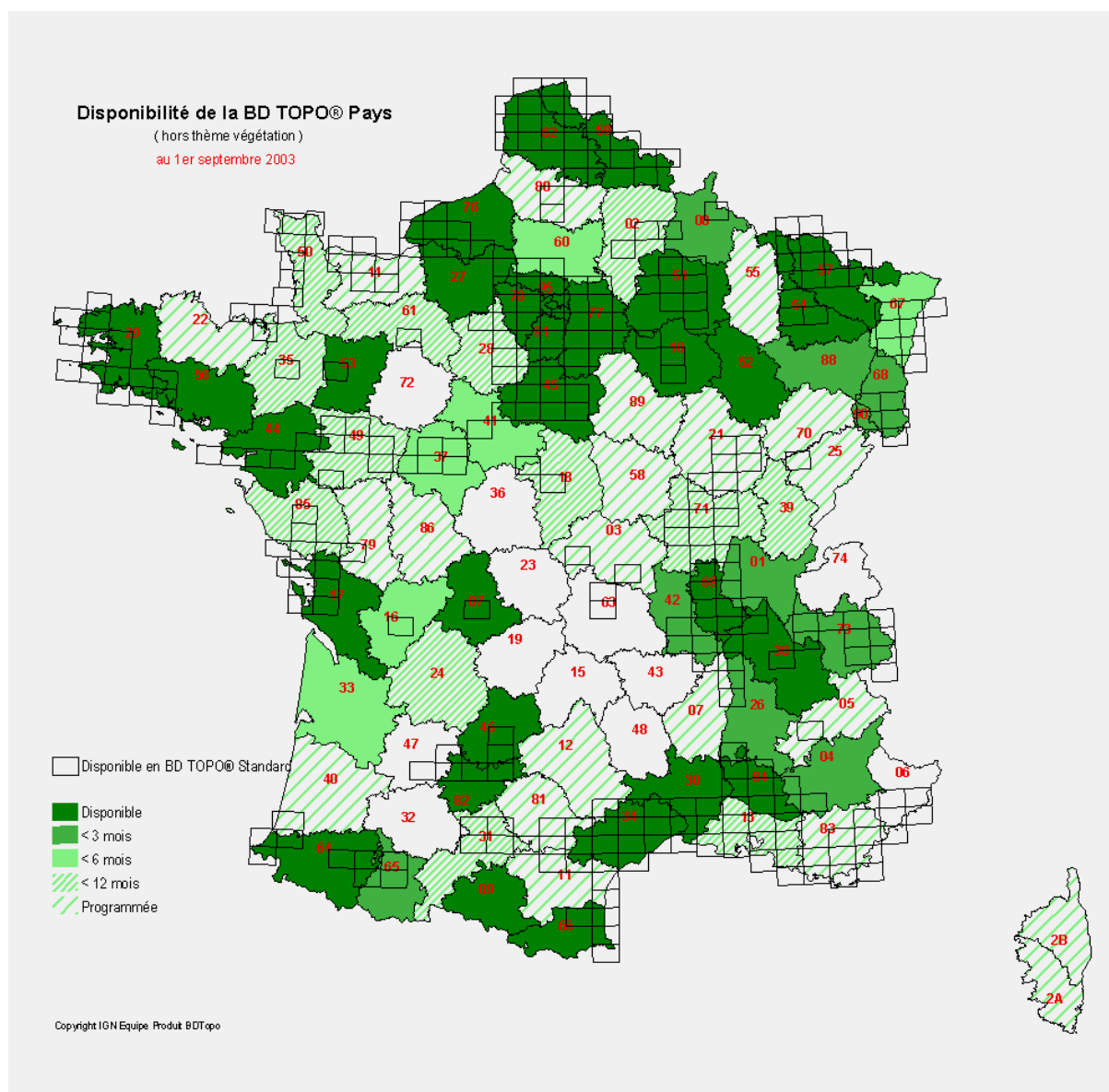
La BD TOPO® Agglo

La BD TOPO® Agglo propose une précision supérieure dans les agglomérations de plus de 50000 habitants, à savoir environ 50 cm.

La BD TOPO® Pays

La BD TOPO® Pays est la BD TOPO® en dehors des agglomérations supérieures à 50 000 habitants.

Elle sera disponible sur tout le territoire français en 2006. Elle est superposable à la BD ORTHO® et à la BD Parcellaire



Levé terrain et plan de géomètres

Le levé terrain est une méthode anecdotique à cause des surfaces en jeu à couvrir. Cette méthode ne peut être utilisée que pour de petites surfaces étant donné le prix d'un levé terrain. La précision est de 5 à 10 cm en levé terrestre au GPS^[iv].

Les levés terrain peuvent par contre être utilisés et insérés dans un fond cartographique numérique existant. Ceci est compatible avec des échelles de travail variant du 1/200 au 1/5 000.

Les plans photogrammétriques sont souvent d'une importance capitale pour les études hydrauliques basées sur des modélisations numériques complexes (données de l'étude), mais sont rarement adaptés au rôle de support cartographique. En effet, les entités géographiques qui pourraient servir de repérage sont à la fois trop denses et trop dépouillées d'habillage (toponymie, couverture végétale,...

Signalons toutefois le domaine des études d'hydraulique routière (dimensionnements d'ouvrages de transparence hydraulique), pour lequel les résultats sont très souvent cartographiés sur un plan topométrique du géomètre, éventuellement simplifié, contenant des levés terrain. Le levé géomètre sert alors à la fois de donnée pour l'étude hydraulique et de fond de plan pour la cartographie des résultats.

Levé photogrammétrique

Les levés photogrammétriques sont obtenus par restitution photogrammétrique, technique qui consiste à saisir l'information tridimensionnelle à partir de couples d'images stéréoscopiques constitués de photographies aériennes. Ces levés sont exécutés automatiquement pour chaque modèle stéréoscopique. L'objectif est de disposer de données topographiques numériques à partir de mesures et non pas obtenues a posteriori par digitalisation des plans papier définitifs.

Rapport d'échelle préconisé entre photos et plans

Echelle des plans	Echelle des prises de vues : limite supérieure recommandée
1/5 000 ^e	1/14 500 ^e
1/2 000 ^e	1/8 000 ^e
1/1 000 ^e	1/4 000 ^e

La précision des plans ainsi obtenus varie suivant l'échelle de prise de vue, la position relative à l'intérieur du modèle (moins précis près des bords) et la qualité des photos aériennes.

Echelle des clichés 1/E _c	1/8 000 ^e	1/14 500 ^e	1/20 000 ^e
Précision moyenne planimétrique	0.20 m	0.30 m	0.40 m
Précision moyenne altimétrique	0.20 m	0.30 m	0.40 m

Les zones du terrain occupées par un couvert végétal ou couvertes d'eau ne peuvent être décrites à partir des photographies aériennes : les données correspondantes doivent alors être recueillies via des levés terrestres.

Orthophotographies

Ce sont des photographies aériennes traitées par une technique de redressement destinée à minimiser les déformations dues à la surface courbe de la terre⁹.

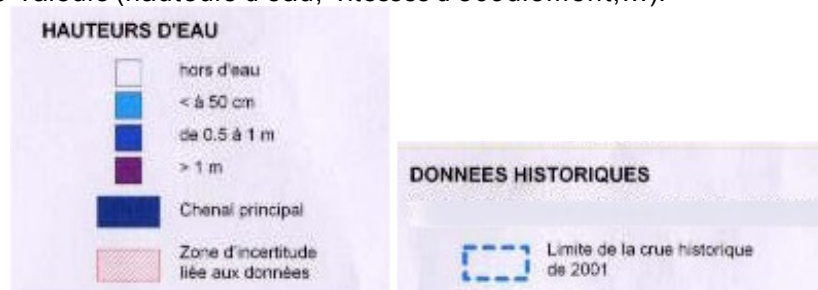
Bien qu'il n'est pas rare que les Maîtres d'Ouvrages commandent des orthophotographies à l'occasion d'une campagne photogrammétrique (la première étape de ces campagnes est le recueil de clichés aériens), il est assez rare de voir ce type de support utilisé en fond de carte liée à des études hydrauliques.

⁹ http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=4&rub=27, dossier technique Signature n°19.

Nom	Producteur	Format	Projection	Echelle	Précision	Commentaires
BD CARTO®	IGN		Lambert II étendu	1/100 000	10 à 20 m	
BD CARTHAGE	RNDE		Lambert II étendu			
BD TOPO®	IGN		Lambert II étendu	1/10 000	1 m	
BD ALTI®	IGN		Lambert II étendu	1/25 000 à 1/50 000	2 à 8 m	
BD ORTHO®	IGN	TIFF	Lambert II étendu	1/25 000	1.5 m	
Plan Cadastral informatisé	Dir.°G ^{ale} des Impôts	DXF act. ^t EDIGEO à terme	UTM ou Lambert Zone ou Gauss-Laborde	1/200 au 1/5 000 selon zones	Variable	Toute la France n'est pas couverte. Prévu fin 2006
Photogrammétrie	Géomètre	DXF	Lambert Zone	variable	En fonction de l'échelle de prise de vue	
Orthophotographies	Géomètre		Selon commande	variable	En fonction de l'échelle de prise de vue	
SCAN25	IGN		Lambert II étendu	1/25 000	5 mètres	

4.3. La légende

Le contenu de la légende dépend évidemment du thème auquel se rapporte la carte et de la méthode utilisée pour la mettre en œuvre. Par exemple, une carte d'inondabilité établie via une étude géomorphologie contient en général la signification des symboles de caractéristiques morphologiques (talus par exemple), d'informations historiques (PHEC, limite de la crue historique maximale connue,...), les limites des différents lits (mineur, moyen, majeur). Pour une carte d'aléa inondation, dont le but principal est de fournir des informations quantifiées, la légende contient toujours au moins la signification des symboles correspondant à des classes de valeurs (hauteurs d'eau, vitesses d'écoulement,...).



Exemple de légende

En ce qui concerne les hauteurs d'eau, il faut préciser dans la légende à la fois à quel scénario elles font référence et la situation topographique du scénario simulé (le scénario est modélisé dans les conditions actuelles, contrairement aux données historiques qui sont relevées dans les conditions de l'époque).

Il faut également penser à insérer dans le cartouche de légende le numéro d'autorisation de reproduction du fond de carte utilisé. S'il s'agit d'un SCAN® 25 de l'IGN, ce peut être par exemple : SCAN® 25 copyright© IGN – Paris 2002 autorisation n°92-XXX.

Pour les grandes échelles surtout, il faut penser aussi à situer le Nord.

Enfin, notons que la légende est liée à l'échelle, dans la mesure où tous les éléments ne peuvent être représentés dans le cas d'échelles moyennes pour des raisons de lisibilité, tandis que la cartographie peut être plus détaillée à des échelles plus grandes.

3.4. Échelle et précision

L'échelle exprime un rapport de représentation, alors que la précision exprime la qualité géométrique des données.

Une confusion entre échelle et précision peut venir du fait que la taille de la zone que l'on peut représenter à une échelle donnée est limitée par la taille du support utilisée pour la représenter. Autrement dit, ce n'est pas en zoomant un fond au 1/25 000 au 1/10 000 que l'on pourra espérer atteindre la précision d'un plan levé au 1/10 000.

La notion de précision des données est liée à la difficulté à représenter des données cartographiques de précisions différentes selon les types d'objets, sur un fond de plan souvent moins précis.

Enfin, surtout pour les grandes échelles, la précision de lecture du positionnement en plan est liée au problème d'épaisseur d'un trait ou d'un pixel, et à la superposition de couches d'objets, lorsque des objets sont séparés d'une distance (à l'échelle de la carte) qui est inférieure ou de l'ordre de grandeur de la précision de positionnement de ces objets .

Le choix de l'échelle et la prise en compte de l'aspect précision sont évidemment liés aux objectifs de l'étude, en terme de contenu des données à cartographier et du public auquel la carte est destinée, qui sont définis dans les contraintes du Maître d'Ouvrages.

Choix de l'échelle

L'échelle est le rapport de similitude entre la représentation plane et conventionnelle que constitue la carte et la géométrie plane réelle.

Le tableau suivant résume les quantités linéaires et surfaciques pouvant être représentées en fonction de l'échelle, pour un support de type A4 ou A3. Il s'agit d'ordres de grandeur et la marge est considérée comme nulle, donc ces valeurs sont des majorants.

Echelle	Page A4		Page A3	
	Linéaires	Superficie	Linéaires	Superficie
1/100 000	20 km * 30 km	600 km ²	30 km * 40 km	1200 km ²
1/50 000	15 km * 10 km	150 km ²	15 km * 20 km	300 km ²
1/25 000	5 km * 7.5 km	38 km ²	10 km * 7.5 km	75 km ²
1/10 000	2 km * 3 km	6 km ²	4 km * 3 km	12 km ²
1/5 000	1 km * 1.5 km	1.5 km ²	2 km * 1.5 km	3 km ²

Le choix de l'échelle doit être effectué dès l'étape de définition de l'objectif de l'étude, dans laquelle sont définis aussi ce que doit renseigner et à qui est destinée chaque carte. Ceci n'empêche pas par la suite la mise en œuvre des cartes supplémentaires, constituant pas exemple des agrandissements d'extrait des cartes dont l'échelle a été définie au préalable.

Les AZI, par exemple, sont constitués de deux types de cartes : une cartographie d'inondabilité au 1/25 000 couvrant l'ensemble du secteur étudié, qui constitue l'élément principal de l'Atlas, et des cartes au 1/10 000 couvrant des secteurs séparés à enjeux [v].

Cet exemple montre que le choix de l'échelle peut être dicté par une réglementation ou une pratique dont la doctrine a été élaborée le plus souvent pour harmoniser l'ensemble des connaissances.

De manière générale, la première préoccupation liée au choix de l'échelle est d'effectuer un compromis entre une représentation contenant l'ensemble des objets géographiques à représenter et la lisibilité de la carte. Les symboles représentant ces objets sont eux-mêmes d'une taille dont il faut tenir compte, une très grande échelle n'étant pas nécessairement favorable à la lisibilité ou à la localisation. En effet, la taille des symboles, l'épaisseur des traits,... est plus difficile à adapter en fonction de l'échelle pour les cartes papiers que lorsqu'un outil de type SIG est utilisé (échelle des objets adaptable est fonction de l'échelle de la représentation globale).

Parmi les conséquences du choix de l'échelle a priori, il faut penser à l'évolution éventuelle de la problématique au fur et à mesure du déroulement de l'étude, qui peut faire évoluer les besoins de représentation. On peut citer par exemple le cas d'une carte de zone inondable qui risque de s'avérer un peu plus étendue que prévu alors que l'on cherche à conserver une taille de support fixée en fonction du public identifié (un écran, une page A3,...).

Le choix de l'échelle est aussi lié à la quantité d'information (objets géographiques) que l'on souhaite faire figurer sur la carte. En effet, la définition du message et du public auxquels la carte est destinée conduit à définir les objets nécessaires à la représentation, mais aussi souvent des objets souhaitables mais non nécessaires. Il faut alors choisir entre fixer l'échelle et fixer la quantité d'objets non nécessaires mais utiles à cartographier.

Par exemple, les modèles hydrauliques requièrent souvent des données topométriques dans une échelle comprise entre le 1/5 000 et le 1/10 000 selon le type d'étude. La carte représentant la synthèse de ces données peut alors être établie au 1/5 000 en présence de données existantes détaillées et de forts enjeux (zones urbaines très exposées, importance de la précision, la densité et l'âge des données pour l'interprétation), ou au 1/10 000 sinon. Si l'échelle la plus grande est jugée nécessaire, on peut décider de grouper les données par type et préférer ne pas représenter tous les types de donnée, quitte à éditer plusieurs cartes correspondant chacune à un ou plusieurs types de données.

Précision, résolution

Le rendu d'une étude hydraulique est issu d'un calcul numérique ou d'une méthode qualitative détaillée. Il ressort des modèles des valeurs de hauteurs d'eau, vitesses,... évaluées avec une certaine précision. La cartographie représente cette donnée (ou le croisement de plusieurs quantités) de manière simplifiée, pour servir d'information, support de discussions et décisions, validation,... La carte est donc informative, elle est un aboutissement d'une étape du projet et non un outil de mesure de quantités fines. En particulier, il ne faut pas s'attendre à établir à partir de ce document des mesures fines de parcelles ou de volumes. Il sera ainsi nécessaire de repasser par des étapes de modélisation pour pouvoir refaire des évaluations. Toutes les sorties papier ne seront que des "vues" du calcul numérique mais en aucun cas des supports de mesures ou de calcul.

Toutefois, la lecture d'une carte n'empêche pas pour autant l'évaluation quantitative en ordre de grandeur, c'est même l'objectif de nombreuses cartes (classes de hauteur de submersion par exemple). Il faut alors permettre au lecteur de la carte d'interpréter directement les quantités qui lui sont présentée, en particulier en éliminant les représentations sans signification ou pouvant conduire à une interprétation erronée.

Prenons l'exemple d'une carte thématique à grande échelle représentant une partie de la zone d'étude, contenant entre autre les hauteurs de submersion. Pour une crue de projet donnée si la pente du terrain est faible, l'écart entre les valeurs de hauteur d'eau voisines devrait être relativement faible. Or il est probable que le cartographe serait tenté de définir a priori un nombre de classes de l'ordre de 4 ou 5, maximum classiquement utilisé pour des questions de lisibilité. Les valeurs limites de chaque classe sont alors relativement proches, par exemple avec des écarts de l'ordre de 10 cm. Si les données topographiques sont définies avec une précision métrique, une telle représentation conduit à une interprétation erronée : deux classes de hauteur de submersion représentent en réalité le même ordre de grandeur de submersion (à la précision des données près).

Ainsi, les notions de précision des données de la représentation cartographique sont à considérer pour une mise en forme adaptée. Toute donnée cartographiée doit être interprétée en tenant compte de l'incertitude correspondante. Si l'on prend l'exemple d'une limite de zone inondée, à représenter à l'échelle 1/5 000 ou parcellaire, sur un fond de plan de type SCAN 25, le problème de lisibilité va se poser de représenter un objet défini avec une précision fine représenté sur un agrandissement de fond de plan beaucoup moins précis (épaisseur des traits).

Enfin, la densité de données peut être utile pour une carte à échelle fixée, mais totalement illisible pour une échelle plus faible. On peut alors filtrer ces données pour n'en représenter qu'une partie, mais quel seuil doit-on fixer pour le filtre ? c'est à dire : en deçà de quel écart de valeurs peut-on considérer que telles et telles données sont redondantes ? Ce choix est lié aux notions de précision des données.

Pour répondre à ces questions, il est utile de rappeler rapidement la signification de ces notions.

Précision des données et des résultats de l'étude hydraulique

Selon le type de méthode utilisée dans l'étude, l'incertitude relative aux coordonnées planimétriques et altimétriques varie globalement entre les ordres de grandeurs centimétrique et décimétrique¹⁰. Typiquement, dans l'ordre croissant d'incertitude, il s'agit de coordonnées mesurées par levés terrestres ou bathymétrie ultrasonore (cm), par photogrammétrie avec une échelle fine de prise de vue (dm), ou bien de coordonnées fournies par certaines bases de données.

Les autres données de l'étude, comme le débit de projet ou les conditions aux limites (données hydrauliques), sont caractérisées par une précision encore plus variable, selon leur origine. Mais la prise en compte de leur valeur est plus difficile ne serait-ce que parce que l'incertitude sur ces données n'est pas souvent connue. D'autre part, s'il est très important de prendre conscience du fait que les données hydrauliques sont entachées d'une grande incertitude, il faut surtout considérer le fait que la crue projetée n'est qu'une idéalisation d'un risque hydrologique, qui n'a que peu de chance de se reproduire avec les mêmes caractéristiques. La crue de projet ne correspond alors qu'à une hypothèse qui sert à fixer une base de comparaison, en particulier avec une crue historique ou de période de retour très schématisée.

Ceci n'est pas très important pour le cartographe, qui a besoin de connaître la précision relative des données à représenter entre elles, c'est à dire pour une ou plusieurs crues de projet fixées. La manière par laquelle les données hydrauliques ont été fixées n'est pas utile à la mise en œuvre de la carte.

Ainsi, on peut raisonnablement considérer qu'il suffit de considérer que les données de la carte sont entachées d'une incertitude au moins aussi importante que celles des données de terrain.

Une variation de 10 cm sur une carte de résultats absolus peut donc être considérée comme très faible voire négligeable si les données topographiques sont caractérisées par une incertitude de 30 cm (donc une tolérance de 81 cm = 2.7*30).

Par contre, des résultats d'écart de hauteur d'eau calculés entre telle ou telle configuration d'aménagement par exemple, donc sur le même support topographique, peuvent être

¹⁰ En ordre de grandeur, 75% des données varient dans un intervalle de 2 fois l'incertitude (\pm sa valeur), le reste des données pouvant varier jusqu'à \pm 2.7 fois cette valeur, par rapport à la valeur réelle [iv] et [chapitre 7 du présent guide].

supposés d'une précision de l'ordre du centimètre, puisque l'erreur commise sur la topographie est compensée par différence entre les deux configurations comparées. Les incertitudes typiques à prendre en compte pour tel ou tel type de résultat sont citées dans un texte réglementaire récent de la loi sur l'eau [v]. Notons toutefois que ce raisonnement est un peu rapide : la précision du calcul numérique seul est réputée très bonne, mais il n'en est pas nécessairement de même de celle du modèle analytique, une ligne d'eau n'étant pas parallèle au fond à cause des variations du terrain alentour et non de la cote absolue de ce terrain. Ainsi, l'écart centimétrique doit être considéré plutôt comme une tendance que comme une quantité précise lorsque l'incertitude des données topographiques est métrique, par rapport au cas où cette incertitude est centimétrique.

Résolution spatiale/ densité de données

La densité de données de la représentation cartographique ne correspond pas nécessairement à la densité des données ou résultats de l'étude hydraulique.

Pour la cartographie reliée à l'étude, il faut plutôt s'attacher à la densité d'informations utiles plutôt qu'à celle des données de l'étude. La densité maximum de données est limitée par la densité des éléments de l'étude (données et / ou résultats).

Il est impossible de revenir sur ce maximum au moment de la cartographie, lorsque par exemple un zoom ou une carte à échelle plus grande que celle prévue initialement est finalement souhaitée. Lorsque la densité des données pour la cartographie est supérieure à ce maximum, il s'agit d'informations qui ne constituent pas nécessairement des données ou résultats de l'étude hydraulique mais une interpolation ou une extrapolation.

Par exemple, il faut être attentif à l'interprétation possible et donc à l'élaboration d'une carte présentant une grande part d'interpolations à partir de peu de données : Prenons l'exemple d'une étude nécessitant un petit modèle 1D, avec quelques profils en travers couvrant le lit mineur et une partie du lit moyen (profils généralisés). Le calcul fournit des valeurs de cote d'eau qui seraient atteintes avec la crue de projet, situées sur les profils ou les sections de calcul. Le post-traitement destiné à élaborer une carte de zone inondable peut conduire à une évaluation de cote d'eau supérieure à la cote du terrain sur des zones éloignées des profils de calcul. Il s'agit d'une extrapolation des résultats de la simulation, par croisement des cotes terrain et des quelques résultats de cotes d'eau calculées, qui conduit à une interprétation forte des résultats du calcul, alors que cette extrapolation est tout à fait extérieure à ce calcul (il s'agit typiquement d'un post-traitement). D'ailleurs en général, cette interprétation est effectuée par ou avec l'hydraulicien, le cartographe ne pouvant mettre en œuvre une telle carte sans interprétation métier. Cet exemple montre l'importance d'une réflexion préalable à l'élaboration du modèle, pour la détermination du modèle à utiliser en fonction de la précision de l'information dont on veut disposer in fine.

Inversement, il peut être utile de réduire la densité des informations disponibles au moment d'élaborer les cartes, en général pour des considérations de lisibilité. Il est évident que cette densité ne peut être réduite que si les informations sont redondantes ou inutiles pour la carte à mettre en œuvre.

Par exemple pour les modèles 2D utilisant des éléments finis à 6 nœuds (points où sont situés les calculs et donc les résultats), la densité des nœuds peut être nécessaire pour la convergence des calculs et / ou l'assurance d'observer un phénomène hydraulique localisé (un courant de retour, une recirculation,...). Cependant, pour l'élaboration d'une carte décrivant les directions globales de l'écoulement sur une zone étendue, il est souvent nécessaire de "nettoyer" (filtrer) les résultats, en n'en sélectionnant par exemple qu'un sur trois dans la zone densifiée, pour les rendre lisibles. Même pour une carte de détail montrant les directions d'écoulement dans une zone limitée (autour de piles de pont par exemple), il est probable que seule une partie des vecteurs vitesse soit cartographiée, puisque le modélisateur a en général évalué arbitrairement et largement une densité de vecteurs résultats nécessaire pour visualiser les zones tourbillonnaires.

Une même famille de données de la représentation cartographique (ici les résultats de calcul des vitesses) peut subir plusieurs types de post-traitement pour conduire à plusieurs types de carte : dans l'exemple plus haut, on peut envisager une moyenne ou une schématisation des

vecteurs pour une vue générale, et la sélection d'une partie des vecteurs pour des agrandissements dans les zones tourbillonnaires d'intérêt (piles de pont). Ainsi, une densité d'informations trop importante conduit alors à la transformation de la carte trop chargée en plusieurs cartes.

Si la famille de vecteurs vitesse bruts était filtrée de manière automatique, en fixant par exemple l'élimination d'une donnée sur trois, pour constituer une carte globale lisible, pour effectuer un agrandissement de détail autour de la pile de pont, il faut revenir aux données brutes pour en cartographier un plus grand nombre par unité de surface de terrain : on augmente la résolution spatiale des données de la cartographie globale.

Cette manipulation est une perte de temps dans la mesure où, si la mise en œuvre des deux types de cartes avait été inversée, les vecteurs autour de la pile de pont auraient pu être sélectionnés avant le tri automatique des données brutes. Ceci montre l'importance de l'étape de concertation préalable à l'étape de cartographie.

Pour les études n'utilisant pas de modèle numérique, il est rare que des informations soient trop denses, parce que la redondance est rare elle-même. En effet, le Bureau d'Etude travaille dans ces cas-là sur des éléments concrets à chaque étape du travail et la redondance éventuelle est éliminée au cours de l'étude par expertise et validation par croisement d'informations (témoignages, PHE, visites de terrain, cartes anciennes,...).

En général, l'élaboration de la carte conduit à la création d'information à partir de peu de données ou résultats de l'étude hydraulique. Ici aussi, mais avec un lien beaucoup plus fort, l'intervention du spécialiste (le géomorphologue par exemple) est nécessaire pour élaborer la carte.

Une exception peut cependant être soulignée pour les fonds de plan, dont l'importance a déjà été soulignée pour ce type d'étude. Le fond de carte peut être constitué lui-même par des données ou des résultats de prestations antérieures comme des orthophotographies, des levés de type cadastre ou stéréorestitution, comme c'est le cas pour des études de variantes de tracés routiers. Dans ce cas, des informations redondantes peuvent constituer des zones trop denses, comme pour le cas des résultats de modèles numériques déjà cité plus haut. Le traitement est alors identique.

Précision de lecture de la carte

Il ne s'agit pas ici d'entrer dans les définitions de détail concernant davantage les précisions relatives à la qualité de lecture et de reproduction d'une carte plutôt qu'aux données de cette carte. Ce paragraphe est plutôt destiné à signaler la différence entre ces deux notions, dont la confusion peut amener des quiproquos.

Un exemple est donné dans [viii], qui évalue la précision de lecture attendue en utilisant un fond de plan EDR25 en considérant que la numérisation est correcte à 1 mm sur la carte, ce qui conduit à une précision de lecture de 25 mètres. La précision ainsi évaluée est une précision de lecture, et non celle des données topographiques décrites par le raster. En effet, La précision planimétrique de ces documents (scan 25 et edr 25) est bien théoriquement de 5 mètres.

Cohérence entre support cartographique et objets cartographiés

Les notions de précision et de résolution développées au paragraphe précédant ne sont appliquées qu'au cas d'une seule "couche" d'objets à cartographiées. Si on considère en plus la superposition de plusieurs couches d'information, concilier les notions de lisibilité et de représentation du message à élaborer est un peu plus complexe.

La suite du présent paragraphe est très étroitement inspirée des revues Signature n°13 et n°14 du CERTU¹¹.

Prenons l'exemple le plus courant pour lequel l'une des deux couches d'informations à cartographier est le support de la carte.

¹¹ Signature Dossiers technique n°13 et 14, http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=4&rub=27

Pour cartographier un ensemble d'objets géographiques sur un support, le problème qui se pose le plus souvent est la déformation due à l'écriture cartographique.

En effet, cartographier un levé topographique, c'est appliquer un signe conventionnel à chaque objet. Il faut que tout élément graphique isolé soit perceptible et que deux éléments voisins soient différenciés. Pour des règles d'esthétique et de lisibilité, chaque signe doit avoir une épaisseur minimale. Pour cartographier l'ensemble des objets et pouvoir les différencier visuellement, il faut souvent déplacer certains d'entre eux. Par exemple, le seuil de séparation de deux traits est de 0,15 mm. L'épaisseur minimale d'un trait est également de 0,15 mm. Si l'on veut représenter une route à l'échelle du 1:25 000 par un signe conventionnel à deux traits, la largeur minimale du signe sera donc de 0,45 mm, soit 11,25 m sur le terrain à cette échelle. Ainsi, toutes les routes dont la largeur est inférieure à 11,25 m auront forcément une représentation amplifiée sur une telle carte. Aussi, il faudra déplacer d'autant, voire plus, tous les objets qui bordent la route.

On constate au passage que la phase de cartographie altère la précision finale de la carte.

La figure 1 montre un extrait de photographie aérienne sur laquelle sont positionnés quelques bâtiments levés par photogrammétrie ainsi que l'emprise surfacique d'une route. La figure 2 montre la même zone extraite de la carte IGN au 1:25 000 très agrandie. On y a reporté les bâtiments levés sur la photographie qui demeure l'image de la réalité. Cet exemple montre la dégradation subie par les données lors de la phase cartographique



Figure 1 : emprises d'une route et de bâtiments sur une photographie aérienne

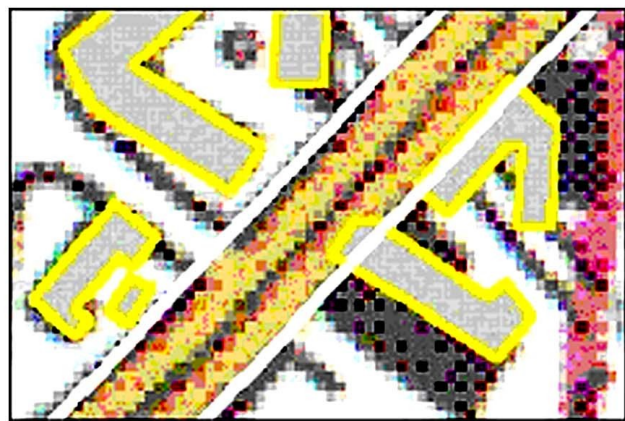


Figure 2 : extrait de la carte IGN au 1:25 000 sur laquelle ont été reporté les bâtiments présents sur la photographie

Extrait de [Signature Dossiers technique n°14]

Pour le cas des études hydrauliques, il peut arriver de rencontrer aussi des problèmes de cohérence au voisinage des pieds et crêtes de remblais et plus généralement pour les variations locales sensibles d'altimétrie (courbes de niveaux), entre le support et les résultats de l'étude : Le problème peut par exemple se poser pour une ZI dont la limite empiète sur une crête de remblais, comme le bâtiment de l'image ci-dessus empiète sur la route.

Ainsi, pour améliorer la cohérence entre les objets géographiques à représenter et le support de la carte, il faut tout d'abord s'interroger sur le choix de ce support. En effet, les supports de type SCAN 25 ou EDR25 sont souvent les plus propices au repérage global des informations géographiques. Mais la notion même de repérage global suppose implicitement une échelle pas très grande. Lorsque des agrandissements sont nécessaires, le support de la carte avant agrandissement est souvent quasiment illisible ou gêne la lecture comme sur la figure 2 ci-dessus. Il est alors tout à fait envisageable de choisir un support dont les données sont définies avec une plus grande précision que les numérisations de cartes au 1/25 000 agrandies. On peut par exemple choisir un extrait du Modèle Numérique de Terrain qui a servi à mettre en œuvre l'étude hydraulique, par exemple un plan photogrammétrique.

Lorsqu'il n'y a pas d'autre choix que le support agrandi présentant des défauts de compatibilité avec les données à cartographier, il faut modifier l'une ou l'autre des couches d'information. A priori, il est conseillé de modifier celui des deux objets qui est jugé le moins précis si c'est possible : puisque l'information de ce dernier est redondante, on peut le simplifier sans dégrader le contenu de la carte.

Un procédé de simplification systématique de la représentation d'un objet pour l'adapter à une échelle donnée est appelé "**généralisation**" : Il s'agit d'un ensemble de traitements permettant de simplifier la représentation géométrique des objets géographiques. Parmi ces traitements, les principaux sont la schématisation des formes et le déplacement des objets. La schématisation des formes est par exemple le procédé qui transforme une ville en symbole rond, tandis que le déplacement des objets est utilisé pour remédier aux superpositions de symboles tout en conservant les positions relatives des objets. Dans le cas d'une généralisation très poussée, on parle de **schématisation**.

Généralement, les logiciels SIG ne permettent pas de réaliser ces opérations de généralisation dans de bonnes conditions. La schématisation est parfois possible, mais cette étape se traduira le plus souvent par un choix entre deux bases de données dont l'une est plus généralisée que l'autre (exemple : Route 500 plutôt que BDCARTO en guise de fond de repérage).

Ainsi, il faut le plus souvent effectuer les opérations de modification des objets ou du support manuellement. La correction peut être effectuée en effaçant l'objet redondant empêchant la bonne lisibilité (sur la figure 2, effacement des traces de bâtiments issues du SCAN 25) et en déplaçant légèrement les objets voisins dont les traces se recouvrent.

Le cas de la trace d'un objet qui est incorrecte alors que sa représentation est nécessaire peut apparaître. Il s'agit par exemple de la trace d'un lit mineur issue d'un SCAN 25 ancien alors que le lit est mobile en plan ou bien qui est mal situé à cause d'un agrandissement trop important. Dans ce cas, deux possibilités se présentent :

- Soit cette trace est connue par ailleurs : il se peut par exemple qu'elle ait été nécessaire pour la mise en œuvre de l'étude hydraulique. Si l'information plus précise est disponible, on peut l'insérer en remplacement du support, quitte à schématiser sa trace
- Soit cette trace n'est pas disponible sous une forme plus précise. Le choix d'ajuster le support par rapport aux objets à cartographier sur ce support, ou l'inverse, se pose alors. La résolution de ce problème doit être effectué en fonction de l'objectif de la carte (son message et le public auquel elle s'adresse).

Prenons l'exemple de la cartographie de ZI pour un AZI : qu'il s'agisse de la trace du lit mineur ou des bâtiments particulièrement bien repérables sur un SCAN 25, ces éléments sont des caractéristiques importantes du fond de plan puisqu'ils permettent le repérage rapide du lecteur par rapport au terrain qu'il connaît bien. De manière générale, il est toujours très délicat de modifier les résultats de l'étude hydraulique pour les adapter au support. En effet, dans ce cas, cette modification devrait être avalisée rigoureusement par l'hydraulicien (surtout dans un contexte réglementaire). De plus, ce type de pratique pourrait conduire à de dangereuses dérives qui pourraient altérer l'interprétation des résultats de l'étude hydraulique. C'est donc bien le support qui doit être adapté aux autres données cartographiques et non l'inverse.

Il faut alors soit utiliser un autre support élaboré à partir des données de l'étude (Modèle Numérique de Terrain élaboré à partir des levés terrestres par exemple), soit saisir manuellement des corrections au support (d'après photographies par exemple).

3.5. Représentation des éléments à cartographier

Un inventaire, non exhaustif des symboles représentant typiquement les grandeurs hydrauliques a été effectué au fur et à mesure des principaux objets géographiques liées aux études hydrauliques.

Les limites de zones inondables posent souvent le problème d'incertitude des données topographiques et des résultats de l'étude lorsqu'un modèle fin n'a pas été jugé nécessaire, ou bien lorsque le problème de cohérence entre objets à cartographier et support

cartographique se pose. La situation en plan des limites de ZI est souvent cartographiée sur un support de type SCAN 25 ou EDR25, par exemple pour les AZI ou les PPRI, mais aussi pour des études d'aménagement : ceux qui consultent la carte l'utilisent pour un repérage relatif de la ZI et des éléments de type bâtiment. Pour représenter l'incertitude des résultats de l'étude et / ou du support cartographique, on peut utiliser telle ou telle forme d'objet. Ainsi, la limite de la zone inondée ou les éléments morphologiques comme la limite entre lit majeur et encaissant est quelquefois représentée à l'aide de pointillés pour exprimer l'incertitude liée à la position en plan de cette limite. Ce choix devrait entraîner logiquement la modification des objets représentant d'autres grandeurs hydrauliques : les limites d'isohauteur de submersion par exemple seront alors de préférence également en pointillés. Ce type de représentation cartographique est alors à choisir lorsque la lisibilité n'est pas altérée par une quantité trop importante de lignes en pointillés. Une autre solution serait de représenter une ligne représentant une limite de zone avec une épaisseur assez grande pour être comparable à l'incertitude évaluée. Dans ce cas, la ligne pourrait être colorée mais translucide pour une bonne lisibilité du support.

Dans la pratique, il n'y a pas de règle universelle concernant ce type de représentation, même en matière d'AZI et PPRI.

Pour ce qui concerne les intervalles de hauteurs de submersion, rappelons que les intervalles de hauteurs d'eau sont liés à la topographie locale et à la réglementation éventuelle (PPRI). Par exemple sur la Somme, les intervalles sont du type : hors d'eau, < 0.50m, de 0.50m à 1 m, > 1 m . En effet, le terrain est plat aux alentours et, par conséquent, une faible hauteur d'eau peut quand même signifier une grande étendue inondée. A contrario, sur le Rhin, les intervalles seraient les suivants : hors d'eau, < 0.50m, de 0.50m à 2 m, de 2 m à 4 m, > 4 m. Le nombre maximum d'intervalles préconisé est de 4 : au delà, la lecture de la carte n'est plus aussi aisée.

Enfin, si le choix de symboles est en général relatif au message et à la lisibilité liés à la carte, il est quelquefois nécessaire d'insérer des schémas ou images dans la base de données. Il s'agit par exemple de limnigrammes (graphe de hauteur de submersion en fonction du temps) en un point donné du domaine d'étude. Ce type d'objet est en général de plus grande taille que les symboles classiques. L'insertion dans une carte nécessite alors en général un cadrage étendu de la zone de terrain à représenter, de manière à placer l'objet dans une zone pour laquelle il n'est pas nécessaire de lire le fond de plan. La position géographique à laquelle doit être associé le schéma est alors souvent repérée par un trait ou une flèche entre cette position et le schéma.

4. préoccupations d'archivage

Les cartes liées à l'étude sont soit fournies sous forme de classeur A0 soit sous des formats A3 (ou A4). Pour un archivage utile, le cartouche doit renseigner au minimum sur la date, la nature exacte des informations cartographiées, l'échelle, le niveau de zoom (de préférence sous forme de barre sur la carte pour une carte destinée au grand public). Notons que sous le terme "nature exacte des informations cartographiées", qui se résume souvent à un titre rapide, il faut préciser les caractéristiques particulières de la planche : crue de projet, temps pour des informations instantanées, numéro ou dénomination de l'aménagement projeté, ... Les cartes A3 ou A4 sont le plus souvent attachées au rapport, ce qui garantit l'archivage minimum de la date. Mais inversement la petite taille du support ne permet souvent pas détailler toutes les informations dont on peut disposer sur un cartouche de carte A0. Il faut alors qu'un récapitulatif de ces cartes numérotées avec les détails manquants figure dans le même rapport que ces cartes.

Lorsque c'est possible (coût de l'étude, délais), la numérisation des informations cartographiées peut être utile pour constituer ou alimenter des bases de données. Dans ce cas, la numérisation de l'ensemble de la carte n'est pas d'une grande utilité : il n'est alors pas possible de dissocier les éléments de la carte et surtout de les géoréférencer correctement lorsque des transformations de projection sont nécessaires pour la cohérence de la base de données. Il faut donc spécifier (dès la commande) la livraison des "couches" d'informations indépendantes et suivant un format numérique utilisable par le Maître d'Ouvrage.

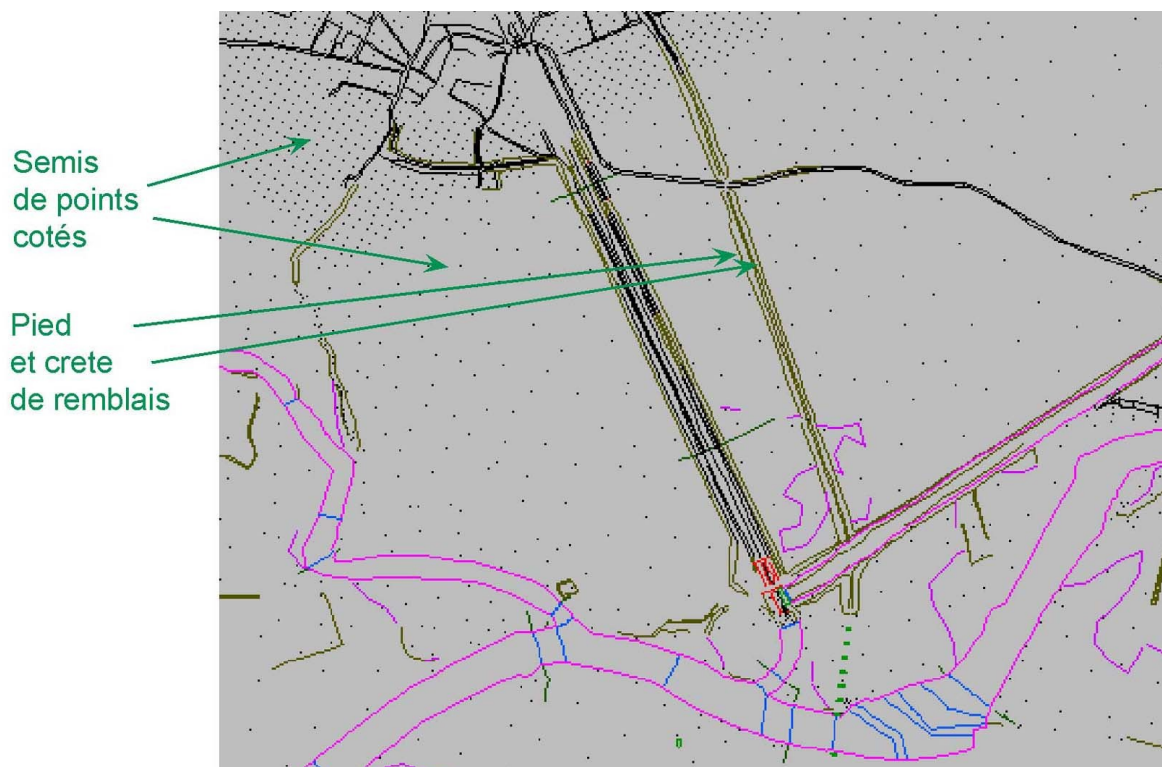
5. Catalogue des outils de cartographie

De manière générale, sur les documents utiles pour pouvoir comparer des outils de DAO et des SIG, signalons la référence [i] qui décrit les actions typiques pour élaborer une carte de bonne qualité et permet de se faire une idée de ce que doit pouvoir permettre un outil logiciel. D'autre part, le site du Pôle géomatique du CERTU, dont plusieurs pages sont citées ici par la suite, fournit en particulier des descriptifs et des comparatifs sur les outils SIG. Le site du CNIG, qui contient un ensemble de fiches destinés aux Maîtres d'Ouvrages, est aussi très utile¹².

Du point de vue du DAO, et par opposition aux SIG, le seul logiciel à notre connaissance qui permet de travailler avec des données géoréférencées est AutoCAD. C'est par ailleurs un outil très couramment utilisé. Des informations sur les outils DAO sont souvent résumées sur les sites spécialisés de nos services, voir par exemple http://portails.metier.i2/rubrique.php3?id_rubrique=3

Surtout pour les grandes et très grandes échelles, cet outil est en général utilisé pour le tri et la synthèse de données topographiques, jusqu'à l'élaboration du Modèle Numérique de Terrain (MNT).

AutoCAD est un outil utile principalement parce que les données des géomètres sont le plus souvent fournies sous forme de plan AutoCAD (stéréophotogrammétrie, levés terrestres,...). Lorsque la majorité des données se trouve sous cette forme (restitution photogrammétrique), il est judicieux de saisir ou transformer toutes les autres données vers le plan AutoCAD, qui permet de constituer une référence.



Dessin AutoCAD après tri et saisies complémentaires [CETEMéditerranée]

Les outils AutoCAD de mesure de distances (3D), de visualisation 3D,... permettent de préparer les données géométriques dans l'optique d'un maillage (taille des zones, pentes, tri des objets non cotés,...).

Pour un objectif cartographique, des outils de lissage et de schématisation automatique permettent de transformer un plan souvent très chargé en un fond de plan adéquat.

Enfin, les plans AutoCAD sont organisés sous forme de "couche", comme dans les SIG (appelés "calques" dans AutoCAD). Si le créateur du plan AutoCAD a organisé correctement ses

¹² <http://www.cnig.serveur-1.net/fiches/fiche41.pdf>

calques, ceci permet de sélectionner en même temps tous les objets de même type très rapidement sans avoir à trier manuellement ou surcharger inutilement les cartes ou plans imprimés des objets d'un type différents. L'importance de l'organisation par calque est bien connue des hydrauliciens utilisant des modèles 2D, pour lesquels le MNT est souvent élaboré à partir de fichiers AutoCAD élaborés par des géomètres : le temps nécessaire pour trier les objets tels que les traces de pied ou crête de remblais lorsqu'elles sont cotées ou non (et même des symboles ou textes placés sur le même calque que les entités topométriques cotés!), ou bien pour grouper les objets de même type comme les bâtiments en lit majeur,... est non négligeable.

L'application AutoCAD MAP propose des fonctionnalités d'importation et exportation permettant des interactions avec des SIG : exportation de cartes, définitions d'attributs pour un SIG,...

Enfin, le logiciel Outicad est une boîte à outils très utile qui complète les fonctionnalités d'AutoCAD¹³.

Les outils de cartographie les plus utilisés aujourd'hui sont les SIG. Cette famille d'outils se distingue du DAO par la dualité entre les concepts de couches d'objets superposables et d'attributs de ces objets (propriétés diverses attachées aux objets, sous forme de textes, codes, valeurs numériques, images,...).

Bien que l'objectif principal de ces outils soit beaucoup plus ambitieux, la dernière étape d'un projet construit sous SIG est la cartographie. Cette étape est de plus en plus exploitée pour produire les cartes fournies dans le cadre d'études hydrauliques.

Par exemple, les cartes de résultats de calculs d'études hydrauliques contenant des limnigrammes locaux, des valeurs de débits locaux, des dates d'origine des données,... peuvent être élaborées à partir de SIG. Dans ce cas, l'une des "couches" d'information du SIG peut contenir tous les limnigrammes locaux calculés en même temps, géoréférencés au point où ils sont calculés, sous forme d'image, de fichier Excel,... Cette "couche" peut éventuellement être complétée par la suite pour une mise à jour par exemple lors d'une étape de l'étude qui conclue qu'il faut augmenter le nombre de limnigrammes calculés. Ceci est bon à savoir pour les Maîtres d'Ouvrages pour juger par exemple des propositions de prestataires lorsque des calculs spécifiques supplémentaires sont demandés en option.

Par ailleurs, nous avons aussi vu que la cartographie et éventuellement l'archivage des bases de données de SIG peut dégrader la précision des objets. De plus, il n'est pas recevable d'effectuer des opérations de changement de référentiel via des outils SIG lorsque la précision des données topographiques doit être fine. En effet, les outils SIG proposent des changements de systèmes, utiles pour faire coïncider des données d'origines différentes, mais les conversions ne sont pas toujours effectuées avec rigueur. L'un des numéros de la revue Signature du CERTU montre par exemple que le passage d'un système de projection Lambert II étendu à un Lambert zone peut altérer certaines coordonnées avec un écart de l'ordre du mètre¹⁴. Alors que pour des échelles moyennes cette précision est parfaitement adaptée, elle est très insuffisante pour travailler à des échelles supérieures au 1/10 000.

Ainsi, les objets transformés sous SIG ne doivent en aucun cas être réutilisés pour des calculs comme si les grandeurs représentées étaient sous leur forme initiale.

En particulier, l'élaboration d'un maillage 2D (et même casiers lorsque la précision doit être fine et les casiers de petite taille) ne doit jamais être effectuée sous SIG ou postérieurement à un traitement SIG.

La dégradation de la précision des données de l'étude hydraulique au profit de leur représentativité, qui est utilement effectuée sous SIG, doit être très clairement connue des maîtres d'Ouvrages : l'annonce par un prestataire du projet d'utilisation d'une base de données de SIG comme donnée de calcul est un signe de grave incompétence (sauf s'il est justifié que la précision n'est pas un critère important de l'étude). Les données de calcul doivent toujours être réutilisées sous leur forme brute.

¹³ http://its.cete-mediterranee.i2/rubriques/DAO/documents_dao/outicad.htm

¹⁴ http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=4&rub=27, dossier Signature n°5.

Enfin, même **si les données topographiques sont stockées sans transformation de leur valeur brute sous SIG, il faut toujours identifier et cataloguer le référentiel dans lequel elles ont été définies**. C'est en validant la qualité de la donnée produite (précision, exhaustivité, actualité, limite de la gamme d'échelle d'utilisation...) que l'on peut donner des informations (méta données) sur les caractéristiques des données à stocker pour réutilisation éventuelle.

Du point de vue des outils SIG disponibles, signalons tout d'abord le logiciel **MapInfo**, qui est le plus répandu dans les services du Ministère, qui l'a sélectionné comme outil de référence. Ceci entraîne des formations, développements d'outils spécifiques et retours d'expériences, dont l'avantage est non négligeable. Des informations de détails sont disponibles sur divers sites¹⁵.

Vertical Mapper est un outil à part entière accessible dans MapInfo pour traiter les données 3D¹⁶, et Mapoutil fournit des outils complémentaires à MapInfo, développés par des utilisateurs¹⁷.

Notons un outil particulier utilisant la plate-forme MapInfo, pour des applications hydrauliques : **Ophyca** (Outil de Post-Traitement HYdraulique CARTographique), développé par la Sté Stratégis à partir des spécifications du CETMEF, des DIREN Centre et Lorraine, d'EDF/LNHE et de SOGREAH (distribution Stratégis). Il s'agit d'un logiciel proposant les outils de base simplifiés de MapInfo et des menus spécifiques permettant d'effectuer des calculs de post-traitement et des cartographies orientées vers les préoccupations des études hydrauliques ([^{vii}] et ¹⁸). Le logiciel permet par exemple de réaliser une cartographie de zones inondables à partir de différentes informations comme les laisses de crue (PHE) 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. Ophyca permet aussi, de par sa structure basée sur un SIG, de trier les objets trop denses par sélection sur la carte et sur la BD en parallèle.

Ces outils associés à MapInfo, et l'environnement de formation et de retour d'expérience, sont un argument important pour demander aux prestataires de fournir des cartes sous forme de tables MapInfo, pour insertion dans un SIG MapInfo déjà existant dans le service ou pour une insertion future.

Le logiciel **ArcView** semble plus pratique pour les manipulations avancées, suffisamment pour conduire certains Bureaux d'Etudes à acquérir les deux logiciels, ArcView pour effectuer le travail, MapInfo pour transformer les fichiers ArcView en Format MapInfo, qui est le plus souvent demandé par les DDE (<http://www.esri.com/software/arcview/>).

D'autres outils connus comme **ArcInfo**¹⁹, **GeoConcept**²⁰ et autres sont envisageables.

Dans une autre gamme d'utilisation, le logiciel ER-Mapper peut permettre d'utiliser des données en 3 dimensions ainsi que d'analyser des données sous forme d'images raster.

A propos d'outils de consultation de SIG, les "visionneuses" apparaissent comme une solution permettant l'accès aux données géographiques sans connaissances spécifiques concernant la manipulation des logiciels SIG (les fonctionnalités de l'outil SIG sont très simplifiées). Un diagnostic comparatif de plusieurs outils disponibles gratuitement chez les éditeurs de SIG ou ayant fait l'objet d'un développement au METLest proposé sur le site du CERTU²¹.

Pour MapInfo, la visionneuse se nomme Proviewer.

L'avantage des visionneuses est de permettre à un service non spécialisé de visualiser rapidement les données pour contrôler les produits livrés sans nécessité de contacter un service possédant la compétence métier nécessaire pour l'utilisation des SIG. Mais ces visionneuses sont

¹⁵ www.mapinfo.com, <http://its.cete-mediterranee.i2/rubriques/sig.htm>,...

¹⁶ http://its.cete-mediterranee.i2/rubriques/SIG/PND_vertical_mapper/vertical_mapper.htm, La 3^{ème} dimension géographique, CERTU, Collection Dossiers, Décembre 2001.

¹⁷ http://its.cete-mediterranee.i2/rubriques/SIG/sig_presentation.htm

¹⁸ <http://www.strategis.fr/ophyca> et plusieurs documents sur le site du CETMEF

¹⁹ <http://www.esri.com/software/arcgis/arcinfo/index.html>

²⁰ www.geoconcept.com

²¹ http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=5&rub=84

extrêmement limitées dans leurs fonctionnalités et ne remplacent en aucun cas un outil d'analyse SIG. Elles peuvent être utiles dans le cas où un système d'administration de données est en place dans une DDE car elle permet à partir du catalogue de données d'avoir un aperçu visuel d'une table ou d'un document Mapinfo.

6. rattachement à un SIG

Depuis plusieurs années, le ministère de l'Équipement développe une politique volontariste pour favoriser le développement et l'usage des SIG dans les services. Le pôle géomatique du CERTU est chargé de faire vivre et d'exploiter un observatoire portant sur le développement des SIG au METL en s'appuyant pour cela sur les PRD (Pôles Régionaux de Diffusion) des CETE. L'objectif principal est de faire connaître aux services centraux et déconcentrés les expériences menées par les services, ainsi que les évolutions prévisibles de la situation des SIG au METL. Le site du CERTU rapporte ainsi un recueil d'exemples d'usage des SIG au METL²². De même, le CERTU a développé sur son site une page sur la mise en œuvre des SIG et plus généralement sur l'administration des données localisées²³.

Les premiers SIG appliqués au domaine hydraulique commencent à voir le jour lorsqu'il y a un intérêt manifeste à rassembler plusieurs sources d'informations d'origines différentes. C'est le cas en particulier à l'occasion de la mise à jour d'AZI et l'élaboration des PPRI. En effet, ce type d'étude fait appel à un grand nombre de données historiques et d'études antérieures lorsqu'elles existent. De plus, des informations qui n'entrent pas dans le thème purement hydraulique ou hydrogéomorphologique sont utilisées (hydrologie, occupation du sol,...

Malheureusement, les moyens des services étant limités, le développement des SIG s'effectue lentement.

Ainsi, l'idée de faire en sorte que les données et résultats de l'étude hydraulique puissent être insérés le plus facilement possible dans un futur SIG que l'on espère imminent, peut tenter le Maître d'Ouvrage.

Mais la conception des SIG fait appel à des règles de conception et des pratiques très spécifiques, à des métiers distincts de ceux du domaine des études hydrauliques.

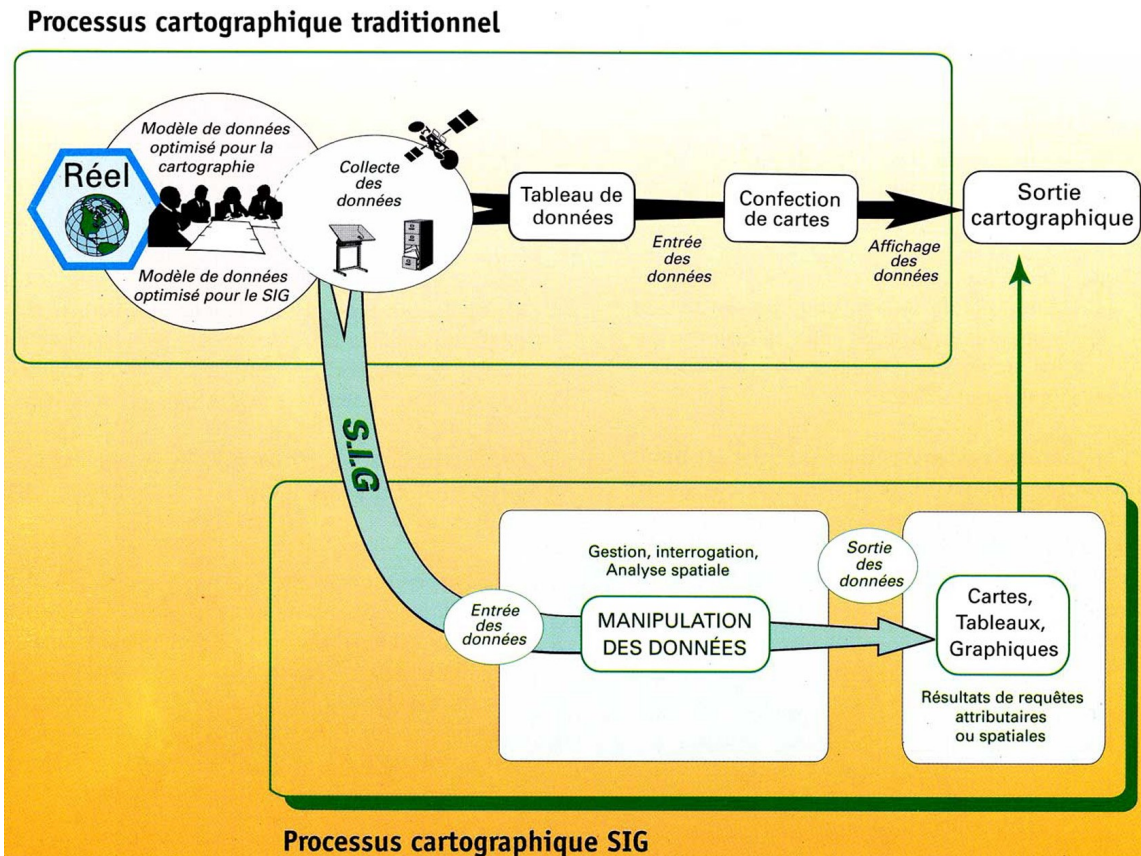
Conception de données géographiques

L'élaboration des cartes liées à l'étude hydraulique est grandement facilitée à partir d'un SIG. En effet, plusieurs outils permettent de faire gagner du temps, en particulier par l'automatisation de tâches, l'utilisation de bases de données de symboles, schémas, ... aux formats ad-hoc, ...

Par exemple, contrairement à la cartographie "papier" où une carte traditionnelle possède une échelle unique qui fixe à la fois son contenu, sa précision et sa représentation, la notion d'échelle liée à un SIG devient un peu plus complexe mais plus souple et très profitable en gain de temps.

²² http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=4&rub=31

²³ http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=3&rub=48



Extrait de [i]

Mais, en règle générale, la description d'une base de données géographiques, tant pour son contenu que pour son utilisation potentielle, est beaucoup plus complexe à percevoir et à spécifier qu'une carte papier.

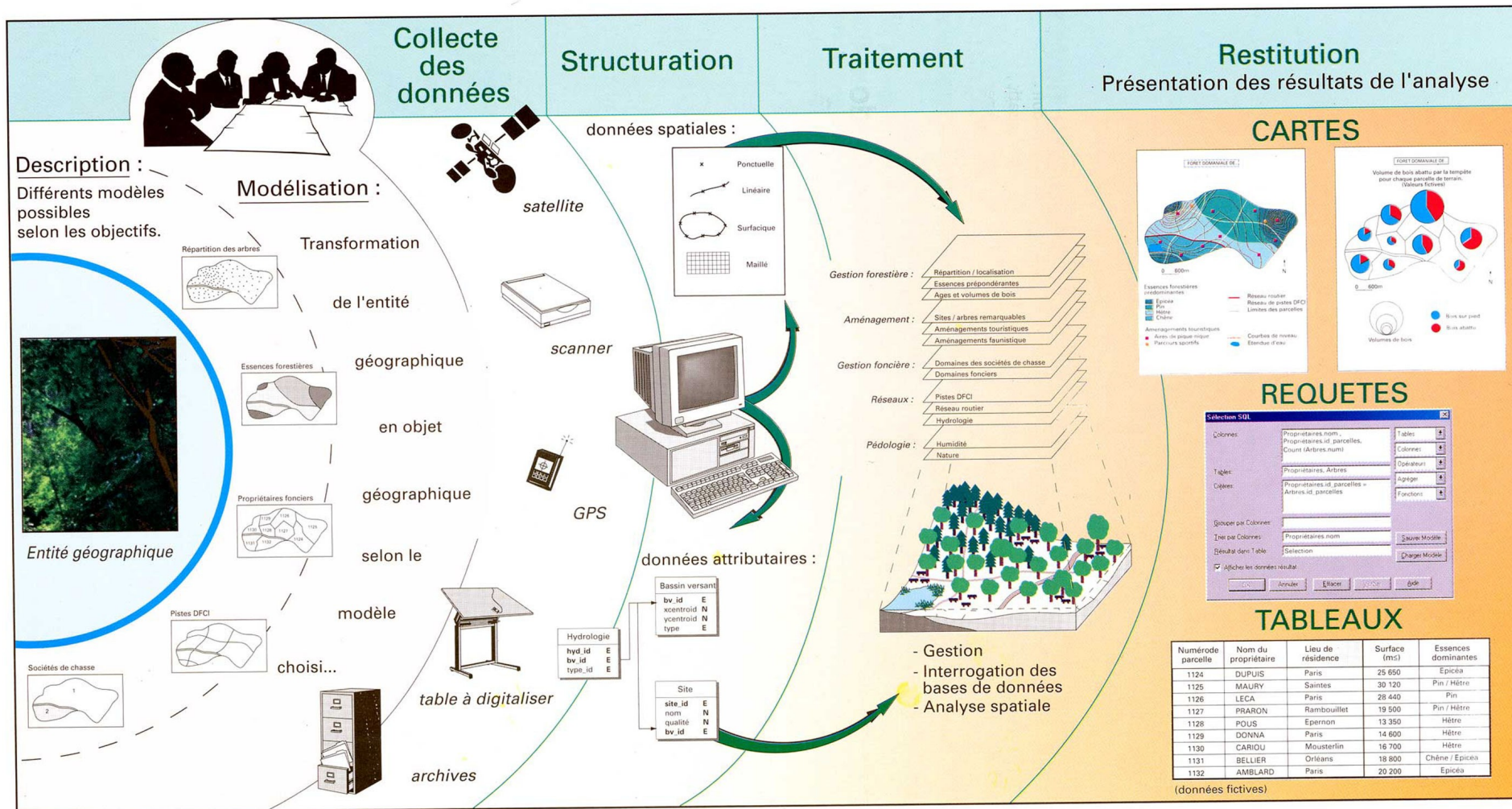
En effet, les règles de conception sont assez spécifiques. La conception des SIG fait référence à des tâches distinctes de l'étude hydraulique, les métiers sont différents. Par exemple il existe des règles fondamentales de saisie comme l'interdiction de faire figurer des primitives géométriques différentes sur une même couche d'information (surfaces, lignes, points). Les objets géographiques, au sens des SIG, sont la zone d'étude, les tronçons de cours d'eau, les éléments morphologiques, les limites de zones inondées,... Ils sont définis de manière très rigoureuse par un ensemble de caractéristiques comme un nom, un référentiel, des attributs,... Les attributs sont à leur tour définis par un libellé, des codes (nature de l'aléa par exemple), un format, une origine (calculé, saisi,...).

Dans [v], on trouve les conditions techniques de constitution d'un SIG des AZI, résultant d'un travail d'harmonisation entre la mise au point d'un SIG par le CETEMéditerranée pour la DIREN Corse et le SIG de la DIREN Midi Pyrénées dans le cadre de son programme d'atlas. Ces conditions techniques sont étendues au cas des PPRI.

Un exemple récent de conception d'un SIG est donné dans [viii], avec utilisation du logiciel MAPINFO 6.5.

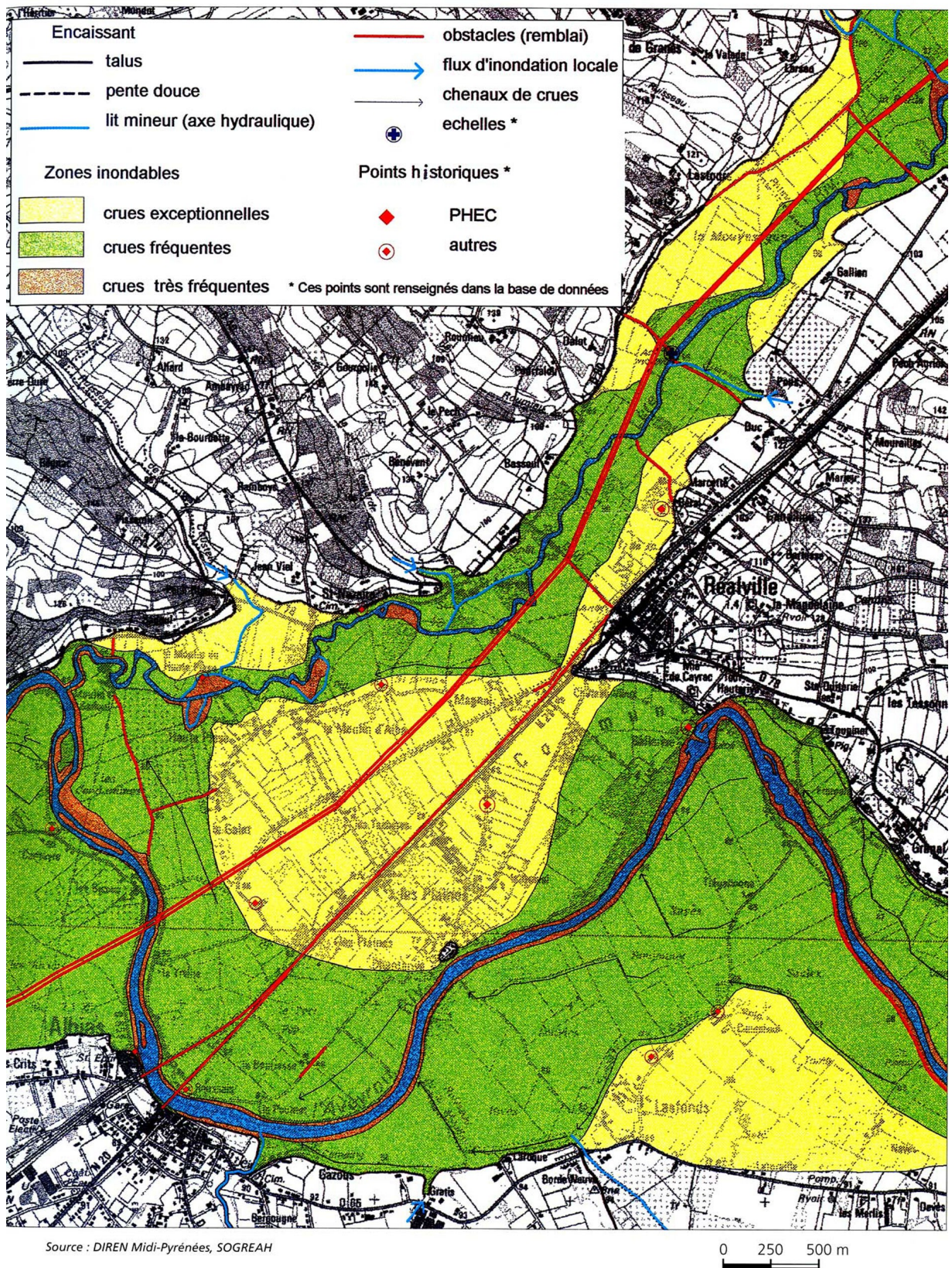
D'autres références d'exemple de SIG appliqués à l'hydraulique sont disponibles sur les sites qui ont été cités tout au long de ce chapitre, en particulier celui du CERTU.

Les différentes étapes de la démarche SIG



Extrait de [i]

Carte informative de l'atlas des zones inondables du bassin de l'Aveyron

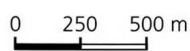
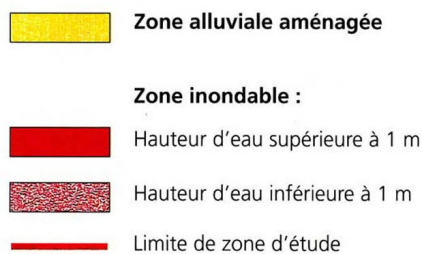
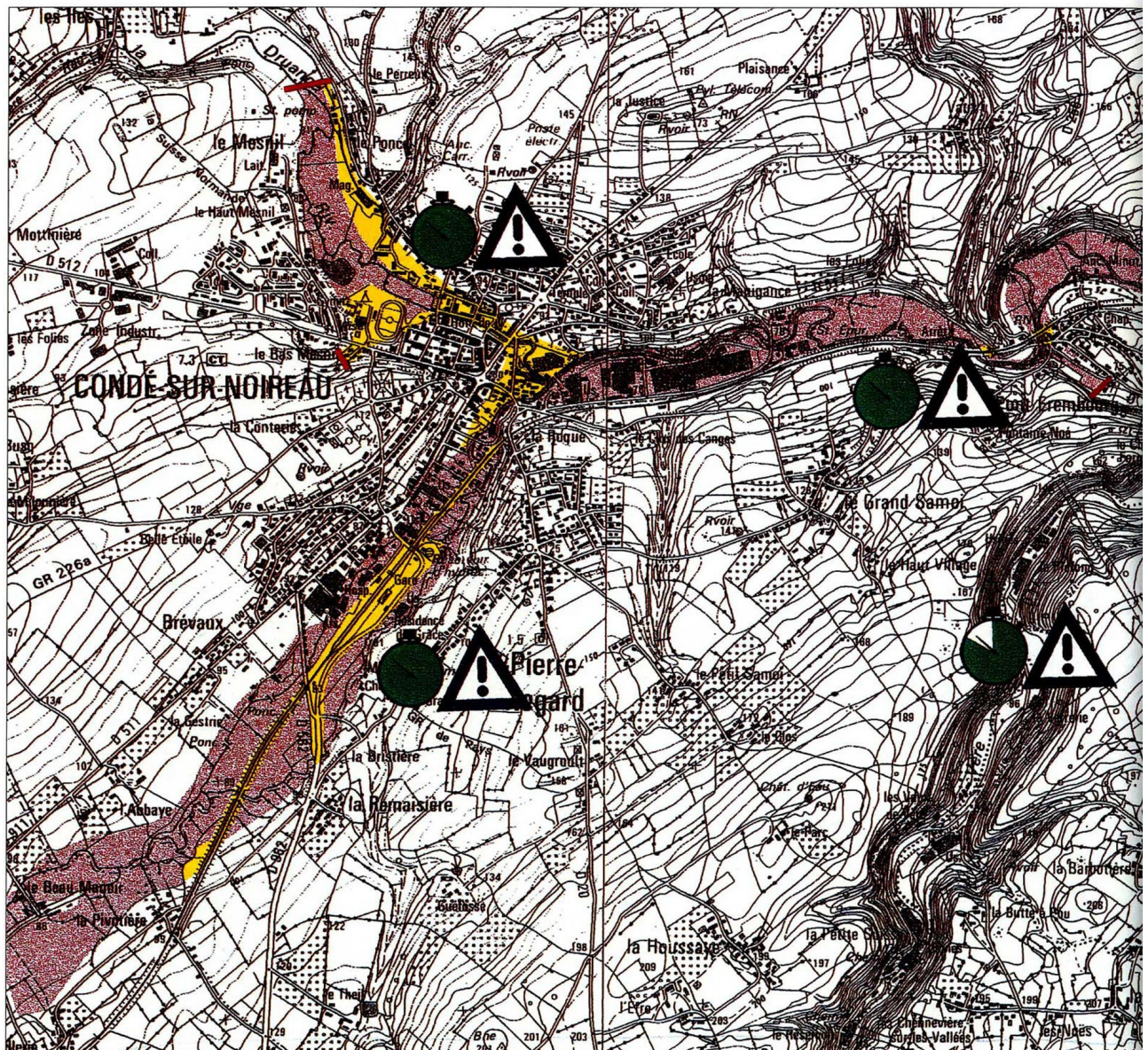


Extrait de [ii]

Rédaction provisoire, version 1. du 05 mai 2004

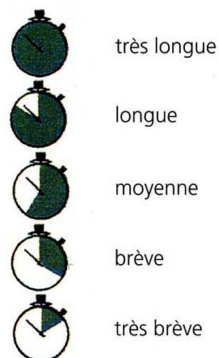
Cette rédaction provisoire n'a fait l'objet d'aucune validation ni par les organismes cités ni par l'organisme hôte ; à ce titre, elle n'engage que ses auteurs.

Carte des aléas de l'atlas des zones inondables de la vallée du Noireau (Calvados)

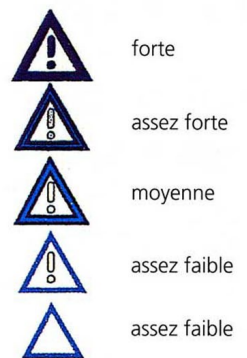


Source : DIREN Basse-Normandie

Durée au-dessus de la biennale :



Intensité de la crue :



Extrait de [ii]

Rédaction provisoire, version 1. du 05 mai 2004

Cette rédaction provisoire n'a fait l'objet d'aucune validation ni par les organismes cités ni par l'organisme hôte ; à ce titre, elle n'engage que ses auteurs.

GLOSSAIRE

AZI : Atlas des Zones Inondables
BD : Base de Données
MNT : Modèle Numérique de Terrain
PHE: Plus hautes Eaux
PPR: Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles
PPRI: Plan de Prévention des Risques naturels prévisibles Inondation
SIG : Système d'information Géographique
ZI : Zones Inondables

SITES À CONSULTER ET BIBLIOGRAPHIE COMPLÉMENTAIRE

- ⊗ Site de l'Institut Géographique National : <http://www.ign.fr/>
- ⊗ Site du Pôle géomatique du CERTU :
http://intra.certu.i2/Reseaux/TEC/SiteSIG/scripts_in/accueil.asp?th=1
- ⊗ Site de la Régie de Gestion des Données (géomatique) de la Haute Savoie
<http://www.rgd74.fr/index2.htm>
- ⊗ Site de la Commission Internationale pour la protection du Rhin
<http://www.iksr.org/cipr/index.htm>
- ⊗ Site du Conseil National de l'Information Géographique <http://www.cnig.fr/>,
<http://www.cnig.serveur-1.net/fiches/63ZInondables.htm>
- ⊗ Site de l'association française pour l'information géographique <http://www.afigeo.asso.fr/>
- ⊗ Site de l'Association Française pour la Prévention des Catastrophes Naturelles
<http://perso.wanadoo.fr/gerard.brugnot/>
- ⊗ Site d'information public sur les plans de prévention des risques du MEDD
<http://www.prim.net/>
- ⊗ La revue Géomètre n°11 de Novembre 2000 : plans cadastraux, évolutions et perspectives.
- ⊗ Plan de prévention des Risques naturels (PPR) – Risque d'inondation (ruissellement péri-urbain) – Note complémentaire, juin 2003.
- ⊗ Conception cartographique Gérard WEGER, mars 1999, téléchargeable :
http://www.enstg.ign.fr/Formation/Formation_Continue/Formation_interne/Supports_de_cours/PDF/carto_pdf/carto_vol1.pdf

RÉFÉRENCES DOCUMENTAIRES

- i [] Représentation cartographique – Guide méthodologique – CERTU- Juin 2001.
- ii [] Plan de prévention des risques naturels (PPR) – Risques d'inondation – Guide méthodologique, MEDD, METL, La Documentation française, Paris, 1999
- iii [] Cartographie des Zones Inondables – Approche hydrogéomorphologique – METT / MEDD – Editions Villes et Territoires – 1996
- iv [] Catalogue de techniques d'acquisition de données topométriques pour les études hydrauliques - CETE méditerranée, CETMEF, juin 2001.
- v [] Elaboration d'Atlas de Zones Inondables par des techniques d'analyse hydrogéomorphologique – Termes de référence du CCTP relatif à la réalisation de l'Atlas, Ouvrage collégial pour la DPPR, Mars 2001. Diffusé avec la circulaire du 1^{er} février 2002.
- vi [] Circulaire MEDD n° 426 24 juillet 2002 - Mise en œuvre du décret n°2002-202 du 13 février 2002 modifiant ou créant les rubriques 2.5.0, 2.5.2, 2.5.4 et 2.5.5 de la nomenclature "loi sur l'eau" et des trois arrêtés de prescriptions générales pour les opérations soumises à déclaration au titre de ces rubriques.- Annexe technique Rubrique 2.5.4
- vii [] Guide de prise en main du logiciel Ophyca – CETE méditerranée, CETMEF, avril 2002
- viii [] Conception d'un SIG Zones inondables, approche géomorphologique – Exemple de la zone hydrographique V605 sur l'Ouvèze – CETE méditerranée pour la DPSM/SI, septembre 2003.

TERMES RELATIFS AUX MARCHÉS PUBLICS EMPLOYÉS DANS LE CADRE DU PRÉSENT GUIDE

QUELQUES DÉFINITIONS ET CONSEILS

On entend par marché public tout contrat administratif conclu par une personne publique (État, collectivité locale, établissement public) avec des personnes publiques ou privées dans le but de répondre à ses besoins.

Les marchés publics ne relèvent pas des règles de contrat définies au niveau du code civil, mais du Code des Marchés Publics (décret n°2006-975 du 1^{er} août 2006).

Il peut s'agir :

- de marchés publics de travaux réalisant des travaux de bâtiment ou d'infrastructure ;
- de marchés publics de services qui ont pour objet la réalisation de prestations de services ;
- de marchés publics de fournitures concernant l'achat ou la location de produits ou de matériel (ex : achat de fourniture de bureau).

Pour ces différents type de marchés, des seuils (montant prévisionnel de la prestation) définissent les règles de passation (règles de publicité et types d'appels d'offres).

Les marchés relatifs à la réalisation d'études hydrauliques, relèvent des marchés de services (marchés de « prestations intellectuelles »).

Pour la définition et la portée des concepts figurant ci-dessous, le lecteur se référera au code des marchés publics, ainsi qu'à la loi M.O.P. (voir ci-après).

Les indications figurant dans le présent document ne sont que des commentaires.

ACTE D'ENGAGEMENT

L'acte d'engagement est la pièce par laquelle le soumissionnaire s'engage, dans un certain délai, à réaliser les prestations définies aux cahiers des charges moyennant le paiement d'une somme.

Cet acte d'engagement signé par la personne publique (cf. Code des Marchés Publics) constitue le marché.

Il est nécessaire que l'acte d'engagement comprenne au moins :

- la définition sans aucune ambiguïté des cahiers des charges et l'ordre dans lequel ces cahiers s'imposent aux autres (la divergence entre les pièces est source de contentieux) ;
- la définition sans aucune ambiguïté du prix, et le renvoi éventuel à un **Bordereau des Prix**, au **Détail Estimatif** ou à la **Décomposition du Prix Global et Forfaitaire** et dans ce cas il convient d'explicitier le « mode d'emploi » mais aussi les formules d'actualisation, de révision des prix etc...

On pourra aussi y trouver les délais¹ relatifs à la prestation : date du début de l'exécution des prestations (ou des différentes phases) par ordre de service (ou dès la notification), délais de réalisation des différentes phases, de validation des résultats par le maître d'ouvrage...

ASSISTANT AU MAÎTRE D'OUVRAGE (A.M.O.)

Le **maître d'ouvrage** peut recourir à un assistant, en vue de l'aider à la définition des prestations du bureau d'études (**cahiers des charges**), à la passation du contrat (élaboration du **dossier de consultation des entreprises**, jugement des offres etc.) et au suivi de l'exécution du marché tant sur les plans administratifs que techniques.

¹ Si ce n'est pas le cas, renvoi au Cahier des Clauses Administratives Particulières.

Le terme assistance à maîtrise d'ouvrage est en particulier applicable aux marchés de prestations intellectuelles (marchés de services).

AVIS D'APPEL PUBLIC A LA CONCURRENCE

Il constitue l'outil de la mise en concurrence². Les supports de publication de l'avis d'appel public à la concurrence sont fonction du type du marché, et de son montant (cf. seuils) : journal habilité à recevoir des annonces légales, B.O.A.M.P. (Bulletin Officiel des Annonces des Marchés Publics), J.O.U.E. (Journal Officiel de l'Union Européenne).

Ils doivent être rédigés soigneusement et comprennent, entre autres, obligatoirement :

- une description précise de l'objet du marché ;
- les dispositions relatives à l'obtention du **Dossier de consultation des entreprises** ;
- le type de procédure retenue ;
- le contenu des candidatures ou des offres ;
- les critères de jugement des candidatures/offres.

BORDEREAU DES PRIX UNITAIRES

Le B.P.U. (Bordereau des Prix Unitaires) se retrouve souvent dans les offres des entreprises. Dans le cas des marchés de prestations intellectuelles, il est principalement utilisé pour l'évaluation de prestations supplémentaires.

Il devrait pouvoir se raccorder à chaque produit ou élément d'ouvrage prévu par le C.C.T.P. (cf. **cahiers des charges**).

CAHIERS DES CHARGES

Les cahiers des charges déterminent les conditions dans lesquelles les marchés sont exécutés. Ils comprennent des documents généraux et des documents particuliers.

Les documents généraux sont :

- 1° Les cahiers des clauses administratives générales, qui fixent les dispositions administratives applicables à une catégorie de marchés ;
- 2° Les cahiers des clauses techniques générales, qui fixent les dispositions techniques applicables à toutes les prestations d'une même nature.

Dans notre cas, il n'existe pas de C.C.T.G. relatif à la réalisation des études hydrauliques. Il existe par contre un C.C.A.G. relatif aux marchés de prestations intellectuelles (« C.C.A.G. - P.I. »), au niveau duquel figurent en particulier les dispositions relatives à la propriété intellectuelle des prestations (cf. options A, B, C).

La personne responsable du marché décide de faire ou non référence à ces documents. Si elle le décide, la référence à ces documents doit être explicite. Les documents particuliers sont :

- 1° Les cahiers des clauses administratives particulières (C.C.A.P.), qui fixent les dispositions administratives propres à chaque marché. On y fixera notamment les options relatives à la propriété intellectuelle des prestations, la révision des prix, les modalités de paiement, les pénalités de retard, etc. ;
- 2° Les cahiers des clauses techniques particulières (C.C.T.P.), qui fixent les dispositions techniques nécessaires à l'exécution des prestations de chaque marché.

Le C.C.P. (Cahier des Clauses Particulières) est un document qui regroupe les clauses administratives et techniques. L'utilisation d'un C.C.P. se justifie lorsqu'il n'est pas nécessaire de

² Pour un montant des prestations compris entre 4 000 EUR HT et 90 000 EUR HT, le Maître d'ouvrage n'est cependant pas tenu de recourir à un avis d'appel public à la concurrence, et choisit librement « les modalités de publicité adaptées en fonction des caractéristiques du marché, notamment le montant et la nature des travaux, des fournitures ou des services en cause » (Code des Marchés Publics, art. 150).

distinguer le cahier des clauses administratives particulières du cahier des clauses techniques particulières. Cette simplification est souvent réductrice.

COMITÉ DE SUIVI INFORMEL

Nous souhaitons mettre en garde le lecteur quant au rôle que peuvent jouer des comités de suivi informels, constitués en règle générale, du maître d'ouvrage, de son assistant et d'un représentant de chaque organisme financeur. Le service en charge de la police des eaux y est parfois représenté. L'existence de ces comités et le rôle parfois ambigu qu'ils peuvent jouer vis à vis de la maîtrise d'ouvrage a été à l'origine d'importantes difficultés rencontrées dans le cadre de la réalisation d'études. En particulier, le représentant du service en charge de la police des eaux à ce comité, ne doit en aucun cas instruire ou participer à l'instruction du dossier d'autorisation présenté par le maître d'ouvrage au titre de la police des eaux.

Nous préférons ainsi délibérément utiliser le terme comité de suivi informel à celui de comité de pilotage, **le pilotage de l'étude relevant explicitement et strictement de la maîtrise d'ouvrage.**

Ce comité de suivi ne jouera ainsi qu'un rôle strictement consultatif, l'ensemble des décisions relevant du **Maître d'ouvrage**. En particulier, les organismes financeurs ne sauraient se substituer au **Maître d'ouvrage**. Si ce type de comité devait voir le jour, nous recommandons au **Maître d'ouvrage**, d'en définir au préalable les limites de l'exercice, et de rappeler aux différents partenaires présents dans quel cadre s'inscrit leur participation.

CONDUITE D'OPÉRATION

La conduite d'opération est un cas particulier de l'assistance à Maîtrise d'ouvrage ; ce terme est classiquement réservé à la définition et au suivi des prestations de Maîtrise d'Oeuvre (de bâtiment ou d'infrastructure).

Elle comprend souvent la réalisation du programme de l'opération (= la définition des prestations du maître d'œuvre), l'assistance apportée au maître de l'ouvrage pour la passation du contrat de Maîtrise d'œuvre, et le suivi de ses prestations en phase conception, et réalisation.

Ainsi, dans le cas des études hydrauliques, on emploiera de préférence le terme d'**Assistant au maître d'ouvrage**, pour désigner le bureau d'études chargé, pour le compte du maître d'ouvrage s'il en ressent la nécessité, de l'aide à la définition, à la passation, et au suivi des prestations du titulaire du marché.

DÉCOMPOSITION DU PRIX GLOBAL ET FORFAITAIRE

Le prix est global quant il tient compte de la totalité des prestations du marché c'est à dire que si une tranche est supprimée par le maître d'ouvrage, le titulaire du marché est en droit de demander des indemnités (économies d'échelle, etc.).

Les deux parties contractantes se sont déterminées sur un prix forfaitaire lorsqu'une fois l'acte d'engagement signé, aucune des parties ne peut revenir sur le prix (au motif par exemple qu'une partie serait jugée avoir fait trop de bénéfices, ou qu'elle se serait trompée etc.).

Les marchés d'études hydrauliques sont le plus souvent des marchés à prix global et forfaitaire. Ainsi, ils comprennent classiquement une décomposition de ce prix permettant de le détailler. Mais, l'attention est attirée sur le fait que si cette décomposition permet le paiement des prestations par tranche ou au pourcentage d'avancement, elle ne peut, sauf accord explicite, en aucun cas évaluer directement des diminutions ou des augmentations de prestations.

DÉTAIL ESTIMATIF

Lorsque l'acte d'engagement donne un montant approximatif du prix du marché en appliquant au bordereau des prix unitaires une estimation des quantités à mettre en œuvre, le détail de ces quantités approximatives figure dans un document appelé **détail estimatif** annexé à l'**acte d'engagement**.

Il s'agit dès lors de travaux dit « sur bordereau de prix unitaires » classiques en matière de voirie.

Pour les marchés de prestations intellectuelles (cas qui nous concerne), on a recours à des marchés forfaitaires et on utilisera soit la **décomposition du prix global et forfaitaire** pour les paiements, soit le bordereau des prix unitaires pour les travaux supplémentaires.

DOSSIER DE CONSULTATION DES ENTREPRISES

Le [Dossier de Consultation des Entreprises](#) (D.C.E.) est un dossier transmis au candidat par la personne publique. Il comporte les pièces nécessaires à la consultation des [candidats](#) à un marché.

Il comprend par exemple (liste non exhaustive) :

- le **règlement de la consultation** (R.C., obligatoire s'il ne figure pas déjà dans l'avis d'appel à la concurrence)
- l'**acte d'engagement** (obligatoire) ;
- le Cahier des Clauses Administratives Particulières (C.C.A.P.) (cf. **cahiers des charges**) ;
- le Cahier des Clauses Techniques Particulières (C.C.T.P.) (cf. **cahiers des charges**) ;
- un imprimé de listes de prix qui peut comprendre les pièces suivantes :
 - . la **décomposition du prix global et forfaitaire** (D.P.G.F.)
 - . le **bordereau des prix unitaires** (B.P.U.)
 - . le **détail estimatif** (D.E.)
- tout autre document susceptible de faire partie du D.C.E. (plans, ...).

LOI M.O.P.

Il s'agit de la loi relative à la maîtrise d'ouvrage publique (loi n°85-704 du 12 juillet 1985, version consolidée du 10 décembre 2004) et à ses rapports avec la maîtrise d'œuvre privée ; texte de référence auquel se rapportent en partie les termes du présent lexique.

MAÎTRE D'OUVRAGE

On appelle maître d'ouvrage l'entité porteuse du besoin, définissant l'objectif du projet, son calendrier et le budget consacré à ce projet. Le résultat attendu du projet est la réalisation d'un produit appelé ouvrage.

Le maître d'ouvrage maîtrise l'idée de base du projet et représente à ce titre les utilisateurs finaux à qui l'ouvrage est destiné.

Les maîtres d'ouvrages publics sont principalement (article 1 de la **loi M.O.P.** : l'Etat (et ses établissements publics), et l'ensemble des collectivités territoriales (conseils régionaux, conseils généraux, communautés d'agglomération ou de communes, syndicats, communes...).

MAÎTRE D'ŒUVRE

C'est une personne physique ou morale à qui le **maître d'ouvrage** confie son projet pour réaliser l'ouvrage. L'œuvre comprend la réalisation des études (phase conception) et le suivi des travaux (phase réalisation).

Ainsi le terme de maîtrise d'œuvre est classiquement réservé à des prestations visant à définir et à suivre des prestations de travaux.

Lorsqu'il s'agit de la définition et du suivi de prestations de services, on parle d'**Assistance à maîtrise d'ouvrage** (cf. la définition de l'article 6-1 de la loi M.O.P. : "assistance générale à caractère administratif, technique ou financier").

MANDATAIRE

On entend par mandataire, quelqu'un qui a reçu un mandat.

On distingue :

- le mandat de maîtrise d'ouvrage publique. Le maître d'ouvrage peut confier à un mandataire l'exercice de tout ou partie de ses attributions à l'exclusion des décisions qui doivent rester de son ressort, c'est-à-dire des décisions qui remettraient en cause le principe de libre administration des collectivités ou qui engageraient la qualité globale de l'ouvrage. Le mandataire agit alors "au nom et pour le compte" du **maître d'ouvrage** ;
- l'entreprise ou le bureau d'études mandataire dans le cadre d'un groupement. **Lorsqu'un groupement d'entreprises ou de bureaux d'études répond à un appel d'offres, on appelle mandataire l'entreprise ou le bureau d'études qui représente l'ensemble des membres vis-à-vis du maître d'ouvrage, et coordonne les prestations des membres du groupement.**

MÉMOIRE JUSTIFICATIF

Mémoire demandé au candidat à l'appui de son offre (méthodologie mise en oeuvre en vue de répondre aux exigences des **cahiers des charges**, moyens techniques et en personnels, curriculum vitae des intervenants etc...). La définition du contenu de ce mémoire est précisée au niveau du **règlement de la consultation**.

PRESTATAIRE ou TITULAIRE DU MARCHÉ

Bureau d'études, ou entreprise, retenu par le maître d'ouvrage, et chargé de l'exécution d'un marché public, dans les termes définis dans les **pièces constitutives du marché**.

NOTIFICATION DU MARCHÉ

C'est un acte administratif précis par lequel **le maître d'ouvrage** « notifie » au soumissionnaire qu'il est titulaire du marché. Cet acte permet au **titulaire** de nantir son marché.

PIÈCES CONSTITUTIVES DU MARCHÉ

Les pièces constitutives d'un marché sont (cf. Code des Marchés Publics, article 11) **l'acte d'engagement** et, le cas échéant, **les cahiers des charges**.

RÈGLEMENT DE LA CONSULTATION

Le règlement de consultation fixe les règles particulières de la consultation. Il est une pièce constitutive du dossier de consultation, sauf s'il figure dans l'avis d'appel à la concurrence.

Il fait référence à l'**Avis d'appel public à la concurrence** et comprend généralement :

- la description de l'objet et de la forme du marché ;
- ses caractéristiques principales (refus des variantes par exemple) ;
- les conditions relatives au marché (réponse à un ou plusieurs lots etc...) ;
- les modalités de remise des candidatures et/ou des offres selon la procédure retenue ;
- le contenu de l'offre (cf. mémoire justificatif, liste des références etc...) ;
- les critères de jugement des offres.

En particulier, dans notre cas, c'est au niveau du règlement de la consultation, qu'est définie ou non la nécessité pour le candidat de remettre **un mémoire justificatif** à l'appui de sa candidature, et le contenu de ce mémoire.