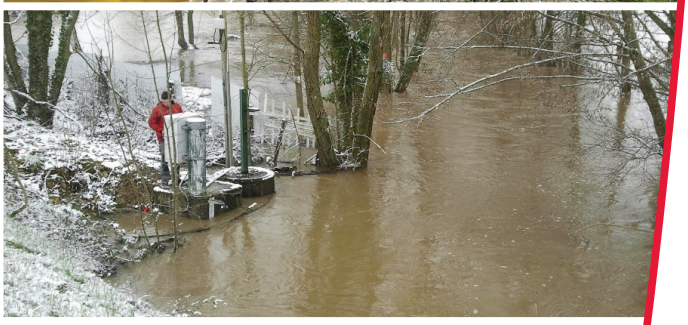
Charte qualité de l'hydrométrie

Guide de bonnes pratiques









Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

www.developpement-durable.gouv.fr

préface

Connaître les débits qui coulent devant nos yeux tous les jours dans les rivières : qui, dans le public, imaginerait qu'au XXIe siècle ce soit encore un défi ?

Les tensions sur l'usage des ressources en eau, liées à la croissance des besoins et aux évolutions climatiques s'exacerbent et l'exposition des biens et des personnes aux risques d'inondation ne cessent de croître. Dans bien des pays pourtant, cette connaissance, qui semble si élémentaire, est dramatiquement en recul. Nombre de réseaux d'observations sont abandonnés faute de moyens, de volonté et de compréhension de l'utilité de ces connaissances.

L'hydrométrie est à la fois une discipline scientifique extrêmement complexe, au carrefour des technologies et des théories les plus avancées, une pratique exigeante d'observation de terrain qui révèle toujours bien des surprises, car les rivières sont en perpétuel remaniement, et une activité qui se pratique dans des conditions qui peuvent être extrêmement périlleuses et dont il faut savoir absolument maîtriser les risques : débrouillardise et capacité d'initiative restent cruciales, mais méthode, rigueur et organisation peuvent seules assurer un résultat de grande qualité.

Répétons-le : les sciences hydrologiques sont des sciences de la nature. Comme telles, elle ne peuvent être bâties que sur l'observation scientifique, structurée et approfondie, de celle-ci. Aucun modèle ne s'en passe ni ne s'en passera jamais. Bien au contraire, donnez-leur des données : leurs progrès ne se nourrissent que de la qualité, de la densité et de la diversité des réseaux d'observation.

En France, cette discipline est active et bien vivante. Si bien des progrès restent à accomplir, elle s'appuie sur des équipes motivées, au sein des services de l'Etat et des grands opérateurs, qui partagent la conviction de l'importance et de la noblesse de cette tâche.

La première édition en 1998 de la charte qualité de l'hydrométrie, fruit du travail collectif de ces passionnés, avait tenu toutes ses promesses : outil destiné aux praticiens, ce guide des bonnes pratiques s'est rapidement révélé un véritable ouvrage de référence.

L'idée d'une nouvelle édition s'est imposée comme une évidence. Aussi visionnaire qu'ait été la première édition, les innovations qu'elle décrivait sont, en moins de vingt ans, devenues des outils quotidiens et en quelques années les pratiques se sont considérablement enrichies et de nouvelles pistes se sont ouvertes.

Cette édition renouvelle l'exploit de la première : être à la fois un guide pratique pour les équipes de terrain et un manuel de référence méthodologique parfaitement documenté, à la pointe des connaissances, qui satisfera les spécialistes les plus exigeants. Par cette qualité, cet ouvrage est le meilleur manifeste que l'on puisse imaginer pour promouvoir cette discipline et encourager les jeunes vocations à se tourner vers cette aventure : nos Tazieff et nos Cousteau de la prochaine génération ne seront-ils pas à l'évidence hydromètres ?

Merci mille fois à l'équipe qui s'est mobilisée pour ce remarquable travail.

Pierre-Alain Roche,
Président du CODOST

— avant-propos

La Charte Qualité de l'Hydrométrie a été publiée en septembre 1998 sous l'égide du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement. À l'heure de proposer une version actualisée du document, il paraît utile de revenir sur la définition du terme « Hydrométrie », ce qui revient à bien préciser le périmètre technique abordé.

En première approche, le terme « Hydrométrie » reste très général puisque formé de deux racines tirées du grec ancien, le préfixe hydro « qui se rapporte à l'eau » et métrie « mesure ». La définition qui en est donnée par l'Académie Française reste très proche de cette étymologie : *« Science qui a pour objet la mesure des propriétés physiques des liquides, et particulièrement de l'eau »* (Académie française 1986).

En suivant cette définition, un ouvrage traitant d'hydrométrie devrait aborder l'ensemble des techniques de mesure des paramètres physiques de l'eau dans tous ces états, pour tout type et pour tout régime d'écoulement.

En pratique, les techniciens et ingénieurs francophones ont réservé le terme « Hydrométrie » à la discipline qui s'attache à mesurer la hauteur et le débit des écoulements des rivières, ce qui restreint considérablement le périmètre de la définition. Ainsi, c'est peut-être celle donnée par le Larousse qui correspond le mieux aux usages de la communauté francophone : *« Science qui a pour objet de mesurer les propriétés physiques de l'eau et spécialement le débit des eaux superficielles et souterraines »* (Larousse en ligne[1]).

Le périmètre de la première édition de la charte était implicitement très proche de cette définition. L'ouvrage s'était attaché à décrire l'état de l'art des praticiens français de la mesure des débits des écoulements à surface libre. Le document se voulait simple et pédagogique et de fait, il est unanimement reconnu par les acteurs du domaine puisqu'il concourt à la formation des nouveaux arrivants et rafraîchit parfois les compétences des anciens. Il n'a pas valeur de norme et ne décrit pas dans le détail les modes opératoires, mais il constitue un « Code de Bonnes Pratiques » comme le précisait le sous-titre de l'ouvrage.

C'est avec le même périmètre et les mêmes objectifs pédagogiques que cette nouvelle édition a été conçue. L'ambition principale des rédacteurs était de compléter le document en abordant les nouvelles techniques et pratiques pour tenir compte des progrès accomplis depuis 1998. Cette version fait également l'objet de compléments thématiques jugés indispensables : enjeux de la discipline, rappel des fondamentaux physiques, incertitudes associées aux différentes phases d'élaboration des données, conditions d'hygiène et de sécurité pour les interventions de terrain, opérations à prévoir après des crues importantes pour capitaliser les informations disponibles.

La Charte n'a pourtant pas la prétention d'accéder au statut d'ouvrage académique. Aussi, les aspects les plus théoriques ne sont pas abordés. Pour ceux qui souhaitent approfondir les sujets, une bibliographie est mentionnée pour chaque chapitre et des « bonus » librement téléchargeables sur le site www.eaufrance.fr ont été rédigés par les auteurs. Ils permettent d'approfondir un sujet particulier et seront enrichis au fur et à mesure de l'évolution des pratiques et des connaissances.

Une analyse trop rapide des aspects techniques et scientifiques pourrait conclure à une relative simplicité de la discipline. Le métier d'hydrométre est pourtant complexe. Il requiert l'assimilation d'une somme importante de connaissances dans de nombreux domaines techniques. L'hydrométre accompli doit maîtriser l'hydraulique, les techniques de mesure et l'hydrologie. L'exploitation des réseaux de collecte des données hydrométriques nécessite aussi de solides connaissances dans la maîtrise d'ouvrage des travaux de génie civil, d'électricité voire de mécanique, ainsi que des aspects réglementaires.

L'hydrométrie est abordée dans certains cursus techniques, mais il n'existe pas en France de formation initiale de technicien hydrométre. La formation continue est donc devenue un enjeu important pour les services gestionnaires. La Charte Qualité de l'Hydrométrie s'intègre dans ce processus de formation continue pour donner les notions de base aux nouveaux venus dans le métier et pour actualiser les connaissances des hydrométres expérimentés. Elle s'inscrit également dans les processus d'amélioration continue mis en place dans les entités en charge de l'hydrométrie sous la bannière du « management de la qualité ».

Le choix a été fait d'appeler "hydrométres" les opérateurs spécialisés dans la mesure des débits des cours d'eau, en particulier les opérations de jaugeage, la gestion et la maintenance des stations hydrométriques et l'établissement des courbes de tarage et des hydrogrammes. D'autres termes tels que "hydrométricien", ou "hydrologue de terrain" ou "technicien d'hydrométrie" sont parfois cités dans la bibliographie, mais le terme d'hydrométre est aujourd'hui le plus couramment utilisé au sein de la communauté francophone.

1. http://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/hydrométrie/40849

— glossaire

Acronymes des organismes et termes administratifs

AFNOR
— Association française de normalisation

CEN
— Centre européen de normalisation

Cerema
— Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CNR
— Compagnie Nationale du Rhône

DCE
— Directive cadre sur l'eau

DICT
— Déclaration d'intention de commencement des travaux

DIREN
— Direction régionale de l'environnement

DREAL
— Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement

DTG
— Division Technique Générale d'EDF

DUERP
— Document unique d'évaluation des risques professionnels (décret 2001- 1016 du 5 novembre 2001)

EDF
— Électricité de France

Enedis
— Réseau et distribution d'électricité

IFORE
— Institut de formation de l'environnement

Ifsttar
— Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux

IRD
— Institut de recherche pour le développement

Irstea
— Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture

ISO
— Organisation internationale de normalisation

OIEau
— Office international de l'eau

Onema
— Office national de l'eau et des milieux aquatiques

PAPI
— Programme d'actions de prévention contre les inondations

PPRI
— Plan de prévention du risque inondation

SAC
— Service d'annonce des crues

SANDRE
— Service d'administration nationale des données et référentiels sur l'eau

Schapi
— Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations

SDAGE
— Schéma directeur d'aménagement et de gestion des eaux

SHC
— Service hydrologique centralisateur

SHF
— Société hydrotechnique de France

SPC
— Service de prévision des crues

SRAE
— Service régional de l'aménagement des eaux

UH
— Unité d'Hydrométrie

USGS
— United States Geological Survey

Termes techniques

ADCP
— Acoustic Doppler current profiler (profileur acoustique à effet Doppler)

ADSL
— Asymmetric Digital Subscriber Line (technique de communication numérique utilisée pour les accès internet)

EPI
— Équipement de protection individuel

GPRS
— General Packet Radio Service (norme pour la téléphonie mobile dérivée du GSM et permettant un débit plus élevé)

GPS
— Global Positioning System (Géo-positionnement par Satellite)

GSM
— Global System for Mobile Communications (norme pour la téléphonie mobile)

GUM
— Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure

H_ADCP
— horizontal acoustic Doppler current profiler (profileur acoustique à effet Doppler positionné horizontalement)

LSPIV
— Large-Scale Particle Image Velocimetry (vélocimétrie et débitmétrie par analyse de séquences d'images)

MES
— Matières en suspension

NGF
— Nivellement général de la France (réseau de repère altimétrique sur le territoire de la France)

RTC
— Réseau téléphonique commuté

V_ADCP
— Vertical acoustic Doppler current profiler (profileur acoustique à effet Doppler positionné verticalement)

VCNx
— Débit moyen calculé sur x jours consécutifs

— sommaire

1. Comprendre les enjeux et identifier les défis 06
1.1. Construction des réseaux de mesure 06
1.2. Évolutions techniques 08
1.3. Enjeux d'aujourd'hui et de demain 09
1.4. Défis à relever 09
1.5. Une communauté des hydromètres active 10

2. Bases théoriques de l'hydrométrie 11
2.1. Régimes d'écoulement 11
2.2. Contrôles hydrauliques 12
2.3. Sensibilité du contrôle hydraulique 15
2.4. Références 15

3. Choix et instrumentation du site de mesure 16
3.1. Comment choisir et instrumenter un site de mesure ? 16
3.2. Les différents types de stations hydrométriques 20
3.3. Vie de la station 23
3.4. Références 25

4. Jaugeage 26
4.1. Principales méthodes 26
4.2. Opérations préalables à la mesure 26
4.3. Jaugeages par exploration du champ de vitesses 27
4.4. Exploration quasi complète du champ de vitesses – Perche et saumon 28
4.5. Exploration quasi complète du champ de vitesses - profileur acoustique de vitesse (ADCP) 34
4.6. Exploration partielle du champ des vitesses 36
4.7. Dilution d'un traceur 39
4.8. Incertitudes associées aux jaugeages 41
4.9. Récapitulatif des différentes techniques de jaugeage 43
4.10. L'essentiel 43
4.11. Références 45

5. Courbe de tarage 47
5.1. Acquisition des données physiques 47
5.2. Construction de la courbe de tarage 49
5.3. Gestion des courbes de tarage 52
5.4. Incertitudes des courbes de tarage 52
5.5. L'essentiel 55
5.6. Références 55

6. Traitement des données 56
6.1. Traitement des données de hauteur et pré-validation des débits 56
6.2. Validation des données 57
6.3. Reconstitution des données manquantes 62
6.4. Traitement des données anciennes 64
6.5. Mise à disposition des données 64
6.6. Incertitudes sur les données produites 65
6.7. Références 66

7. Reconstitution de données hydrométriques post-crue 67
7.1. Intérêt et objectifs – Domaine d'application 67
7.2. Choix du site étudié 67
7.3. Réalisation des levés dans les sections retenues 68
7.4. Interviews de témoins 68
7.5. Estimation de la vitesse des écoulements 68
7.6. Critique des résultats 69
7.7. Références 70

8. Prévention des risques professionnels et formation en hydrométrie 71
8.1. Enjeux et réglementation 71
8.2. Prévention et responsables de services 71
8.3. Prévention et hydromètres 71
8.4. Quelques situations délicates 74
8.5. Formation en hydrométrie 75
8.6. Références 75

9. Normes en hydrométrie 76
9.1. Qu'est-ce qu'une norme ? 76
9.2. Normalisation en hydrométrie 76
9.3. Fonctionnement de la normalisation 78
9.4. Références 78

Annexe 79

Comprendre les enjeux et identifier les défis

— chapitre 1

Les objectifs et enjeux de l'hydrométrie ont évolué dans le temps sous la poussée démographique et l'accroissement des activités économiques. Les besoins de connaissance des phénomènes hydrologiques ont augmenté et ont suscité une démarche faite d'innovations qui se poursuit depuis le XIXe siècle, et s'accélère depuis le début des années 2000 (cf. figure 1.1). Ainsi, les effets conjugués des évolutions sociétales et des progrès scientifiques et techniques ont conduit à développer les réseaux d'observation en améliorant la qualité des mesures.

1.1. Construction des réseaux de mesure

L'hydrométrie moderne en Europe occidentale et en France en particulier, s'est développée au milieu du XIXe siècle sous l'effet de trois facteurs. Le premier tient aux grandes avancées des sciences physiques aux XVIIe et XVIIIe siècles lorsqu'en posant les bases de la mécanique, les savants de cette époque ont permis de comprendre les processus des écoulements. Le second est lié à la mise au point d'instruments de mesure dans le domaine de la topographie et à l'invention à la fin du XVIIIe siècle de deux instruments capables de mesurer la vitesse des écoulements : le tube de Pitot et le moulinet de Woltmann. Le troisième facteur est à rechercher du côté des grandes crues dévastatrices qui ont incité les pouvoirs publics à engager des mesures de protection sur les bassins de la Seine, de la Loire, de la Garonne, du Rhône, de l'Isère et de la Durance, pour ne citer que les plus marquantes.
C'est le corps des ingénieurs des Ponts et Chaussées qui prit les choses en main et amorça le développement d'un réseau de stations d'observation des débits. Le premier fut celui de la Seine, mis en place en 1854 sous la responsabilité de l'ingénieur en chef Belgrand, même si les premières mesures étaient très antérieures. Si l'objectif des premiers réseaux était bien de collecter des données pour comprendre les phénomènes de crue afin de s'en protéger, dès la fin du XIXe siècle apparut un autre besoin de quantification des débits pour évaluer la rentabilité financière d'exploitation de la force hydraulique, nommée « Houille Blanche ». C'est sous l'égide des « Grandes Forces Hydrauliques », un service du Ministère de l'Agriculture et des Travaux Publics, que ces réseaux se développèrent à

⊞ FIGURE 1.1 : ÉVOLUTION DES RÉSEAUX DE MESURE

	Antiquité : Egypte	Antiquité : Romains	Début XIXe
Besoins	Prévoir la production agricole liée aux crues du Nil.	Construire les aqueducs d'alimentation des villes.	Connaître et se protéger des crues sur les grands cours d'eau.
Sciences et techniques	« Nilomètres »	Premiers calculs de débit	Développement de la mécanique et de l'hydraulique. Généralisation de l'emploi du moulinet de Woltmann.
Réseaux de mesure	Le long du Nil		1832 : station du Pont de Mirabeau sur la Durance. 1854 : réseaux sur la Seine, la Loire.

partir de 1903 et jusqu'en 1920 avec la publication des chroniques de débit sous la forme d'annuaires. La SHF prit le relais de leur publication entre 1939 et 1958. À la fin de la deuxième guerre mondiale, l'État confia aux Circonscriptions Électriques la mission de développer et d'entretenir des réseaux pour développer les sources d'énergie. EDF, en tant qu'établissement public, prit part à ce travail, principalement sur les têtes de bassins de montagne. Au début des années soixante, l'État créa deux structures en charge de gérer les réseaux d'observation :

- les services hydrologiques centralisateurs (SHC) qui dépendaient du Ministère de l'Équipement, pour la gestion des crues sur les rivières domaniales (appartenant à l'État) ;
- les services régionaux de l'aménagement des eaux (SRAE) sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture, pour la gestion de l'irrigation sur les rivières non domaniales.

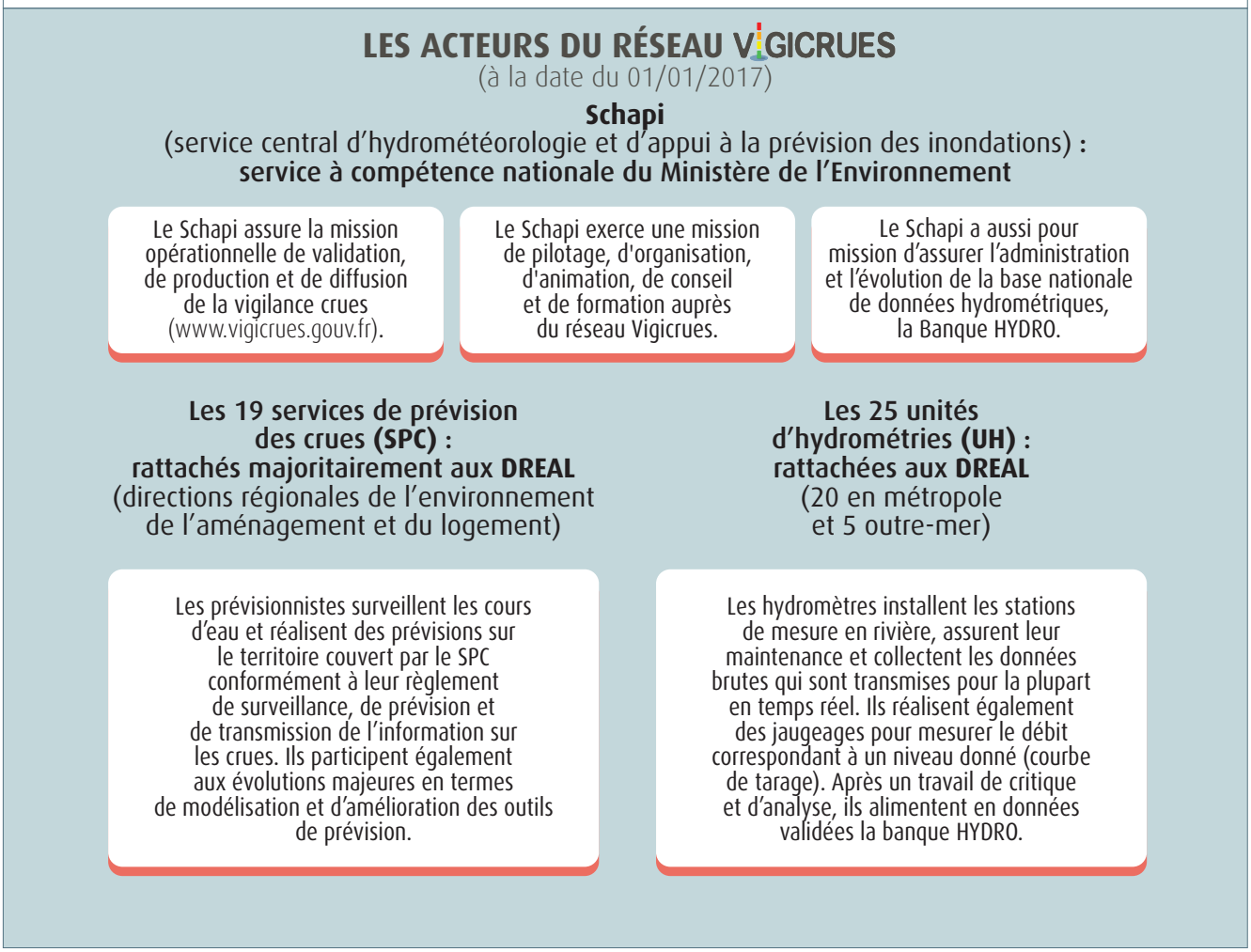
En 1977 furent créés les services d'annonce de crues (SAC) rattachés aux SHC pour améliorer la gestion des crises. En 1992, SHC et SRAE intégrèrent les DIREN, remplacées en 2010 par les DREAL. En 2003, les SAC sont devenus des SPC, animés par le Schapi, pour traduire l'évolution fondamentale de leur mission : prévoir et anticiper les crues grâce à l'exploitation de la prévision météorologique et la mise en place de modèles hydrologiques (cf. figure 1.2).

La réforme de l'organisation de l'hydrométrie de 2006[2] a permis de mettre en place une hydrométrie « unifiée » et modernisée au sein des services de l'État avec une réorganisation et une harmonisation des différents réseaux (hydrométrie générale, annonce des crues). Depuis, sur un territoire donné, un seul service de l'État[3] produit toutes les données hydrométriques répondant aux divers besoins liés à la mise en œuvre des missions de l'État. L'ensemble des observations hydrométriques produites par l'État sont centralisées dans la Banque Hydro, c'est la banque nationale de données hydrométriques et hydrologiques. Les données sont mises à disposition gratuitement sur internet (www.hydro.eaufrance.fr). Le versement des données produites par les autres gestionnaires[4] relève d'une démarche volontaire. En 2016 en France, le nombre de points de mesure gérés par les acteurs historiques (État, EDF, CNR, gestionnaires de la ressource en eau) est estimé entre 3 500 et 4 000 avec un effectif d'environ 500 personnes.

2. Circulaire du 13 avril 2006 relative à l'organisation de l'hydrométrie dans les DIREN et les SPC. DEVO0650321C
3. Les Unités d'Hydrométrie en DREAL
4. C'est-à-dire les maîtres d'ouvrages de réseaux hydrométriques qui ne sont pas sous la responsabilité de l'État

Fin XIXe – mi XXe	Mi à fin XXe	XXIe
Dimensionner et exploiter les installations hydro-électriques.	Annoncer les crues. Exploiter la ressource en eau : hydroélectricité et agriculture.	Prévoir les crues. Gérer la ressource en eau. Connaître et réduire les impacts de l'homme sur l'environnement et les cours d'eau.
Développement de l'utilisation de la force hydraulique. Création Société Hydrotechnique de France. Observations manuelles puis limnigraphes.	Automatisation de la mesure de hauteur, télétransmission. Développement des mesures de vitesses par hydro-accoustique.	Modélisation numérique exploration scientifique des procédés de mesure, des incertitudes. Techniques de mesures plus rapides et automatiques (velocimétrie radars et vidéo).
Extension des réseaux sous l'égide des « Grandes Forces Hydrauliques », service du Ministère de l'Agriculture et des Travaux Publics.	Développement de réseaux dédiés aux besoins (SHC et SRAE), mise à disposition des données via une base de données nationale.	Réforme de l'hydrométrie unifiant les réseaux d'État. Création du Schapi et des SPC. Partenariat avec les réseaux non État. Émergence d'une communauté de praticiens et de chercheurs.

FIGURE 1.2 : ORGANISATION DES SERVICES DE L'ÉTAT (À LA DATE DU 01/01/2017)



1.2. Évolutions techniques

L'évolution technique de l'hydrométrie moderne peut être découpée en quatre époques. L'époque pionnière, qui couvre globalement le XIXe siècle, avec une instrumentation encore balbutiante et des observations manuelles/visuelles des hauteurs d'eau (repères, échelles). L'époque qui s'étend sur la quasi-totalité du XXe siècle, de la mise en place d'observations en continu avec la généralisation progressive des limnigraphes associés à des échelles et le perfectionnement des techniques de jaugeages. À partir de 1980, apparaît l'époque de l'automatisation de l'acquisition des données, la généralisation des transmissions en temps réel des observations et l'émergence de techniques hydro-acoustiques issues de l'océanographie pour la réalisation des jaugeages. Depuis les années 2000, s'est ouverte une quatrième époque plus axée sur la gestion des points de mesure et les stratégies à mettre en place pour l'établissement des courbes de tarage ou les procédés de validation et de critique des données issus des apports méthodologiques des modélisateurs. L'évolution du contexte sociétal avec d'une part, la prise en compte des enjeux environnementaux traduite en matière d'exigence par la DCE en 2000 et ses déclinaisons opérationnelles dans les SDAGE et d'autre part, la répétition d'épisodes de crues intenses avec de graves conséquences humaines et économiques, a probablement favorisé la prise de conscience de la nécessité de disposer de données de meilleure qualité pour aider aux prises de décisions dans les situations de crise (crue ou étiage). Cela s'est traduit par la promotion de sujets de développement propres à l'hydrométrie dans les laboratoires de recherche, en particulier les techniques de mesure sans contact (vélocimétrie vidéo, radar) et l'analyse des incertitudes. Depuis 2005, une communauté de praticiens s'est également organisée spontanément : le « Groupe Doppler Hydrométrie ». Cette structure informelle fédère néanmoins largement la communauté francophone et génère des forums techniques sur internet très instructifs. L'ensemble de ce contexte devrait permettre de faire progresser rapidement la manière de gérer les réseaux de mesure.

1.3. Enjeux d'aujourd'hui et de demain

Les efforts déployés par les pouvoirs publics dès le milieu du XIXe siècle, puis par les promoteurs de la force hydraulique au début du XXe siècle permettent à la France de disposer d'un réseau d'observations relativement dense qui tente de répondre aux enjeux suivants : sûreté des ouvrages hydrauliques ou industriels, sécurité des personnes et des biens, qualité environnementale des rivières et partage de la ressource en eau. Loin de régresser, l'importance de ces enjeux ne fait qu'augmenter.

Les enjeux concernant la sûreté et la sécurité publique ont évolué avec la démographie. L'exode rural et l'augmentation de la population ont conduit les collectivités locales urbaines à augmenter les surfaces construites. Certaines zones agricoles se sont ainsi urbanisées. C'est souvent au bord des rivières et parfois sur des terrains inondables que ces extensions se sont faites. Autrefois cantonnée au linéaire aval des grandes rivières et des fleuves, la surveillance et l'anticipation des crues doit désormais s'exercer sur l'ensemble du territoire.

La prise de conscience de l'importance des enjeux environnementaux, en particulier sur le réseau hydrographique, constitue une évolution sociétale majeure de la fin du XXe siècle. La préservation des milieux aquatiques est devenue une priorité avec la mise en place d'une réglementation plus contraignante pour tout ce qui concerne les prises et rejets d'eau dans les rivières. Les mesures de données de débit associées aux mesures physico-chimiques, de transport sédimentaire ou de biologie, permettent le contrôle de la qualité environnementale des cours d'eau. Les liens entre mesures de la qualité et de la quantité des eaux sont devenus très forts et il apparaît de plus en plus évident que la connaissance des flux devient un des enjeux majeurs. Aussi, les travaux des écologues, des hydromorphologues et des hydrométres doivent-ils être coordonnés.

Le partage de la ressource en eau constitue un autre enjeu, capital pour les grands équilibres des territoires. Outre l'eau potable qui reste prioritaire sur tous les autres usages, l'irrigation des terres agricoles, les activités industrielles et les activités touristiques représentent des moteurs économiques capitaux pour toutes les régions de France. Lorsque des pénuries surviennent, la quantification des ressources disponibles prend encore plus d'importance pour les prises de décision des responsables publics.

À ces enjeux s'ajoutent la compréhension et le suivi de l'impact du changement climatique sur le régime et les valeurs extrêmes de débit des cours d'eau. Plus que jamais, ils nécessitent la constitution de séries temporelles longues, continues et homogènes, dont les incertitudes sont connues, afin de les insérer dans le puzzle des disciplines contribuant à la connaissance globale de l'environnement et de ses changements.

1.4. Défis à relever

Les enjeux qui viennent d'être inventoriés impliquent une adaptation des pratiques, des techniques et peut être, des organisations. Ces évolutions constituent autant de défis à relever qui sont présentés sous forme de questions dans les paragraphes ci-dessous et auxquelles la Charte tente de répondre en partie tout au long du document.

1.4.1 Préservation des séries de données patrimoniales

Grâce aux séries chronologiques patiemment constituées depuis des dizaines d'années, les hydrologues sont en mesure de proposer des outils de modélisation de plus en plus performants pour la gestion de la ressource en eau, la prévision des phénomènes de crues et les études de pré-dimensionnement d'ouvrages. Toutefois, les besoins en données de débit ne se sont jamais démentis et on déplore plus souvent leur absence que leur abondance. La dimension patrimoniale des données produites, la garantie de leur conservation dans le temps et leur transmission aux générations futures constituent un premier défi qui peut être formulé ainsi :

— Comment assurer l'archivage des données et en homogénéiser la diffusion ?

1.4.2 Pérennité des réseaux de mesures et ouverture à de nouveaux acteurs

L'évolution des enjeux sociétaux tels qu'ils ont été rappelés précédemment augmente encore les besoins en données de débit. Aussi, de nouveaux acteurs s'ouvrent aux métiers de l'hydrométrie : collectivités locales, établissements publics territorial de bassin, syndicats de rivières, etc., avec quelques questions sous-jacentes :

— Comment implanter des nouveaux points de mesure de manière complémentaire à ceux déjà existants ?

— Comment assurer la qualité des données produites pour qu'elles viennent enrichir le patrimoine existant de manière cohérente avec les outils mis en place par les services de l'État ?

— Dans un contexte de restriction budgétaire, comment argumenter l'intérêt de préserver, voire de développer les réseaux hydrométriques et comment assurer la pérennité de leur exploitation tant en termes de financement que de compétences ?

1.4.3 Maîtrise des incertitudes

Lors des crises (sécheresses ou crues), les données hydrométriques rentrent directement dans les processus de décision des gestionnaires pour la gestion en temps réel mais également dans l'analyse a posteriori pour le règlement des litiges. Dans tous les cas, la maîtrise (quantification et réduction) et la communication des incertitudes sur les données produites apparaît comme un défi important à relever. Plusieurs sujets de recherche sont en cours en France sur ce thème et l'examen de la bibliographie mondiale montre que de nombreux points restent encore à défricher.

— Comment quantifier et réduire les incertitudes associées aux données anciennes et nouvelles ?

1.4.4 Valorisation et sécurisation du métier des hydrométres

Le métier des hydrométres est complexe et varié : gestion des stations de mesure, jaugeages, élaboration des courbes de tarage, traitement et stockage des données. Il nécessite de nombreuses connaissances et comporte un certain nombre de risques qui doivent être limités au maximum. Il est donc nécessaire d'adapter les sites de mesure de manière à faciliter et à sécuriser toutes les opérations de maintenance et de mesure.

Sur le plan des techniques de mesure, des efforts ont été déployés pour promouvoir des systèmes non intrusifs dans l'écoulement que ce soit pour des observations permanentes, pour des mesures ponctuelles, ou

⊞ INTERCOMPARAISON DU GROUPE DOPPLER HYDROMÉTRIE, BARRAGE EDF DE CHAUVAN, NOVEMBRE 2016 (USGS)



pour des estimations post-événement. La généralisation de ces dispositifs constitue un gage de sécurité pour le personnel lors des épisodes de crue et de fiabilité pour le matériel.
La capacité à relever tous ces défis dépend d'abord de la qualité de la formation des agents en charge de la discipline. L'enrichissement des cycles de formation continue doit être poursuivi. Le développement d'outils performants de traitement des données et l'accès à une documentation technique et scientifique sont également indispensables.

— Comment maintenir voire développer les compétences des intervenants tout en renforçant la culture de la sécurité ?

1.5. Une communauté des hydromètres active

La communauté des hydromètres français rassemble les services de l'État, les établissements publics, les organismes de recherche et d'enseignement supérieur, les gestionnaires de la ressource en eau et les entreprises de production d'énergie. Une animation technique et scientifique est en place depuis quelques années avec la tenue régulière de « Journées de l'hydrométrie » sous l'égide du Schapi, l'organisation de colloques grâce à l'engagement de la SHF et des intercomparaisons de débit sur un même site sous la houlette du Groupe Doppler Hydrométrie. Enfin, la participation française à la normalisation internationale, avec la relance de la commission X10C de l'AFNOR en 2014, devrait permettre de renforcer la reconnaissance technique de la discipline.

Bases théoriques de l'hydrométrie

— chapitre 2

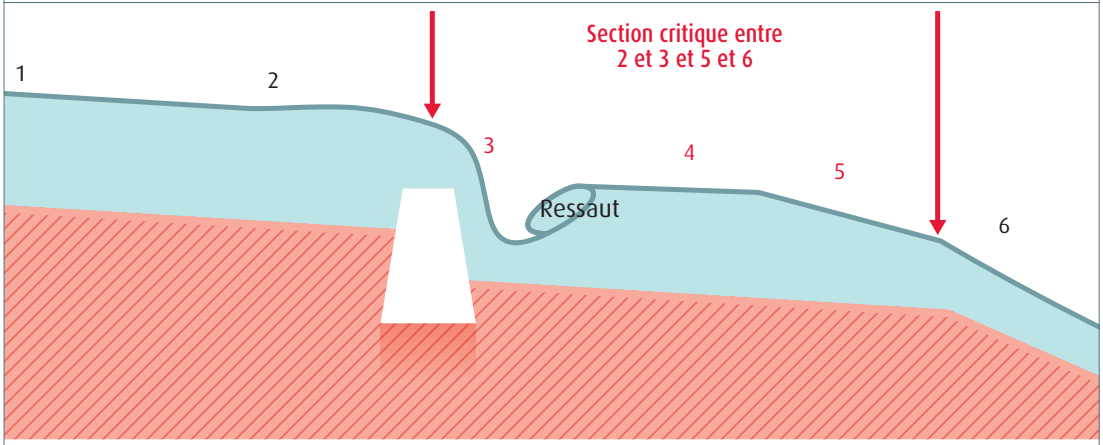
La mesure en continu d'un débit (volumique) d'une rivière est complexe. Toutes les techniques de mesure directe du débit sont en effet difficiles à mettre en œuvre et mal adaptées aux conditions changeantes des écoulements. Il faut donc avoir recours à des approches indirectes nécessitant la mesure d'un ou plusieurs paramètres et la construction d'une loi d'étalonnage, pour élaborer des chroniques de débit (hydrogrammes).
Les particularités des conditions d'écoulement à surface libre et les lois de l'hydraulique qui s'y rattachent sont utilisées pour mesurer le débit en continu en un point donné. Les sites où sont implantés les matériels de mesure et de transmission des informations sont appelés « stations hydrométriques » (cf. chapitre 3). La technique la plus répandue consiste à enregistrer la hauteur (h) du cours d'eau en un endroit où elle est reliée au débit de manière univoque. La chronique de hauteur est nommée limnigramme. Une loi de transformation hauteur-débit ou « courbe de tarage » (cf. chapitre 5) est alors établie à partir de mesures ponctuelles de débit appelées couramment « jaugeages » (cf. chapitre 4). Ceux-ci sont effectués pour les différentes gammes de débit observées sur le cours d'eau.

Dans l'immense majorité des cas, ils sont réalisés selon la méthode de l'exploration du champ des vitesses (mesures réparties dans une section droite), avec des matériels tels que : moulinet d'hydrométrie, vélocimètre électromagnétique, profileur à effet Doppler, flotteurs, analyse d'images, radars. La méthode par dilution d'un traceur constitue une alternative intéressante voire indispensable, notamment dans les conditions d'écoulement torrentiel. La méthode volumétrique, la plus directe, reste limitée aux petits, voire très petits débits.

2.1. Régimes d'écoulement

La relation hauteur-débit dépend des conditions d'écoulement locales. Un bref rappel sur les régimes d'écoulements permet de mieux comprendre les propriétés de l'hydraulique utilisées en hydrométrie. Le lecteur curieux et souhaitant approfondir le sujet peut se reporter aux différents ouvrages cités dans la bibliographie.
Afin d'utiliser les propriétés hydrauliques adaptées, il est

⊞ FIGURE 2.1 : RÉGIMES D'ÉCOULEMENTS D'APRÈS DEGOUTTE 2006



1 : Régime uniforme fluvial – Station à contrôle par le tronçon
2 : Régime graduellement décéléré – Station à contrôle par la section en bénéficiant du seuil
3 : Régime rapidement accéléré – Non adapté à l'implantation d'une station
4 : Régime uniforme fluvial – Station à contrôle par le tronçon
5 : Régime rapidement accéléré – Station à contrôle par la section en bénéficiant du changement de pente
6 : Régime torrentiel – Non adapté à l'implantation d'une station

5. La formule avec h (hauteur de l'écoulement) n'est valable que pour une section rectangulaire. Sinon, il faut utiliser S/L (hauteur - ou profondeur - moyenne de l'écoulement)

nécessaire de connaître ou reconnaître le régime d'écoulement, fluvial ou torrentiel, du cours d'eau au point de mesure à partir du nombre de Froude[5] qui exprime le rapport entre la vitesse du courant et la vitesse des ondes gravitationnelles (célérité). Le nombre de Froude est adimensionnel.

Équation 2.1 :

V : vitesse de l'eau [m/s]
g : accélération de la pesanteur [m/s²]
h : hauteur de l'écoulement [m]

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

En régime fluvial (Fr <1), l'écoulement est lent et influencé par l'amont (les volumes d'eau qui arrivent) et par l'aval. En régime torrentiel (Fr>1), l'écoulement où la gravité domine est rapide et uniquement influencé par l'amont.
La figure 2.1 proposée par Degoutte (2006), permet de relier les différents régimes hydrauliques rencontrés dans un cours d'eau aux types de contrôle qui sont exposés plus loin et d'indiquer la capacité de chacun d'eux à constituer un contrôle hydraulique.

POINT D'ATTENTION !

**Ne pas confondre régime fluvial (sub-critique) ou torrentiel (super-critique) avec régime laminaire ou turbulent.
Un écoulement laminaire est caractérisé par le déplacement en parallèle des filets d'eau qui le composent sans que ceux-ci ne se mélangent jamais, à l'inverse de l'écoulement turbulent.
Le calcul du nombre de Reynolds permet de déterminer le caractère laminaire ou turbulent. Les conditions d'écoulement dans un cours d'eau ne sont jamais laminaires, il subsiste toujours une certaine turbulence.**

2.2. Contrôles hydrauliques

La plupart des stations hydrométriques exploitées en France sont implantées sur des sites où la relation hauteur-débit est réputée univoque du fait de la présence d'un contrôle hydraulique dans l'écoulement. Ce dernier peut être formé par une singularité naturelle du profil d'écoulement : rupture brutale de la pente de la ligne de fond, enrochements formant obstacle, resserrements naturels, ouvrages d'art, etc. On parle alors de section de contrôle où l'écoulement passe en régime critique et la relation entre hauteur et débit s'exprime analytiquement de la manière suivante :

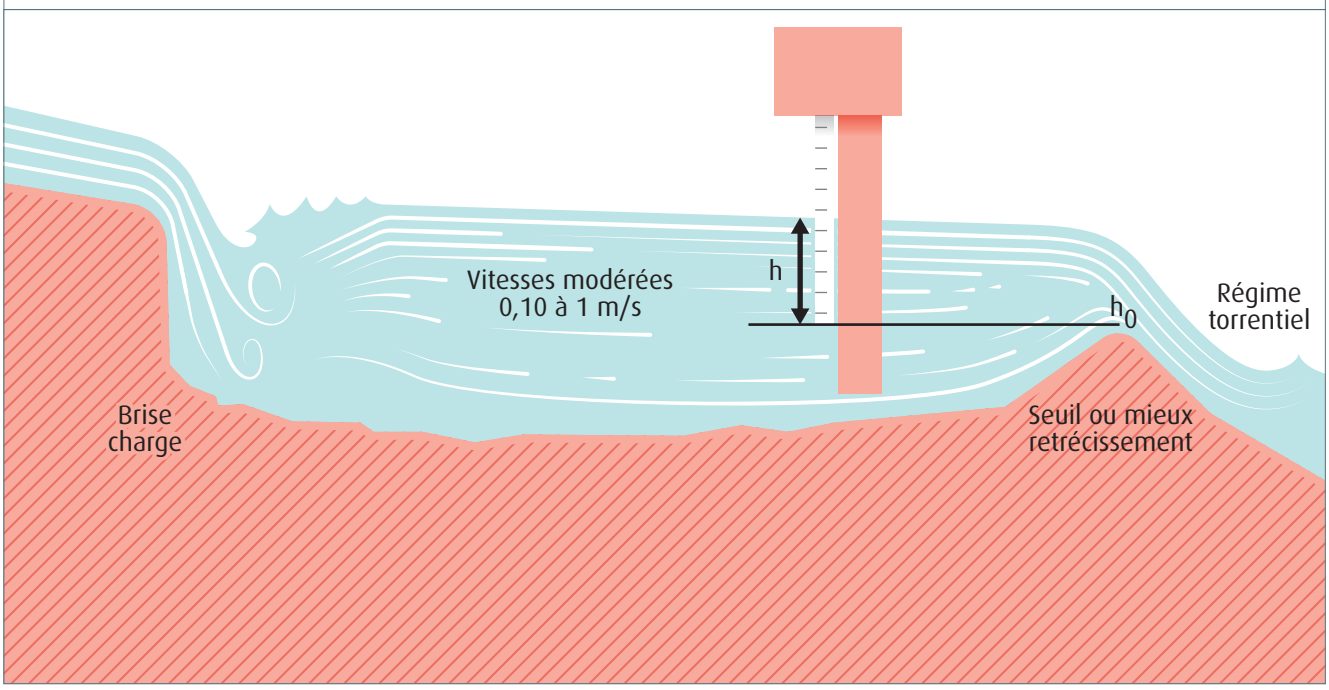
Équation 2.2 :

$$Q = k\,(h - h_0 + \frac{V^2}{2g})^n$$

h : hauteur mesurée à partir de l'origine de l'échelle qui correspond en principe à h0 [m]
h_0 : hauteur de la crête de l'ouvrage par rapport à l'origine de l'échelle, correspondant au débit nul
V : vitesse d'approche de l'écoulement en amont du contrôle [m/s]
g : accélération de la pesanteur [m/s²]
k et n sont des paramètres qui dépendent de la géométrie de la section et des conditions amont.

Dans les cas les plus favorables, des ouvrages spécifiques de contrôle ont été construits : seuils profilés ou lames minces, venturis (cas 2 de la Figure 2.1 et Figures 2.2 et 2.3). Ces dispositifs lorsqu'ils sont exécutés avec soin et dans les règles de l'art peuvent parfois être considérés comme des dispositifs de mesure du débit en continu. Mais en pratique, les caractéristiques de l'écoulement évoluent dans la partie amont sous l'effet des crues et du charriage résultant, excluant l'application des formules théoriques de la littérature.

FIGURE 2.2 : SECTION DE CONTRÔLE D'APRÈS AUDINET 1995



Équation 2.3 :

$$Q = ml\sqrt{2g}(h-h_0)^{1,5}$$

g : accélération de la pesanteur [m/s²]
l : largeur du seuil [m]
h : hauteur mesurée à partir de l'origine de l'échelle qui correspond en principe à h_0 [m]
h_0 : hauteur de la crête de l'ouvrage par rapport à l'origine de l'échelle, correspondant au débit nul
m : coefficient d'écoulement (0,3 < m <0,6) qui dépend de la forme du seuil

L'équation 2.3 est l'expression la plus générale d'une loi de seuil rectangulaire.
En l'absence de contrôle ou de rupture dans la ligne d'eau, l'écoulement d'un cours d'eau est régi par les caractéristiques géométriques et morphologiques du chenal telles que la pente de la ligne de fond, la rugosité du lit, la largeur et la profondeur (cas 4 de la Figure 2.1 et Figure 2.4). On parle alors d'écoulement contrôlé par le tronçon. Même si en théorie elle n'est applicable que pour des conditions bien particulières (régime permanent uniforme), la formule empirique de Manning Strickler reste une bonne approche pour modéliser les écoulements contrôlés par le tronçon :

Équation 2.4 :

$$Q = R^{2/3} S K \sqrt{i}$$

S : surface mouillée [m²]
R : rayon hydraulique de la section mouillée, R = S/P où P est le périmètre mouillé [m], R dépend de la hauteur d'eau
K : coefficient de Strickler qui traduit la rugosité du chenal d'écoulement (15< K <80) [$m^{1/3}/s$]
i : pente du chenal d'écoulement exprimée en rapport de la hauteur perdue par le cours d'eau en fonction de la distance parcourue par celui-ci. Par exemple : 0,001 correspond à une pente de 1 millimètre perdu par mètre [sans dimension].

⊞ SEUIL À ARUE, L'ESTAMPON, LANDES (DREAL NOUVELLE AQUITAINE)



⊞ FIGURE 2.3 : SEUIL AVEC PASSE BAS DÉBIT DU GAGE À RANC DE PIOUCHE, AFFLUENT DE LA LOIRE, 18 KM², (EDF-DTG)



FIGURE 2.4 : STATION CONTRÔLÉE PAR LE TRONÇON : LA LOIRE À MONTJEAN, 109 930 KM² (DREAL PAYS DE LA LOIRE)



Pour généraliser la formulation d'un contrôle hydraulique et faciliter l'établissement des courbes de tarage, il est commode d'utiliser la relation suivante :

Équation 2.5 :

$$Q = a\,(h - h_0)^b$$

h : hauteur mesurée en [m]
h_0 : hauteur correspondant au débit nul
a et b : sont des paramètres qui dépendent du type de contrôle et des conditions d'écoulement

L'équation 2.5 s'applique à tous les types de contrôles hydrauliques, sections ou tronçons avec deux réserves toutefois :

- dans le cas des contrôles par la section, les vitesses d'approche doivent être les plus faibles possibles pour que $V^2/2g$ soit très faible devant $(h\text{-}h_0)$ (cf. équation 2.2) ;
- dans le cas des contrôles par le tronçon, il faut que le rapport entre la largeur du chenal d'écoulement et la profondeur soit élevé pour que R (rayon hydraulique) puisse être assimilé à $(h\text{-}h_0)$ (cf. équation 2.4).

En pratique, il est rare qu'un contrôle hydraulique ait les mêmes caractéristiques pour toutes les gammes de débit. En effet, les conditions d'écoulement peuvent évoluer : aménagement de passes bas débits sur les seuils profilés, ennoiement d'un seuil par l'aval, passage de lit mineur au lit majeur avec augmentation de la largeur et modification des éléments constituant la rugosité (cf. Figure 2.5). Une forme analytique complète est proposée par Le Coz et al. (2014). Elle est très complexe et peut être simplifiée selon l'équation 2.6.

Équation 2.6 :

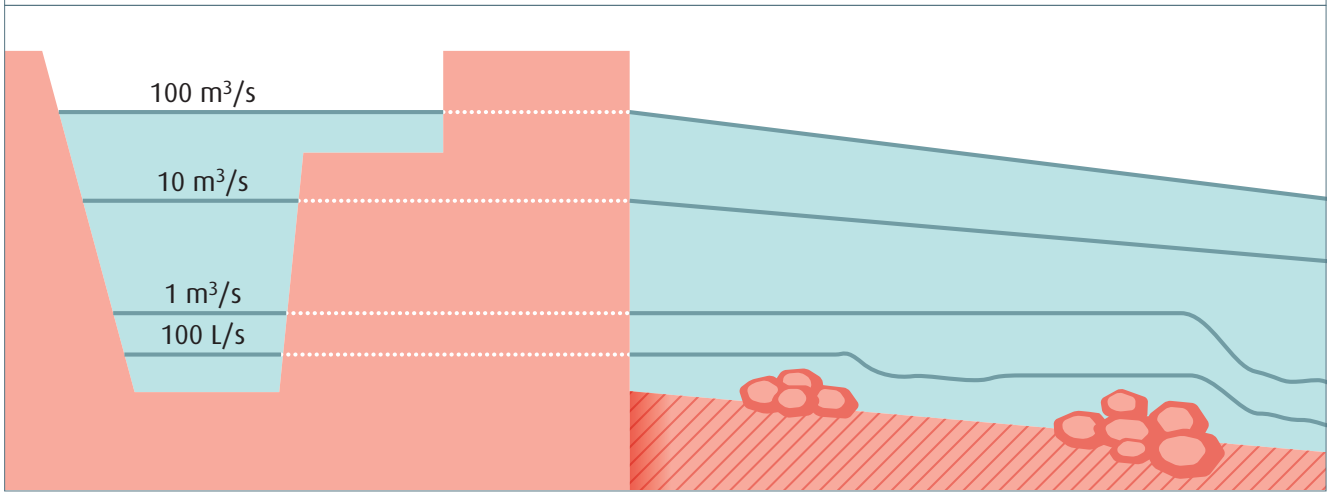
$$Q = \sum_{i=1}^{n} a_i\,(h - h_{0i})^{b_i}$$

n : nombre de types de contrôle
i : contrôle hydraulique applicable entre deux hauteurs à l'échelle. Pour une hauteur donnée, les paramètres d'un seul contrôle hydraulique sont appliqués

Finalement, les jaugeages permettent de caler les paramètres a_i, h_{0i} et b_i.

Ces éléments permettent de comprendre pourquoi les stations de mesure limnimétrique sont souvent placées en amont de sections singulières pérennes : seuils fixes, ponts, radier naturel fixe, etc. Les marées, les confluences et la présence d'obstacles mobiles tels que les ouvrages hydroélectriques ou de navigation influencent les conditions d'écoulement et l'univocité de la relation hauteur-débit n'est plus respectée. Dans ce cas, la mesure de paramètres complémentaires (vitesse ou pente de l'écoulement) pour estimer le débit de manière continue est nécessaire. Des dispositifs fixes de mesure des vitesses en

⊞ FIGURE 2.5 : ILLUSTRATION SIMPLIFIÉE DES CONTRÔLES HYDRAULIQUES POUR UNE STATION HYDROMÉTRIQUE TYPIQUE. A DROITE, PROFIL EN LONG DU FOND ET DES LIGNES D'EAU POUR DIFFÉRENTES VALEURS DE DÉBIT ; À GAUCHE, LES NIVEAUX D'EAU SONT REPORTÉS SUR LE PROFIL EN TRAVERS DE LA SECTION DE LA STATION. (LE COZ ET AL., 2014)



continu peuvent être utilisés : stations « à cordes ultrasonores », Doppler verticaux ou horizontaux. Les propriétés hydrauliques de répartition des vitesses dans une section de cours d'eau sont utilisées afin d'extrapoler les vitesses mesurées en un petit nombre de points de la section. Les jaugeages ponctuels sont nécessaires afin de caler les paramètres d'extrapolation. Les ouvrages hydroélectriques eux-mêmes peuvent également être mis à profit car les éléments qui les composent tels que les groupes turbo-alternateurs et les organes de décharge disposent en général d'abaques qui permettent de déterminer le débit en fonction de paramètres qui sont mesurables.

2.3. Sensibilité du contrôle hydraulique

La sensibilité des contrôles hydrauliques peut être définie par l'accroissement relatif du débit pour une variation de un centimètre de hauteur d'eau. La sensibilité est donc une fonction décroissante continue. Par exemple, un accroissement du débit de 20 à 21 m³/s pour une variation de hauteur de 1 cm permet de conclure à une sensibilité du contrôle hydraulique de 5 % pour un débit de 20 m³/s. Pour que la sensibilité soit égale à 1 %, il faudrait que le débit n'augmente que de 0,2 m³/s.
Cet exemple démontre nettement l'intérêt d'implanter les stations d'hydrométrie sur des sites où la sensibilité de la relation hauteur-débit est favorable, c'est à dire où l'accroissement de débit est le plus faible possible pour une élévation de 1 cm de hauteur d'eau. Cette recommandation est particulièrement vraie pour les stations dédiées au suivi des étiages.

2.4. Références

• Audinet M., Hydrométrie appliquée aux cours d'eau. Édition Eyrolles, 1995.

• Belleudy P., Hydraulique des écoulements en rivière. Note de cours ENSE3.

• CEREMA (ex CETMEF), Hydraulique des cours d'eau, 2001.

• CEREMA (ex CETMEF) : Notice sur les déversoirs : synthèse des lois d'écoulement au droit des seuils et déversoirs, 2005.

• Degoutte G., Aide-mémoire d'hydraulique à surface libre. HydroParisTech, 2006.

• Le Coz J. et al, Analyse Bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes, Méthode BaRatin La Houille Blanche, n°6, 2013, p. 31-41.

• Perret C., Les moyens de contrôle et de mesure des débits – les capteurs et les méthodes. La Houille Blanche, n° 3, 2009, p. 97-107.

• Pierrefeu G., La qualification de différents systèmes de mesures de débit en rivière par les jaugeages : une expérience à partager. La Houille Blanche, n°3, 2014, p. 5-15.

• Réméniéras G., Annuaire hydrologique de la France, année 1949 : L'Hydraulique des stations limnimétriques pour la mesure du débit des cours d'eau. Société hydrotechnique de France, 1949.

• Roche PA., Miquel J., Gaume E., Hydrologie quantitative Processus, modèles et aide à la décision Édition Springer 2012 , désormais diffusé par les éditions Lavoisier.

Choix et instrumentation du site de mesure

— chapitre 3

Pour commencer, quelques définitions utiles concernant la terminologie des sites de mesure en rivière :

• Station hydrométrique : emplacement sur lequel est mesuré en continu la hauteur d'eau et éventuellement une ou plusieurs vitesses d'écoulement pour calculer un débit. D'autres mesures complémentaires peuvent être réalisées sur le site : climatologie (pluie, température de l'air, humidité, vent, etc.), température de l'eau, voire physico-chimie de l'eau.

• Station hydrométrique à relation hauteur-débit, appelée usuellement station limnimétrique : emplacement sur lequel la hauteur d'eau est mesurée en continu et éventuellement d'autres grandeurs à l'exclusion de la vitesse d'écoulement. Le débit est estimé en appliquant une courbe de tarage Q=f(h).

• Station hydrométrique à relation vitesse-débit, appelée usuellement station débitmétrique : terminologie qui désigne un site où sont mesurées en continu des vitesses d'écoulement qui permettent d'estimer la vitesse moyenne (V) sur une section à partir d'un coefficient C(h) calé à partir de jaugeages. Le débit est estimé par Q = S(h)V (équation 3.1) où S(h) est la section mouillée, fonction de la hauteur.

Dans tous les cas, la mesure de hauteur est indispensable.
Les notions de site, station et capteur sont également définies par le SANDRE. Un « site hydrométrique » est un lieu géographique (tronçon de cours d'eau) sur lequel les mesures de débit sont réputées homogènes et comparables entre elles. Il a pour finalité de déterminer un débit sur un tronçon de rivière. Il peut être composé de plusieurs « stations hydrométriques » assez proches mais avec un fonctionnement hydraulique différent. Une « station hydrométrique » est constituée généralement d'une échelle limnimétrique qui permet l'observation de la hauteur d'eau et d'un ou plusieurs « capteurs » en lien avec l'échelle et qui mesurent la hauteur d'eau ou des vitesses d'écoulement.

POINT D'ATTENTION !

Les aménagements hydroélectriques, bien que non répertoriés comme des stations hydrométriques, permettent d'établir des bilans qui peuvent être d'excellents intégrateurs des volumes d'eau qui transitent par les différents organes. Le débit entrant est constitué par la somme du débit turbiné par les groupes de production, le débit stocké ou déstocké dans la retenue et le débit déversé et/ou restitué par le barrage. Historiquement établis au pas de temps journalier, les débits « aménagements » peuvent désormais être calculés à des pas de temps infra-horaires, du fait de la modernisation engagée sur l'acquisition des données d'exploitation. Pour plus de détails, se reporter à l'ouvrage de M. Audinet (1995).

3.1. Comment choisir et instrumenter un site de mesure ?

Une station hydrométrique doit satisfaire plusieurs enjeux liés à la connaissance des débits (cf. § 1.3). L'hydromètre doit déterminer un linéaire de rivière sur lequel il va rechercher les emplacements de mesure adaptés aux différents objectifs de la mesure, en privilégiant les stations « polyvalentes » qui fournissent des données hydrologiques générales en complément des besoins spécifiques liés aux crues ou à la gestion des étiages.
Le site parfait n'existe pas. Le choix du site résulte toujours d'un compromis entre les objectifs de la station, les conditions hydrauliques de l'écoulement, la faisabilité technique et des aspects tels que les conditions d'accès au site, la facilité d'intervention en toutes circonstances pour la maintenance et les jaugeages. Si les performances des différents capteurs et les moyens de transmission des données permettent de réduire les limites de la faisabilité technique, les conditions d'accès au site sont particulièrement importantes pour que les interventions des agents se fassent en toute sécurité (cf. Figure 3.1). Il est important d'investir suffisamment dès le départ pour avoir de bonnes conditions de mesure et de confort/sécurité pour les techniciens qui interviennent sur site.

3.1.1 Influence des conditions hydrauliques dans le choix du site

Le choix de l'emplacement de mesure est très lié aux conditions hydrauliques (cf. chapitre 2) :

• tronçon rectiligne : condition indispensable dès que les vitesses d'écoulement dépassent 0,5 m/s ;

• lit stable (bathymétrie stationnaire dans le temps) : permet d'espérer une courbe de tarage stable.

Pour la mesure de hauteur, il est important de choisir une section avec une vitesse faible où la hauteur d'eau est stable. Ces conditions se rencontrent souvent à l'amont d'un seuil ou d'un ouvrage qui permet un changement de régime hydraulique. Éviter impérativement les mesures dans les zones de remous ou de batillage. La grandeur mesurée ne doit pas varier en permanence. Les puits de tranquillisation offrent de bonnes conditions à la mesure de hauteur, mais il faut veiller à leur entretien régulier : enlever la vase qui peut obstruer la communication puits-rivière afin d'assurer une bonne connexion entre l'écoulement et le puits.
L'observation des contrôles hydrauliques aux différentes gammes de débit en lien avec les objectifs de la station

est indispensable. Pour l'étiage, la priorité est donnée au contrôle aval par un seuil stable, sans herbe et avec une bonne sensibilité en basses eaux. Pour les crues, un chenal unique relativement étroit et qui ne subit pas d'influence aval est recherché. L'utilisation d'un seuil artificiel pérenne pour mesurer les bas débits peut ne pas être compatible avec la continuité écologique sur certains cours d'eau.
L'évaluation de la sensibilité de la station aux différentes gammes de débits (cf. § 2.3) est importante, en particulier pour les débits extrêmes. Une sensibilité comprise entre 5 et 10 % par cm en étiage extrême peut être considérée comme bonne. Pour les hautes eaux, éviter les lits majeurs très larges, peu sensibles et très influencés par la végétation.

3.1.2 Composition d'une station hydrométrique

Echelle limnimétrique

Elle est graduée en cm et positionnée sur la même section et à proximité des capteurs. C'est l'élément de base d'une station hydrométrique, elle doit donc être opérationnelle en permanence et bien calée. Pour permettre une lecture de la hauteur d'eau en toutes situations, ces échelles peuvent être décomposées en plusieurs tronçons, généralement multiples de 1 m (cf. Figure 3.1). Les matériaux utilisés doivent avoir un faible coefficient de dilatation. Les échelles peuvent être posées sur des poteaux métalliques dans le lit mineur et majeur ou bien fixées sur les supports existants tels que des murs de soutènement ou des palplanches. Les piles de pont sont à éviter car des remous se forment lorsque les vitesses augmentent. Les échelles sur support dans le lit peuvent constituer des pièges à embâcles et être de ce fait vulnérables à l'arrachement. Les échelles inclinées posées sur des supports qui épousent la forme de la berge ne connaissent pas ce type de problème mais l'angle d'inclinaison doit être maîtrisé. Les échelles négatives, sources de nombreuses erreurs de lecture, sont à éviter. Le zéro de l'échelle doit impérativement être raccordé au système de nivellement de type NGF, avec un repère en dur à proximité pour vérifier ou recaler facilement les échelles en cas de déplacement ou de disparition lors d'une crue. Des échelles déportées permettent une lecture de hauteur en crue. Un écart de plusieurs dizaines de cm entre la valeur affichée par le capteur et la lecture échelle est possible en crue, il est dû aux courbes de remous et aux pertes de charge. Il est important de vérifier la continuité des éléments d'échelle, car c'est souvent une source d'incertitude importante.

⊞ FIGURE 3.1 : À GAUCHE : STATION HYDROMÉTRIQUE À RELATION HAUTEUR-DÉBIT EN SECTION COURANTE, LA MEUSE À STENAY, 3 904 KM² (DREAL GRAND-EST, UH MEUSE MOSELLE). À DROITE : ÉCHELLE LIMNIMÉTRIQUE SUR L'YERRES À CROSNES (AQUI' BRIE).



À gauche : La potence sert de support à un radar hors d'eau en crue qui mesure aussi la hauteur d'eau en étiage. Un escalier d'accès maçonné dans les enrochements permet un accès facile et sûr pour les jaugeages et le nettoyage des échelles. Des échelles déportées permettent une lecture en crues. Le coffret de la station est hors d'eau, à environ 100 m (non visible sur la photo). La transmission est réalisée par câble enterré.
À droite : Échelle fixée à un support rigide très stable (mur maçonné), protégé des embâcles par sa position latérale au chenal d'écoulement et par la végétation rivulaire à l'amont.

Capteurs pour la mesure en continu de hauteur

Différents capteurs peuvent être utilisés en fonction de la configuration du site :

- Les sondes piezo-résistives mesurent la pression exercée par la colonne d'eau à l'aide de jauges de contraintes qui captent la déformation d'un capteur de forces. Ces sondes peuvent soit mesurer la pression absolue (hauteur d'eau + pression atmosphérique), soit la pression relative. Dans ce dernier cas, un capillaire permet de mettre un côté du capteur de force à la pression atmosphérique.
- Les capteurs pneumatiques, appelés couramment bulle à bulle, mesurent également la pression exercée par la colonne d'eau par l'intermédiaire d'une ligne pneumatique. Le capteur de pression n'est donc pas directement en contact avec l'eau et c'est un compresseur qui permet d'équilibrer la pression hydrostatique avec un très petit débit d'air. Ce dernier s'échappe lentement en laissant apparaître des bulles à la surface, d'où le nom courant de ce type de capteur.
- Les capteurs ultrasons détectent quant à eux la surface de la rivière en mesurant soit un tirant d'air s'ils sont positionnés au-dessus de l'écoulement, soit le tirant d'eau s'ils sont immergés. Une correction liée à la température du milieu (air ou eau) est nécessaire.
- Les radars mesurent le tirant d'air qui sépare le capteur de la surface de l'eau, sans qu'une correction de température soit nécessaire.
- Les puits munis de flotteurs contre-poids sont les systèmes historiques. Ils sont encore largement utilisés munis de codeur qui permettent de numériser le déplacement du flotteur. La mesure du niveau à l'intérieur d'un puits peut être effectuée avec n'importe lequel des capteurs cités précédemment.

Le choix du capteur est lié à la configuration du site. Un capteur immergé dans l'écoulement (puits - flotteur, bulle à bulle ou piézo-résistif) peut être soumis à des efforts importants liés aux vitesses élevées, à des embâcles. Son fonctionnement peut également être perturbé par l'envasement. A l'inverse, les capteurs radar sont moins soumis aux agressions externes. Le coût d'un radar peut être supérieur à celui des autres capteurs, mais la maintenance est allégée et il y a peu de dérive de la mesure. Pour les radars fixés sur des ponts ou des passerelles, prévoir une potence avec un bras relevable pour un accès facile au capteur. Les systèmes de mesure par ultrasons émergés avec une compensation en température de l'air sont à éviter, car au soleil la température au niveau de la sonde peut être différente de celle de l'air sur le trajet de l'onde. Pour le choix des capteurs bulle à bulle, les dimensions de la ligne pneumatique (diamètre et longueur du tube) doivent être adaptées aux performances du compresseur. En pratique, on ne doit pas dépasser une centaine de mètres. Un système pneumatique mal dimensionné peut ne pas répondre correctement à des gradients de niveau importants.

La mesure du niveau est forcément entachée d'une incertitude (cf. § 6.6). Cette dernière dépend de la précision et de la dérive éventuelle du capteur mais aussi des conditions d'utilisation et d'installation. Quelle que soit la méthode de mesure adoptée pour le niveau, la précision d'un capteur se définit par classe. La classe de précision est définie relativement à la pleine échelle, ce qui revient à affecter au capteur une incertitude absolue quelle que soit la valeur mesurée. Ainsi, pour un capteur de classe 0,1 dont la gamme de mesure vaut 0 à 10 mètres, l'incertitude absolue vaut 1 cm et l'incertitude relative ne dépend plus que de la valeur mesurée : 0,1 % si le capteur mesure à un instant donné un niveau de 10 mètres mais 1 % si la mesure vaut 1 mètre. Compte tenu des tests qui ont pu être effectués par les utilisateurs et des retours d'expérience, l'incertitude absolue de la mesure de niveau reste comprise entre 0,5 et 1 cm quel que soit le type de capteur utilisé. La dérive des capteurs peut être approchée par retour d'expérience des recalages effectués sur une période significative.

Système d'acquisition

Il permet d'acquérir de la donnée brute, de la stocker voire de la pré-traiter. La fréquence d'échantillonnage doit être adaptée à la variabilité de la grandeur mesurée. Pour les rivières de plaine et de piémont, un pas de temps de 15 à 30 minutes est usuel. Sur des petits bassins versants très réactifs il peut être utile d'enregistrer à un pas de temps plus court, rarement inférieur à 5 minutes cependant. Les dispositifs qui peuvent réaliser un prétraitement du signal en estimant une moyenne et en éliminant des extrêmes jugés non significatifs ou les valeurs redondantes sont à privilégier.

Transmission des données

Des chroniques de valeurs enregistrées localement et éventuellement pré-traitées sont transmises à un concentrateur à un pas de temps déterminé qui peut être variable en fonction des risques liés à la situation hydrologique. La transmission peut être réalisée par ligne téléphonique RTC (en voie d'abandon par les fournisseurs), par réseau GSM ou GPRS, par satellite ou par radio pour les bassins versants rapides (sécurisation par rapport aux défaillances du réseau téléphonique assez fréquentes lors des crues). La transmission de données peut aussi se faire en temps réel pour les stations utilisant des vecteurs « haut débit » et en connexion permanente telles que l'ADSL par exemple. Le choix d'un concentrateur se fait en fonction de sa robustesse, des moyens de communication utilisés, des protocoles des centrales d'acquisition et de l'usage des mesures.

Alimentation en énergie de la station hydrométrique

Elle doit être envisagée de manière pragmatique (cf. Figure 3.2). Le réseau électrique est utilisé quand il est disponible à proximité. En complément, une batterie installée dans le coffret va assurer une sécurité de plusieurs jours en cas de coupure de courant. D'autres solutions sont possibles, par choix ou par nécessité. Les panneaux solaires sont une solution « autonome » qui tend à se développer. Ce choix présente l'avantage de rendre l'installation moins sensible aux perturbations électromagnétiques, mais a deux inconvénients principaux : le risque de vol est important et les panneaux situés dans les fonds de vallées brumeux en hiver ne suffisent pas toujours pour recharger la batterie. Une autre alternative est l'utilisation de piles à combustible, mais le méthanol qui constitue la source d'énergie nécessite des précautions d'emploi avec un suivi des dépôts en déchetterie et un coût pour le retraitement des bidons vides si l'enlèvement est réalisé par une société spécialisée.

Mesures complémentaires

Des mesures de précipitations peuvent être réalisées lorsque le réseau mis à disposition par Météo-France n'est pas assez dense (sur les têtes de bassin pour la prévision des crues par exemple) et si les conditions de classification environnementale du site sont respectées pour garantir une mesure de qualité. Les pluviomètres à pesée sont recommandés (robustesse, maintenance réduite).
La mesure de température de l'air est utile pour les problématiques de neige qui sont susceptibles d'avoir une incidence sur les crues, lors de la fonte essentiellement. En complément du réseau de mesure d'épaisseur de neige mis à disposition par les partenaires, sur les sites

régulièrement exposés, il est utile de mesurer ce paramètre pour modéliser plus précisément l'équivalent en eau du manteau neigeux. En zone de plaine, l'accès direct à l'équivalent en eau par pesages ponctuels est suffisant.
Il est aussi envisageable d'héberger des capteurs d'autres maîtres d'ouvrage pour la mesure des paramètres physico-chimiques (température, oxygène dissous, conductivité, pH) et parfois des turbidimètres pour l'estimation des MES, sous réserve d'avoir suffisamment de place et en rédigeant une convention de partenariat.

Coûts d'installation

Les conditions de site sont un facteur important qui peut multiplier par 2 ou 3 le prix d'une station. La partie « matériel », avec des échelles, un capteur, un système d'acquisition, du câble, une armoire raccordée au réseau et équipée d'une batterie est estimée à 20 000 euros environ (valeur 2015). Une potence support de radar réalisée par un artisan peut coûter plus de 1 500 euros. Un local technique et ses aménagements extérieurs (clôture, chemin d'accès) peut coûter plus de 15 000 euros. Les travaux pour les réseaux peuvent aussi être très onéreux. La pose des rails pour supporter les échelles limnimétriques peut coûter plus de 1000 euros.

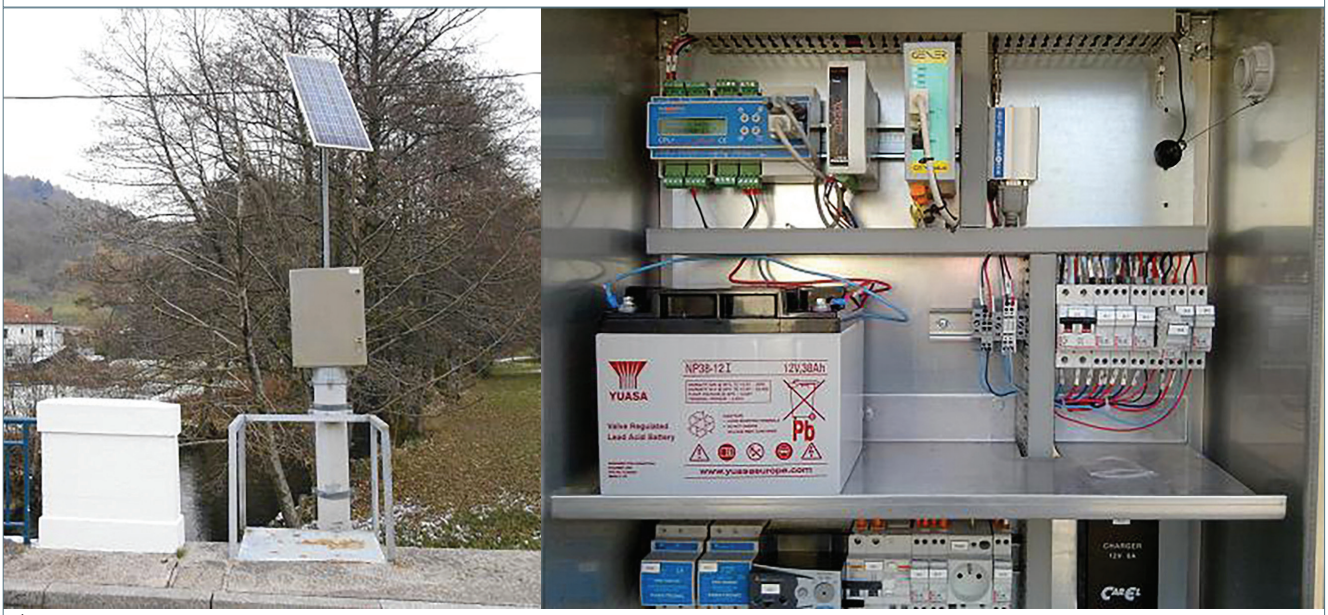
3.1.3 Contraintes de site

La conception des ouvrages qui constituent une station hydrométrique résulte d'un compromis entre les différentes contraintes du site dont la plus importante est la qualité et la stabilité de la relation hauteur-débit qui permet de construire la courbe de tarage (cf. chapitres 2, 4 et 5) D'autres contraintes sont cependant à prendre en compte :

- L'implantation de l'armoire ou du local technique doit être compatible avec un fonctionnement pendant les crues (cf. Figures 3.2 et 3.7) : les dispositifs techniques doivent être hors d'eau par rapport à une crue centennale ou plus et, sauf exception, l'accès à la station doit pouvoir se faire en toute sécurité pendant ces périodes. Les ouvrages peuvent être éloignés de plusieurs centaines de mètres des capteurs. L'accès avec un véhicule à proximité de la station est indispensable pour la maintenance et les opérations de jaugeage. Des escaliers, des échelles ou des rampes doivent sécuriser l'accès au lit mineur. Il est préférable d'investir dès le début dans ces équipements qui permettent de gagner du temps lors des interventions et favorisent la sécurité des agents. Les gestionnaires des réseaux et de la voirie sont consultés en amont pour connaître la faisabilité des options retenues.

- Les démarches administratives vont permettre de finaliser le projet de station hydrométrique. Ces démarches concernent tous les propriétaires de terrains et voies de circulation impactés par les différents composants de la station (capteurs, échelles, bâtiment ou armoire électrique, câbles, alimentation en énergie) : la commune, les gestionnaires de la route, du pont ou des ouvrages (si armoire ou escaliers sur le domaine public routier ou fluvial), les gestionnaires publics des réseaux. Certaines démarches sont réglementaires[6] et d'autres relèvent d'un accord entre les parties (convention qui autorise à occuper un terrain). Il est nécessaire d'anticiper de plusieurs mois par rapport au début des travaux (éviter la période hivernale ou les hautes eaux).

⊞ FIGURE 3.2 : COFFRET D'UNE STATION HYDROMÉTRIQUE À RELATION HAUTEUR-DÉBIT À L'AMONT D'UN PONT, LA MOSELLE À FRESSE SUR MOSELLE, 72 KM² (DREAL GRAND EST, UH MEUSE MOSELLE)



À gauche, la station télétransmise est autonome via un capteur solaire et une batterie. Située sur un pont, elle est hors d'eau en crue et toujours accessible.
À droite, l'intérieur d'une station connectée au réseau Enedis, avec la centrale d'acquisition (CPL), le modem, la batterie de secours et le ré-enclencheur qui permet d'éviter un déplacement pour un simple problème de surtension ponctuel. La présence de ce dernier doit être obligatoirement signalée sur la porte de l'armoire.

6. Déclaration d'intention de commencement des travaux, permis de construire, déclaration de travaux, procédure anti endommagement, etc.

• Le choix du type de station hydrométrique à relation hauteur-débit ou vitesse-débit est lié au site. La mesure limnimétrique est la règle et la vélocimétrie reste l'exception, réservée uniquement aux sites qui la justifient. Une station avec mesure de vitesse en continu est nécessaire sur une rivière navigable où le niveau d'eau est régulé (hors crues) par un barrage à l'aval et lorsqu'il y a une influence aval occasionnelle (confluence par exemple) ou une absence de relation univoque entre hauteur et débit (zones soumises à l'influence de la marée). La mesure vélocimétrique est plus complexe, plus onéreuse et l'estimation du débit n'est pas plus précise qu'avec une simple mesure limnimétrique sur un site adapté.

• L'emplacement de mesure pour une station à relation hauteur-débit ou vitesse-débit obéit aux mêmes critères principaux de choix. Le tronçon de mesure doit impérativement être rectiligne avec un écoulement uniforme, des vitesses pas trop rapides pour une mesure de hauteur d'eau stable, à l'amont d'un seuil ou sur un tronçon chenalisé qui évolue peu. Les zones d'envasement chronique, la végétation aquatique en excès, les secteurs avec des barrages estivants, les sites avec plusieurs chenaux d'écoulement en crue et les secteurs où les lits mineurs et majeurs ne sont pas parallèles sont à éviter.

3.2. Les différents types de stations hydrométriques

Les stations hydrométriques à relation hauteur-débit se distinguent de celles à relation vitesse-débit. Au sein de ces deux familles, il existe des différences importantes, liées aux emplacements des capteurs limnimétriques et au type de capteur de mesure en continu de la vitesse.

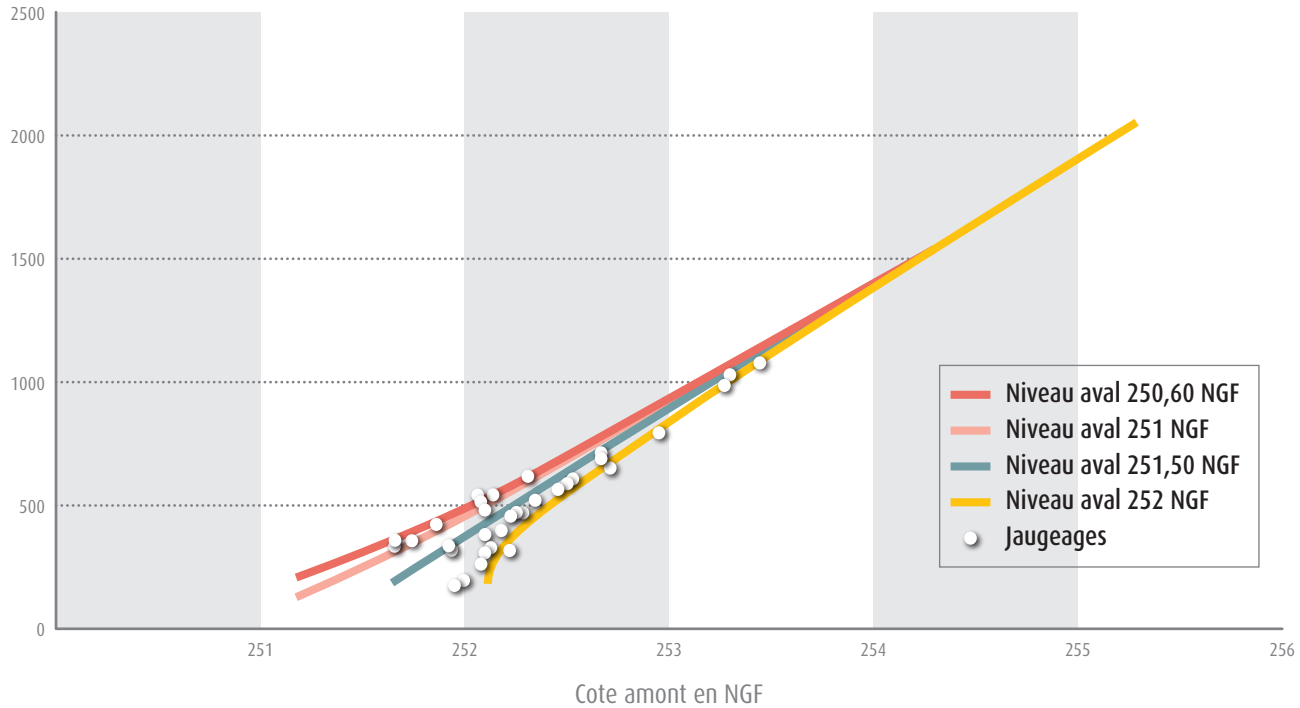
3.2.1 Station hydrométrique à relation hauteur-débit et emplacement de capteur unique

C'est le cas le plus fréquent pour les stations hydrométriques « classiques » avec des enjeux modérés. Le site hydrométrique est composé d'une seule station. Un seul capteur permet de calculer le débit à toutes les gammes de hauteur. C'est le cas sur les rivières à lit unique avec un contrôle par seuil et/ou chenal selon les gammes de débit. Ces stations peuvent être « sécurisées » avec un second capteur qui mesure la hauteur au même endroit que le premier. Avoir deux capteurs présente plusieurs intérêts : valider des données hauteur-temps avec plus de pertinence, continuer à avoir des données lorsqu'un capteur est en panne et calculer des débits avec une courbe de tarage unique. Il est recommandé d'utiliser deux capteurs de technologie différente afin d'éviter les causes de dysfonctionnement communes. Il est important de mesurer rigoureusement au même endroit avec les deux capteurs puisque le débit est calculé avec une courbe de tarage unique, ce qui n'est pas toujours évident avec des capteurs de technologies différentes. Dans le cas de deux capteurs immergés, prévoir deux prises de pression différentes pour une mesure totalement indépendante.

3.2.2 Double station hydrométrique à relation hauteur-débit sur un même site

Cette démarche est souvent utilisée sur les stations anciennes où la station « historique » présente des insuffisances pour l'étiage et/ou les crues. C'est parfois le cas des stations installées sous les ponts : en étiage, la hauteur n'est pas stable à cause d'un écoulement rapide

FIGURE 3.3 : COURBES DE TARAGE D'UNE STATION À DEUX ÉCHELLES – LE RHÔNE À VALENCE, 66450 KM² (CNR)



sur des cailloux et en crue le capteur est dans le remous du pont. Dans ce cas, une nouvelle station, avec sa propre échelle et sa propre courbe de tarage peut être installée à l'amont d'un seuil naturel et hors de la zone de ressaut hydraulique en crue. La deuxième station doit permettre d'améliorer la sensibilité de la relation hauteur-débit dans la gamme où elle est insuffisante. Le plus souvent, la deuxième station permet très rapidement d'obtenir des mesures justes et avec une bonne sensibilité en basses eaux. Par contre, il est nécessaire de conserver l'ancienne station pour la prévision des crues (seuils réglementaires, jaugeages historiques) et connaître le décalage entre les deux stations en fonction des hauteurs d'eau.
Sur un nouveau site, un emplacement de mesure unique et optimal est à privilégier (cf. § 3.2.1). En dépit des précautions prises lors des études préliminaires, il peut toutefois être nécessaire d'installer un capteur déporté adapté à certaines gammes de mesure. Dans ce cas, même si les capteurs sont proches et le système d'acquisition des données commun, la configuration est alors celle d'un site hydrométrique avec deux stations disposant chacune d'une échelle limnimétrique et d'une courbe de tarage. Pour les sites avec plusieurs chenaux d'écoulement en crue, il est possible d'installer une ou plusieurs stations sur les bras secondaires si le contrôle hydraulique aval n'est pas le même pour chaque bras.
Dans tous les cas, il est nécessaire de faire fonctionner simultanément les capteurs sur des emplacements différents. Les technologies de mesure peuvent être différentes, mais il faut impérativement une échelle et une courbe de tarage pour chaque station. Ce type de site en matière de coût et de maintenance est presque égal à celui de deux stations, même s'il n'y a qu'une seule centrale d'acquisition et des campagnes de jaugeages communes.

3.2.3 Station hydrométrique à relation Q = f(h1,h2) avec deux échelles distantes

Ces stations, peu utilisées, permettent de prendre en compte l'influence aval tout en utilisant la limnimétrie pour calculer un débit. Elles sont relativement complexes à gérer puisqu'elles nécessitent une double mesure de hauteur et un faisceau de courbes de tarage. Elles sont remplacées progressivement par des dispositifs de mesure en continu des vitesses d'écoulement. Toutefois, ce type de station reste une option possible dans des zones ou la limnimétrie simple n'est pas utilisable.
Une station avec une courbe double Q=f(h1,h2) est installée sur le bief concerné et utilise une deuxième station comme point aval. Pour construire une courbe double, la pente de ligne d'eau entre les deux stations doit être suffisante (1 cm pour 1 km) et le débit identique sur ce tronçon.

Exemples sur le Rhône :
- le site de Ternay utilise un point de mesure situé 13,5 km à l'aval
- le site de Valence utilise un point de mesure situé 3,5 km à l'aval

Une courbe double est constituée de plusieurs courbes simples paramétrées en fonction de la cote aval. La principale difficulté est de jauger toutes les configurations possibles pour construire le faisceau de courbes (cf. Figure 3.3).

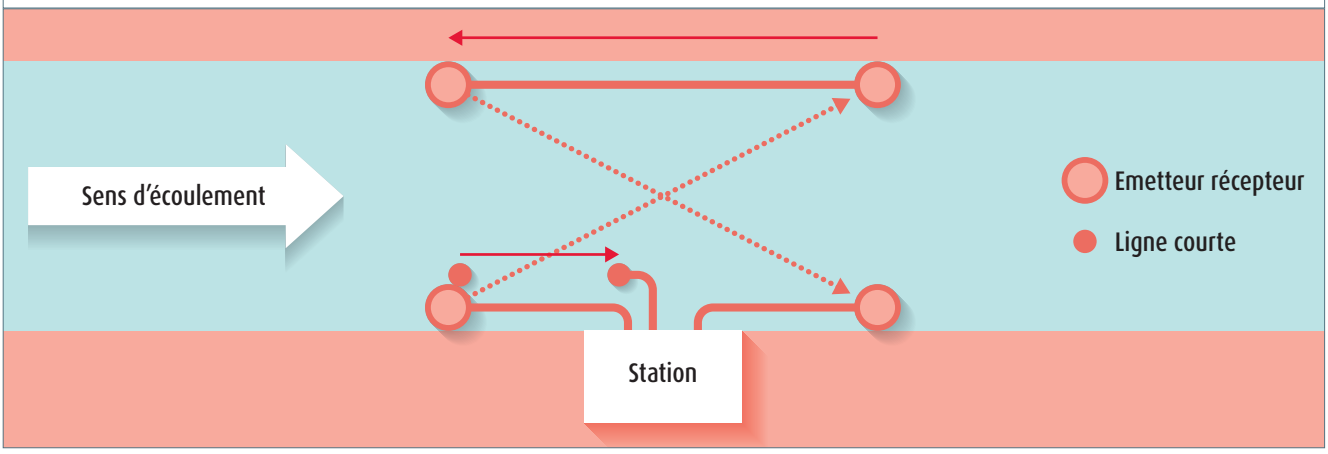
3.2.4 Station hydrométrique à relation vitesse-débit

La mesure du paramètre vitesse permet de résoudre la question de la non univocité de la relation hauteur-débit. Il n'est cependant pas possible d'être exhaustif dans l'exploration du champ des vitesses, comme cela est fait lors d'un jaugeage. Dans la quasi-totalité des cas, il faut se contenter d'une mesure partielle. Plusieurs techniques sont disponibles et sont décrites ci-après.

Mesure de vitesse par ultrasons et temps de transit

La mesure de vitesse par ultrasons correspond à la mesure du temps de parcours de l'onde dans l'eau. Connaissant l'angle de la corde de mesure avec l'écoulement, il est possible de déterminer la vitesse du courant à la profondeur de la corde. Pour améliorer la précision de la mesure, une corde croisée est installée au même niveau pour mieux appréhender l'angle d'écoulement. En fonction de l'importance des variations du plan d'eau, il peut être intéressant d'installer plusieurs cordes sur différents niveaux pour scruter le profil vertical des vitesses. Les vitesses minimales mesurées, permettant d'obtenir des débits fiables, sont comprises entre 0,05 m/s pour des sections inférieures à 10 m et 0,20 m/s pour des sections supérieures à 400 m. Il est également important d'adapter la fréquence des émetteurs en fonction de l'éloignement des capteurs et des taux de matières en suspension (MES).

⊞ FIGURE 3.4 : STATION US AVEC CROIX DE MESURE ET LIGNE COURTE



Sur la figure 3.4, une ligne courte est représentée, elle permet de prendre le relais en cas de perte du signal sur la corde principale à cause d'une panne ou d'un taux de MES trop important (> 5 g/l sur longue distance) et de qualifier la mesure principale en cas de doute (très faible ou trop forte vitesse).
La solution de base suppose que les capteurs soient tous reliés par câble à la centrale d'acquisition. Le passage de câbles peut se faire via un pont ou en sous-fluvial, d'où un coût d'installation non négligeable. Une alternative est l'option « respondeur » qui permet de s'affranchir de câble d'une rive à l'autre. Dans ce cas, il est nécessaire de disposer d'une source d'énergie sur chaque rive.

FIGURE 3.5 : STATION HYDROMÉTRIQUE À RELATION VITESSE-DÉBIT ET MESURE PAR ULTRASONS ET TEMPS DE TRANSIT, LA MOSELLE À CORNY, 7 762 KM² (DREAL GRAND EST, UH MEUSE MOSELLE)



La rivière est navigable. Une échelle déportée est présente en complément de celle posée sur le pieu. Certains détails ne sont pas visibles sur la photo : la potence du radar de mesure vers l'amont, le boîtier électrique de connexion hors d'eau entre les câbles de transfert vers la station et les sondes, le chariot pour remonter les sondes, l'échelle qui va permettre de travailler sur le pieu et la sonde piézo-résistive de secours.

Mesure de vitesse par ultrasons à effet Doppler (horizontal ou vertical)

La mesure de vitesse par ADCP (pour acoustic Doppler current profiler) repose sur le principe du Doppler pulsé : émission d'impulsions ultrasonores dans l'eau et analyse du décalage fréquentiel de l'écho rétro-diffusé par les particules en suspension. Deux types d'ADCP existent :

- H-ADCP pour capteur à visée horizontale, le plus courant en rivière ;
- V-ADCP pour capteur à visée verticale, réservé plutôt pour de petits écoulements canalisés.

L'avantage de cette solution par rapport aux ultrasons est de n'utiliser qu'un seul capteur pour obtenir une mesure, ce qui permet de réduire les coûts de génie civil. En revanche, il existe des limitations à ces systèmes :

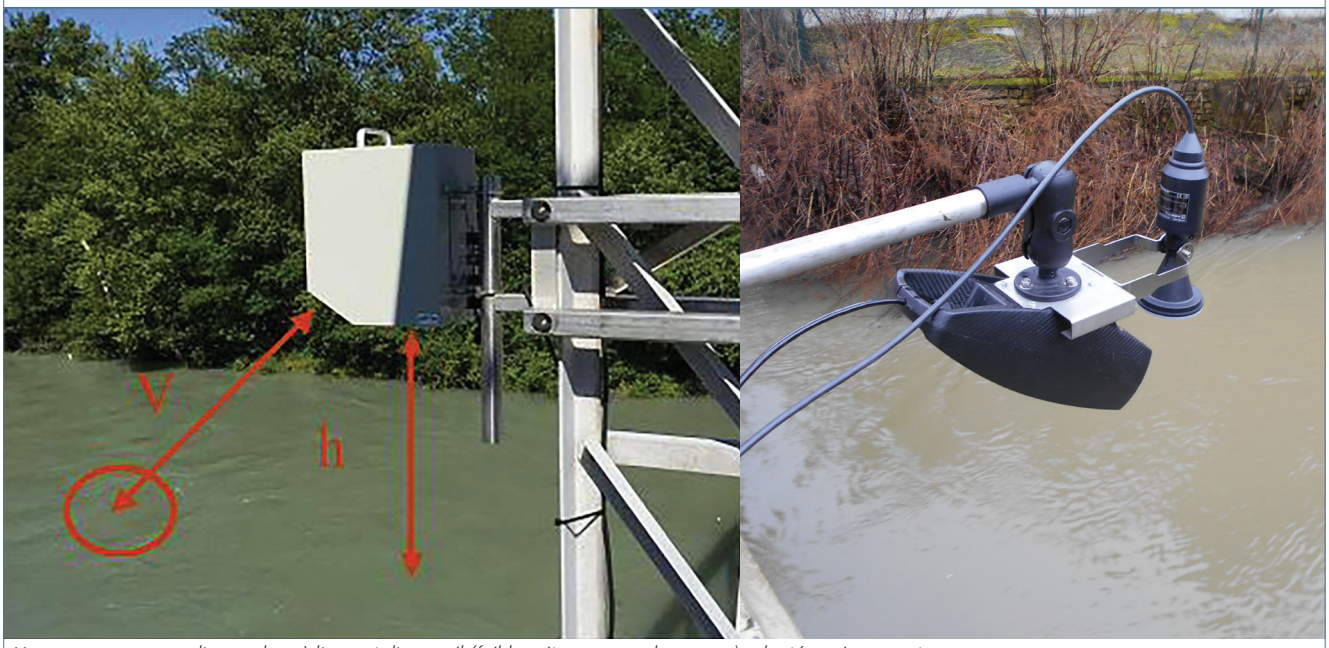
- échos parasites du fond ;
- ratio maxi de 10 pour L/H (avec L : largeur de la rivière, H : hauteur d'eau moyenne) ;
- configuration de la fréquence en fonction du taux de MES et de la distance à explorer : forte fréquence pour des eaux peu chargées en MES ou une distance faible, et inversement basse fréquence pour des eaux fortement chargées en MES ou une distance plus élevée.

Une autre difficulté des ADCP est de ne pas toujours mesurer la totalité des vitesses de la section. L'estimation de la vitesse globale se fait donc à partir d'une vitesse partielle. En outre, le dispositif est peu adapté aux très faibles vitesses pour des raisons liées à l'hydraulique de l'écoulement, à de faibles hauteurs d'eau (réverbération de l'onde en surface avec création de vitesses erronées) et à des taux de MES nuls.

Mesure de vitesse par radar de surface

Le radar de vitesse de surface mesure la vitesse par la technique Doppler et des ondes radars (cf. Figure 3.6). Un second radar de niveau est souvent associé à cette mesure pour déduire la surface de la section d'écoulement.
L'avantage de cette solution est de ne pas être intrusive, ce qui permet des mesures en continu et des opérations de maintenance en crue.
Ce système n'est pas influencé par la luminosité, le brouillard ou la pluie. En revanche, le vent influence fortement la mesure de vitesse pour les faibles vitesses de surface. Par exemple, le radar RQ30, installé par la CNR sur un pont de Lyon au-dessus du Rhône, présente des anomalies pour des débits inférieurs à 800 m^3/s (V < 1 m/s) avec

⊞ FIGURE 3.6 : À GAUCHE : RADAR RQ30 – LE RHÔNE À POUGNY, 10320 KM² (CNR). À DROITE : RADAR HAUTEUR/VITESSE SUR LA CHIERS À MONTIGNY SUR CHIERS (DREAL GRAND EST, UH MEUSE-MOSELLE).



Mesure sur une zone d'eau calme à l'amont d'un seuil (faibles vitesses, pas de vagues) adaptée uniquement aux crues.

un vent de sud modéré à fort. Au-delà de 1500 m³/s (V > 2 m/s), l'influence du vent est négligeable. Il est donc préconisé d'installer ces radars dans des secteurs à l'abri du vent, même si ce paramètre est négligeable en crue.

Mesure de vitesse par imagerie (vidéo)

Cette solution économique et non intrusive, consiste à implanter un capteur de mesure de niveau d'eau et une caméra pour la mesure des vitesses de surface. Le niveau est déterminé par traitement d'images ou directement à l'aide d'un capteur limnimétrique. Le débit est ensuite calculé à partir des vitesses de surface et du niveau. Lorsque les conditions (brouillard, nuit) ne permettent plus de calculer le débit à partir des vitesses de surface, ce dernier est fourni à partir d'une relation Q(h). La loi hauteur-débit est établie à partir de jaugeages constitués des hauteurs et des vitesses issues de la base de données archivant les niveaux et les images issus de la vidéo.
La vidéo présente l'avantage, par rapport au radar ponctuel de type RQ30, de scruter toute la largeur du cours d'eau, voire un tronçon selon l'angle de prise de vue. L'inconvénient majeur reste la luminosité avec les problématiques de contre-jour et de brouillard. La station peut être équipée d'un projecteur activé uniquement sur sollicitation (la nuit en cas de crues).

Ces deux types de capteur (radar de surface et vidéo) doivent être prioritairement utilisés dans la gamme des forts débits. Ils sont complémentaires des relations Q=f(h) univoques, notamment pour en faciliter l'extrapolation en crue.

POINT D'ATTENTION !

Les mesures de vitesse réalisées par tous les procédés qui ont été décrits n'affranchissent pas le gestionnaire de réaliser des jaugeages pour caler les paramètres des lois de transformation qui restent nécessaires pour la détermination des débits (C(h) et S(h), cf. équation 3.1).

3.3. Vie de la station

3.3.1 Importance de la maintenance pour assurer la qualité de la mesure

Une maintenance et un entretien régulier des équipements présents sur les stations de mesure permettent de réduire considérablement les périodes de dysfonctionnement et contribuent à produire des mesures de qualité. La maintenance préventive représente une part importante de l'activité : contrôles périodiques, remplacement préventif d'organes, évolutions technologiques. En complément, la maintenance curative vise à réduire au minimum la durée de non fonctionnement des capteurs lors des pannes. Un plan de maintenance programmée précise les périodicités des opérations pour optimiser la performance du réseau de mesure. Ce plan de maintenance est évolutif en valorisant le retour d'expérience accumulé. Toute opération de maintenance doit faire l'objet d'un suivi via une fiche ou, de préférence à l'aide d'un logiciel dédié qui centralise toutes les informations. Ce logiciel peut aussi permettre de planifier la maintenance préventive et suivre dans le temps les recalages successifs effectués sur un même capteur afin de mettre en évidence une dérive éventuelle et un dysfonctionnement de celui-ci.

FIGURE 3.7 : LE BRIONNEAU À AVRILLÉ, FÉVRIER 2013, CRUE VICENNALE (DREAL PAYS DE LA LOIRE)



En premier lieu, la justesse des capteurs de mesure doit être contrôlée. La correspondance entre la valeur affichée par le capteur et la valeur lue à l'échelle limnimétrique doit être vérifiée périodiquement, notamment lors des visites effectuées sur la station et dans certains cas par des relevés hebdomadaires réalisés par des observateurs locaux extérieurs au service. En cas d'écart supérieur à une valeur seuil prédéterminée dans le cadre de la démarche qualité du service (1 cm pour les stations du SPC Meuse-Moselle par exemple), le capteur doit être recalé.

POINT D'ATTENTION !

Aucun recalage ne doit être effectué en crue : la hauteur d'eau au droit du capteur et celle lue à l'échelle sont alors souvent différentes, car les deux dispositifs ne mesurent pas rigoureusement le même phénomène.

Pour les capteurs immergés, la prise de pression et le cas échéant, le puits de mesure, doivent être nettoyés et dévasés à une fréquence adaptée et une purge doit être réalisée sur les capteurs pneumatiques. Il est particulièrement important de veiller au bon état des contrôles hydrauliques en nettoyant les seuils des embâcles et dépôts divers qui ont une influence sur la ligne d'eau et en intervenant sur les arbres tombés dans le lit mineur qui ont une influence sur la ligne d'eau et sur l'érosion du lit.

L'horodatage des capteurs et systèmes de collecte doivent être vérifiés. L'échelle limnimétrique doit être nettoyée à chaque visite pour permettre une lecture correcte. L'entretien des capteurs limnimétriques doit être réalisé selon les préconisations du fabricant.
Pour les stations hydrométriques à relation vitesse-débit, les émetteurs, réflecteurs et récepteurs doivent être régulièrement nettoyés des dépôts de sédiments et d'algues. De même, l'absence d'obstacle (végétation, branches) dans le bief de mesure, entre les émetteurs et les récepteurs, doit être vérifiée.
Les équipements « annexes » à la mesure (alimentation, acquisition, transmission), mais non moins essentiels au fonctionnement de la station, doivent être contrôlés : tension de la batterie[7], nettoyage des panneaux solaires, contrôle de l'état des antennes et des câbles d'antenne, état des protections contre les surtensions électriques, état des connexions, etc.
Les abords de la station doivent être maintenus dans un bon état, et conformes à la réglementation : accès, élagage/débroussaillage de la végétation, vérifications électriques réglementaires, entretien des éventuelles trailles téléphériques de jaugeage (cf. § 4.4.1).

3.3.2 Dossier station

Le dossier station doit permettre de retracer la vie de la station. L'utilisation des données anciennes est fréquente en hydrométrie. Il est nécessaire de disposer d'informations aussi complètes que

7. Mesure de la conductance lorsque des décharges régulières et anormales de la batterie sont suspectées

possible sur les mesures, les techniques et les moyens mis en œuvre pour élaborer ces données afin d'en assurer une critique pertinente permettant de produire, in fine, des séries de débit de qualité. Pour les services de l'État, l'ensemble des données référentielles[8] sont stockées dans la Banque Hydro.

Le dossier station doit contenir les éléments suivants :
• une carte de situation au 1/25000e, accompagnée d'un plan de situation ;
• la taille du bassin versant contrôlé par la station ;
• la courbe hypsométrique du bassin versant : répartition de la surface du bassin versant en fonction de l'altitude ;
• les principales caractéristiques géologiques du bassin versant (les composantes karstiques notamment, pour repérer les transferts naturels entre bassins) ;
• les influences anthropiques identifiées sur le bassin : retenues d'eau, transferts d'eau vers l'extérieur du bassin, importation d'eau depuis un autre bassin, prélèvements (eau potable, industrie, irrigation) ;
• une fiche sécurité recensant les risques présents sur le site, les différents accès (armoire/local, échelle limnimétrique, section de jaugeage) en fonction de la gamme de débit, les numéros d'appel d'urgence et contacts téléphoniques ;
• la cote du zéro de l'échelle limnimétrique rattachée à un repère de nivellement ;
• les levés topographiques datés (seuil, section, bief) ;
• les renseignements administratifs et techniques relatifs à la station : département, commune, lieu-dit, références cadastrales, coordonnées Lambert, tronçon hydrographique ;
• les autorisations administratives, courriers et conventions avec les propriétaires, gestionnaires des sites et des réseaux, observateurs pour lecture d'échelle, co-utilisateurs du site ;
• des photographies datées et localisées de l'environnement de la station, des travaux et des écoulements dans diverses situations hydrologiques ;
• un inventaire des différents matériels constituant la station ;
• une copie du schéma électrique de l'armoire ou de la grille (un autre exemplaire devant réglementairement être présent dans la station) ;
• le consuel pour une station raccordée au réseau électrique (certificat de conformité délivré par le Comité National pour la Sécurité des Usagers de l'Électricité) ;
• un suivi des opérations de maintenance et de jaugeages réalisées sur la station ;
• un suivi historique qui mentionne les évolutions majeures du site : reprise/déplacement d'échelle limnimétrique, changement de capteur, crues significatives, etc.

POINT D'ATTENTION !

La mise à jour de ce dossier peut être considérée comme fastidieuse par le gestionnaire de la station. Elle s'avère cependant d'une utilité majeure quand des anomalies anciennes sont détectées et nécessitent une nouvelle analyse. L'hydromètre doit aussi être archiviste et conserver dans le dossier station les informations nécessaires qui peuvent permettre cette nouvelle analyse d'éléments du passé.

3.3.3 Coûts d'exploitation

Les coûts d'exploitation d'une station sont très variables d'un site à l'autre. La variabilité de la relation hauteur-débit dont dépend la stabilité de la courbe de tarage est un facteur important de la charge financière d'exploitation car elle impacte la fréquence des jaugeages et donc des déplacements. À cela s'ajoutent la distance entre la base de l'organisme gestionnaire et le site. L'exposition de ce dernier aux aléas climatiques tels que la neige et les conditions d'accès particulières peuvent entraîner parfois d'importants frais d'entretien.
Une étude conduite en 2008 et publiée par CNR et EDF dans le cadre d'un congrès SHF a estimé le coût moyen d'exploitation d'une station entre 10 000 et 12 000 euros par an, coûts de main d'œuvre inclus (Carré et al. 2008).

3.4. Références

• AFNOR (2005) Mesure des débits des liquides dans les canaux découverts – Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique) NF EN ISO 6416.

• AFNOR (2014) Hydrométrie – Sélection, établissement et exploitation d'une station hydrométrique. Norme NF EN ISO 18365.

• Audinet (1995) Hydrométrie des cours d'eau – Édition Eyrolles.

• Carré C., Perret C., Khaladi A., Pierrefeu G., Scotti M. (2008) – Coûts et stratégie de gestion des réseaux d'hydrométrie – Congrès SHF 30e journée de l'hydraulique Paris 1 et 2 avril 2008.

• ISO (2010) Hydrométrie – Lignes directrices pour l'application des compteurs de vitesse ultrasoniques utilisant l'effet Doppler et la corrélation d'échos. ISO 15769 (en cours de révision).

• SANDRE, Processus d'acquisition des données hydrométriques, 2007.

8. Coordonnées, zéro d'échelle, jaugeages, courbes de tarage, etc.

Jaugeage

— chapitre 4

Le jaugeage est une opération de mesure ponctuelle dans le temps qui doit être représentée par un couple de valeurs : la hauteur lue à l'échelle représentative du niveau au moment de l'exécution de la mesure de débit et la valeur du débit mesuré. Usuellement, la mesure de débit en rivière est appelée jaugeage.
Les techniques de jaugeage présentées dans ce chapitre nécessitent le déploiement de matériels et de personnes sur place – deux au minimum pour des raisons pratiques et de sécurité - et ne permettent donc pas des mesures en continu ou à intervalles rapprochés (quotidien par exemple). C'est la répétition de jaugeages plusieurs fois dans l'année, pour différentes gammes de débit et sur un même site équipé a minima d'une échelle (chapitre 3), qui permet d'établir la courbe de tarage (chapitre 5) nécessaire pour la constitution d'une chronique continue de débits.

POINT D'ATTENTION !

Pour la détermination du débit d'un cours d'eau dans les conditions naturelles, la réalisation effective de mesures est toujours préférable à l'application de formules hydrauliques. Pour autant, l'art du jaugeage n'est pas simple et il n'existe pas de matériel ou de protocole universel. Le choix d'une méthode est conditionné par les particularités du site où le jaugeage est effectué et par les compétences mobilisables pour sa mise en œuvre. Les différentes méthodes ne sont donc pas exclusives les unes des autres mais complémentaires. La maîtrise de plusieurs méthodes constitue la meilleure garantie pour réaliser de bonnes mesures dans des configurations variées. Utiliser plusieurs méthodes pour une même gamme de débit permet aussi de limiter l'influence du biais propre à chaque matériel sur le tracé de la courbe de tarage.

4.1. Principales méthodes

Pour mesurer le débit d'un écoulement « à surface libre » (cours d'eau, canal, dérivation, etc.), il existe quatre grandes catégories de méthodes :

- **Les méthodes « d'exploration du champ de vitesses »** qui consistent à mesurer la géométrie de la section, à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points et à en déduire le débit par intégration surfacique. Historiquement mise en œuvre à l'aide de flotteurs (surface) ou de moulinets (profondeur), cette catégorie s'est enrichie à la fin du XX^{e} et au début du XXI^{e} siècle d'un panel de nouvelles techniques reposant sur diverses technologies (acoustique, électromagnétique, méthodes non intrusives type radar et vidéo).
- **Les méthodes « volumétriques »** qui permettent de déterminer directement le débit d'après le volume d'eau pénétrant dans un récipient durant un temps donné. Pour des aspects pratiques[9] cette méthode n'est pratiquée que pour des débits très faibles, quelques l/s au plus. Ce principe est parfois utilisé à plus grande échelle en exploitant les volumes d'écluse ou de bief.
- **La méthode par dilution d'un traceur** qui consiste à injecter dans le cours d'eau un traceur en solution et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Au sens de l'équation aux dimensions du débit [L^3T^{-1}], elle peut être assimilée à une méthode volumétrique (cf. équation 4.6).
- **Les méthodes « hydrauliques »** s'appuyant sur l'application de formules d'hydraulique. La méthode consiste à implanter dans l'écoulement une section de contrôle artificielle assurant une relation univoque entre le débit et la hauteur, qui est alors la grandeur mesurée. Ces seuils peuvent être installés de manière permanente ou temporaire. La méthode des seuils-jaugeurs portables peut être utilisée dans les campagnes d'étiage portant sur des débits inférieurs à 100 l/s.

La suite du chapitre détaille la première et la troisième catégorie de jaugeages.

4.2. Opérations préalables à la mesure

Quelle que soit la méthode employée, avant d'engager la mesure, des opérations préliminaires sont nécessaires, notamment sur un nouveau site.
Tout d'abord, il faut s'assurer que la totalité du débit est bien mesurée. Une reconnaissance sur carte au 1/25000 et sur photographies aériennes (via un SIG ou le site http://www.geoportail.gouv.fr) est indispensable pour tout nouveau point de mesure. Cette reconnaissance doit permettre d'appréhender la configuration du site et de prédéterminer l'endroit où se fera la mesure en tenant compte des accès possibles. Une fois sur le terrain, l'emplacement de la section de mesure (ou le bief dans le cas d'une mesure par dilution) et le matériel à mettre en œuvre doivent être précisés en fonction de divers facteurs :

9. Taille du récipient nécessaire, aménagement spécifique éventuel pour concentrer les écoulements

• la configuration du site et les conditions d'écoulement : hauteurs, vitesses, largeur de la section, régularité de l'écoulement, turbulences, végétation aquatique ;
• le nombre de personnes pouvant participer à la mesure (2 est un minimum) et le temps disponible ;
• l'accès et les conditions de sécurité dans lesquelles les matériels peuvent être déployés ;
• le niveau d'incertitude toléré.

Pour trouver la section adaptée à la méthode retenue, il ne faut pas hésiter à se déplacer en amont et en aval (de plusieurs centaines de mètres parfois), en estimant ensuite le temps de propagation par rapport à l'échelle qui est la seule référence. Si des pertes ou des apports sont observés entre l'endroit à évaluer et la section de mesure, ils doivent être mesurés ou estimés.

Le développement d'herbiers peut modifier temporairement la section de rivière utilisée habituellement pour le jaugeage. Dans la mesure du possible, un autre site de jaugeage doit être trouvé pour effectuer la mesure. Il est également utile de s'informer auprès des gestionnaires du cours d'eau pour savoir si un faucardage est envisagé à court terme. Cette opération, pour avoir un impact positif sur la qualité d'un jaugeage, nécessite en effet des moyens importants qui ne sont souvent pas à la portée des équipes de jaugeages.

Lorsqu'il existe plusieurs sections d'écoulement (fréquent en crue), elles doivent toutes être jaugées. L'oubli d'un bras ou d'un ouvrage de décharge est une cause d'erreur fréquente. Chaque mesure est alors indépendante et des méthodes différentes peuvent être appliquées. Le débit total mesuré est alors la somme des débits partiels mesurés. Sauf réalisation simultanée des jaugeages dans les différents bras, il faut prendre garde à la variation du niveau d'eau et/ou du débit entre les différents jaugeages effectués pour pouvoir rattacher ce débit total mesuré à la bonne cote.

Plus généralement, même pour des jaugeages sur une section unique, le niveau d'eau ne doit pas varier de façon significative pendant la mesure : le jaugeage total doit être suffisamment rapide pour ne pas avoir plus de 10 % de variation de débit en crue entre le début et la fin du jaugeage. Les niveaux doivent être notés au début et à la fin du jaugeage par rapport à un repère fixe : échelle limnimétrique, margelle d'un pont, bâton marqué, etc. Lorsque les niveaux varient rapidement, des relevés intermédiaires sont effectués pendant le jaugeage. La hauteur de référence du jaugeage est alors déterminée par :

Équation 4.1 :

$$H = \frac{\sum_i hi\ qi}{Q}$$

H : cote moyenne de référence du jaugeage
hi : cote à l'échelle correspondant au débit partiel qi
qi : débit partiel, produit du débit calculé sur la $i^{ème}$ verticale par une largeur d'application
Q = $\sum_i qi$ **:** débit calculé à la cote H

Cette formule préconisée par la norme ISO 748 n'est pas strictement rigoureuse mais bien adaptée aux conditions de mesure.
En plus des caractéristiques de mesure (vitesses, profondeurs, géométrie), un jaugeage doit aussi être repéré par une localisation précise, une date, une heure de début et de fin et des indications de hauteur aussi précises que possible. Enfin, le matériel de mesure doit être en très bon état de fonctionnement et utilisé par un personnel compétent, formé à son utilisation et ayant une pratique suffisante. Son stockage et son entreposage temporaire (en particulier dans les véhicules) doivent être assurés dans de bonnes conditions.

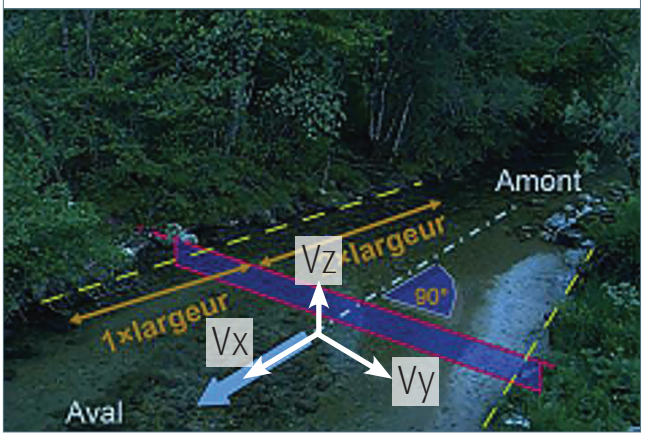
4.3. Jaugeages par exploration du champ de vitesses

Le principe de cette méthode est de déterminer le champ de vitesses dans une section transversale du cours d'eau dont on mesure aussi la géométrie. Le débit est ensuite calculé par intégration surfacique des vitesses dans la section.
L'exploration du champ de vitesses peut être faite de façon quasi

⊞ « JAUGEAGE AVEC UN COURANTOMÈTRE ACOUSTIQUE SUR L'ARC EN MAURIENNE (73) » (IRSTEA)



FIGURE 4.1 : ILLUSTRATION D'UNE BONNE SECTION DE JAUGEAGE (IRSTEA)



complète[10] ou partielle selon les conditions de sécurité attachées au type d'écoulement et le matériel utilisé. Le jaugeage peut être fait :
• en profondeur de façon ponctuelle à l'aide d'appareils submersibles appelés généralement vélocimètres (moulinets, courantomètres, cf. § 4.4) qui vont permettre de réaliser des mesures de vitesses en différentes profondeurs sur plusieurs verticales de la section ;
• en profondeur de façon quasi-continue spatialement à l'aide de profileurs de vitesses (ADCP, cf. § 4.5) qui établissent un maillage fin du champ de vitesses ;
• en surface seulement lorsque les conditions hydrauliques ne permettent pas l'intrusion de matériel dans l'écoulement (cf. § 4.6).

Chaque mode d'exploration est décrit dans les paragraphes suivants. Ils reposent tous sur le choix initial d'une section de mesure, pour lequel des critères communs peuvent être définis (cf. Figure 4.1).

Les dimensions géométriques de la section de mesure doivent être aisément mesurables et l'écoulement doit y être contenu. La section de mesure doit être de préférence perpendiculaire à l'écoulement. Le linéaire de rivière dans lequel s'inscrit la section de jaugeage doit être le plus rectiligne possible. La section de mesure doit être éloignée de tout rétrécissement / élargissement ou obstacle, naturel ou artificiel, engendrant des perturbations hydrauliques. L'écoulement doit être fluvial et non torrentiel (cf. § 2.1). Visuellement, l'écoulement doit être uniforme sur une distance suffisamment longue en amont et en aval. Les zones d'eaux mortes, les écoulements sous-berge et les courants de retour sont à éviter. Si ce n'est pas possible, la mesure doit être effectuée rigoureusement en tentant de réduire les erreurs que ces conditions peu favorables impliquent et en notant les phénomènes observés qui seront utiles lors du dépouillement.

La section ne doit pas présenter de fortes disproportions horizontales et verticales. Le meilleur compromis entre profondeurs et vitesses suffisantes, y compris à l'étiage, est recherché.
Des petits aménagements limités et réversibles peuvent être faits sur la section : petites digues afin de canaliser les écoulements et/ou réduire les zones d'eaux mortes, enlèvement des pierres sur le fond et les berges, arrachage ponctuel de la végétation aquatique, etc. Ces aménagements ne doivent cependant, ni influencer les hauteurs de la section au droit du limnigraphe/capteur, ni perturber le milieu piscicole (présence de frayères par exemple). La mesure n'est effectuée qu'après le temps nécessaire à la régularisation de l'écoulement consécutive à ces réaménagements.

POINT D'ATTENTION !

Il est important de consacrer suffisamment de temps au choix de la section de mesure, c'est le paramètre le plus important dans la qualité d'une mesure. Une section inadaptée ne permettra jamais un jaugeage de qualité.

Pour un site donné, le choix de la section de mesure peut varier dans le temps pour une même gamme de débit mesuré si chaque section de mesure répond aux critères de bonne qualité définis précédemment. Alterner les sections de mesures peut en effet contribuer à une meilleure estimation de l'incertitude des jaugeages réalisés. Si deux sections sont jugées de bonne qualité, il n'y a pas de raison de privilégier les jaugeages réalisés sur l'une par rapport à l'autre.

4.4. Exploration quasi complète du champ de vitesses – Perche et saumon

4.4.1 Supports du vélocimètre

L'exploration du champ des vitesses peut être effectuée avec l'aide de différents supports en fonction de l'accessibilité du cours d'eau.

• **Perche ou micro perche :** lorsque la section de mesure est entièrement accessible à pied, un support de type perche ronde sur lequel le vélocimètre est fixé peut être utilisé (cf. Figures 4.4 et 4.5). Le couple hauteur-vitesse régit la stabilité du jaugeur (cf. chapitre 9 sur les règles de sécurité).

• **Potence :** c'est un dispositif muni d'un treuil, d'un bras de déport et d'un câble électro-porteur sur lequel est fixée une masse profilée nommée couramment saumon (cf. Figure 4.5). Il existe toute une gamme de saumons allant de 5 à 100 kg. C'est sur le saumon que le vélocimètre est fixé. Ce type de dispositif est délicat à utiliser voire dangereux si le saumon est très lourd et les vitesses à mesurer élevées car le risque de basculement est important. Il doit être réservé à des écoulements lents pour lesquels des saumons plus légers, inférieurs à 25 kg, peuvent être utilisés.

• **Camion jaugeur :** la potence est montée sur un véhicule de type fourgon, ce qui sécurise le fonctionnement de l'ensemble.

• **Traille téléphérique :** un câble porteur est tendu de manière permanente en travers d'une section de rivière. Il permet le déplacement d'un chariot équipé d'un câble électro-porteur sur lequel est fixé un saumon. Le tout est piloté depuis la berge à l'aide d'un treuil

10. Il subsiste toujours des zones où les vitesses ne sont pas mesurées

électrique la plupart du temps. Ce type d'équipement renforce encore la sécurité par rapport à un camion jaugeur. Il est cependant coûteux, reste attaché à un seul site et il peut y avoir un risque de rupture de câble lorsque les vitesses sont fortes en présence de corps flottants.

• **Solution mixte perche sur potence :** certains dispositifs « maison » permettent de monter une perche profilée (20*40 mm ou 75*35 mm) sur une potence munie de galets de guidage.

4.4.2 Maillage de la section et choix des verticales

Le principe est de répartir dans la section des verticales successives, dans la profondeur desquelles des mesures de vitesses sont effectuées (cf. Figure 4.2). La localisation des verticales, le nombre de mesures par verticale, leur localisation dans la profondeur et le temps de mesure doivent être déterminés avec soin.
En règle générale, plus le nombre de mesures est élevé, plus la qualité du jaugeage est bonne, sauf lors de variations rapides du niveau. Un temps de mesure réduit permet, dans ce cas précis, de rattacher plus facilement une cote au jaugeage effectué. Pour des raisons opérationnelles, il s'agit pourtant de trouver un compromis entre le temps de mesure et sa précision.
Les verticales doivent être choisies en tenant compte des variations de profondeurs et de vitesses au sein de la section. En effet, les mesures effectuées sur chaque verticale sont appliquées sur une largeur à droite et à gauche de cette verticale. Plus l'écartement entre deux verticales est grand, plus cette zone « d'application » est importante. Par conséquent, plus la section présente une topographie et un écoulement réguliers, plus l'espacement des verticales est envisageable. Inversement, plus le champ de vitesses et/ou le fond du lit est irrégulier, plus les profils doivent être rapprochés. Plus la section choisie présente un écoulement régulier, plus le jaugeage est aisé et rapide.
La figure 4.3 donne des repères utiles sur le nombre de verticales à réaliser en fonction de la largeur du cours d'eau. La connaissance de la section et des écoulements permet au jaugeur de se positionner au mieux au sein de cette enveloppe.
Selon la même logique, placer les verticales extrêmes le plus près possible des bords de la section permet de minimiser l'extrapolation sur les bords.

⊞ FIGURE 4.2 : PRINCIPE DU MAILLAGE DE LA SECTION (IRSTEA) - MESURE À 3 POINTS PAR VERTICALE

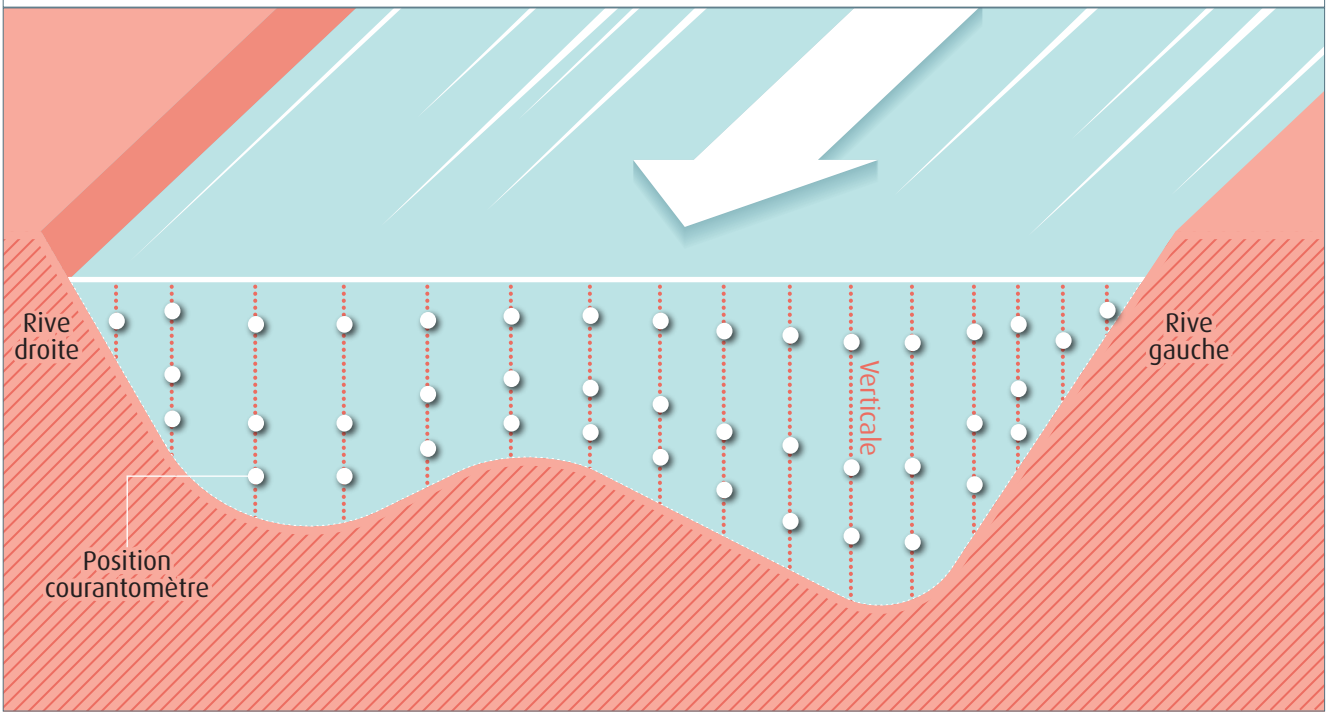
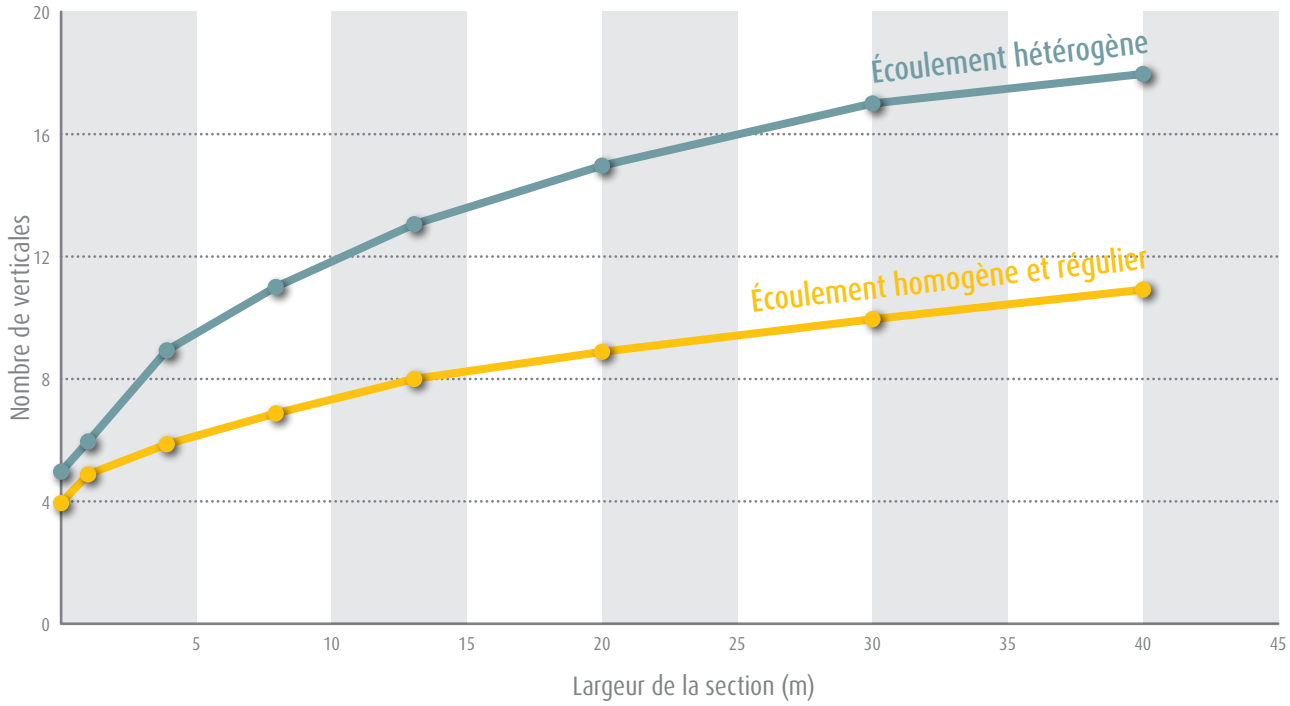


FIGURE 4.3 : COURBE ENVELOPPE DES PRATIQUES OPTIMALES POUR LE NOMBRE DE VERTICALES À RÉALISER (CHARTE QUALITÉ HYDROMÉTRIE, 1998)



L'écoulement homogène et régulier correspond à des conditions qui s'approchent de celles d'un canal. L'écoulement hétérogène correspond à une situation d'un fond irrégulier. Pour un chenal d'écoulement homogène et régulier de 20 mètres de large, 9 verticales suffisent à bien définir le débit. Pour la même largeur mais pour un chenal d'écoulement hétérogène, il faudrait 15 verticales.

Afin de mieux décrire la bathymétrie d'une section sans augmenter la durée de la mesure, il est intéressant d'intercaler entre les verticales du jaugeage des verticales où seule la mesure de profondeur est réalisée (méthode dite d'ajout de lame d'eau décrite en bonus).
Les verticales de mesures peuvent être réalisées soit en mesurant ponctuellement la vitesse de l'écoulement en quelques endroits bien choisis de la verticale (méthode « point par point » décrite ci-dessous) soit en mesurant une vitesse intégrée sur la verticale (méthode « par intégration » décrite en bonus).

Lorsque le jaugeage est effectué selon la méthode « point par point », le nombre de points par verticale doit tenir compte à la fois de la profondeur, des variations verticales des vitesses et du matériel de mesure utilisé. Là aussi, il est quasiment impossible de définir une règle. Les principes suivants peuvent toutefois être suivis :
• répartir les points sur la verticale avec des mesures plus nombreuses dans la moitié basse ;
• rapprocher les points en cas de fort gradient vertical des vitesses. Si l'écart entre deux points successifs est trop grand, ne pas hésiter à effectuer une mesure intermédiaire ;
• éviter les verticales avec un unique point de mesure, sauf cas particuliers (débit à la marge dans les zones d'eau de faibles profondeurs) ou pour des raisons de sécurité (mesure de la seule vitesse de surface en crue) ;
• rapprocher le plus possible les mesures haute et basse respectivement de la surface et du fond, afin de minimiser les extrapolations.

Le matériel utilisé a également son importance. Pour le moulinet par exemple, la distance au fond et à la surface ne peut pas être inférieure au rayon de l'hélice. De même, l'écart entre deux mesures successives ne peut pas être inférieur au diamètre du moulinet (superposition des zones de mesures).
Les règles suivantes, issues de la norme ISO 748, donnent des repères particulièrement utiles pour les verticales à faibles profondeurs pour lesquelles se posent le plus de questions quant au positionnement des mesures :
• verticale à un point : mesure à 40 % du fond ;
• verticale à deux points : mesures à 20 % et 80 % du fond ;
• verticale à trois points : mesures à 20 %, 40 % et 80 % du fond.
Le calcul de la vitesse moyenne à partir de 1, 2 ou 3 points de mesure par verticale se fait alors par un calcul algébrique, et non par une intégration des vitesses sur la profondeur.

La durée de la mesure en un point ne doit pas être inférieure à 30 secondes pour prendre correctement en compte la pulsation de l'écoulement. Lorsque le vélocimètre est utilisé sur un saumon monté sur potence, camion jaugeur ou traille téléphérique, des corrections d'angles sont parfois nécessaires :
• angle formé entre la verticale et le câble support lorsque le saumon est entraîné vers l'aval. La profondeur étant mesurée sur le déroulement du câble, il faut corriger la mesure de profondeur lue sur le compteur ;

⊞ FIGURE 4.4 : JAUGEAGE À LA PERCHE – POINT PAR POINT (EDF-DTG)



Le jaugeur est positionné face au courant, légèrement en aval de la section de mesure pour ne pas perturber les vitesses mesurées, la perche est devant lui et orientée vers l'amont perpendiculairement à la section et non en fonction des lignes de courant préférentielles si elles ne sont pas perpendiculaires au transect.

• angle horizontal formé entre l'axe du chenal d'écoulement et l'axe du saumon. Les vitesses d'écoulement ne sont en effet pas toujours parallèles à l'axe du chenal.
Enfin, selon les capteurs et les modèles, les mesures de vitesses sont soit automatiquement enregistrées, soit notées par un opérateur autre que le jaugeur sur une fiche de jaugeage.

4.4.3 Moulinet

Le principe physique est mécanique : un moulinet muni d'une hélice est introduit perpendiculairement à la section de mesure (Figure 4.4). Le courant met l'hélice en rotation. Une impulsion électrique étant émise à chaque tour de l'hélice et la durée de la mesure étant fixée par l'opérateur, la vitesse moyenne de rotation Ω sur la durée de la mesure est alors connue. La vitesse de l'écoulement V est déduite via la loi d'étalonnage du moulinet. Il a été démontré (Rateau 1898) que cette dernière était de forme hyperbolique. En pratique, les constructeurs découpent l'hyperbole en 2 ou 3 segments de droite. Pour un segment, l'équation suivante s'applique :

Équation 4.2 :

$$V = a\,\Omega + b \qquad N1 < \Omega < N2$$

V : vitesse de l'écoulement [m/s]
Ω : vitesse de rotation de l'hélice [nb trs/s]
a et b : coefficients d'étalonnage du moulinet
N1 et N2 sont les limites de validité de l'équation du segment [tours/s]

La loi d'étalonnage est fournie par le constructeur à la livraison. Il a été constaté que cette dernière variait très peu pour un type de moulinet et un type d'hélice associée. Elle ne varie pas non plus dans le temps à condition que le matériel soit entretenu rigoureusement (lubrification, nettoyage de l'axe, changement des roulements à billes). La vérification de la libre rotation est indispensable avant chaque utilisation. La vérification périodique de la courbe de ralentissement dans l'air et le remplacement, le cas échéant des pièces défectueuses garantit la validité de la loi d'étalonnage. L'entretien des moulinets est décrit dans un bonus.

POINT D'ATTENTION !

L'utilisation d'un moulinet sur un support différent de celui sur lequel il a été étalonné (perche 20*40 mm au lieu d'un saumon de 80 kg par exemple) créé un biais de l'ordre de quelques pour cent.

Chaque hélice possède une gamme de vitesses pour laquelle la mesure est optimale selon sa taille et son pas (distance virtuelle d'avancement de l'hélice en un tour complet). Pour cette raison, il faut disposer d'un ensemble d'hélices pour couvrir toute la gamme de vitesses à jauger. Tout un panel d'hélices existe, de taille, pas et matériaux (plastique, métal) différents. L'emploi d'une hélice lourde implique d'attendre la stabilité de la rotation avant de déclencher la mesure, puisqu'elle atteint moins vite sa vitesse nominale et de rallonger le temps d'intégration, car elle est moins réactive aux variations de vitesse.

POINT D'ATTENTION !

Pour que l'incertitude sur la mesure de vitesse reste inférieure à 1 % au seuil de confiance de 95 %, la vitesse mesurée ne doit pas être inférieure à la valeur du pas de l'hélice divisé par 2. Par exemple, une hélice au pas de 0,05 m ne doit pas être utilisée pour une vitesse inférieure à 2,5 cm/s. Considérant que la résolution des compteurs est de ± 1 tour, l'hélice choisie et le temps de mesure retenu doivent permettre au moins 100 rotations, afin que l'incertitude de résolution soit de l'ordre de 1 %.

Le moulinet peut être déployé sur une perche : l'opérateur jauge alors à pied dans la rivière (cf. Figure 4.4) ou depuis un pont ou une passerelle (rallonge de perche). Lorsqu'un jaugeage à la perche est impossible à cause de vitesses ou de hauteurs trop élevées, le moulinet est fixé sur un saumon, lui-même relié à un câble et déployé depuis un camion jaugeur situé sur un pont ou depuis une traille téléphérique fixe (cf. Figure 4.5).
Avec un vaste panel d'hélices et un système de déploiement par camion jaugeur, la technique du moulinet permet de jauger une gamme étendue de vitesses. Il faut habilement jongler avec les différentes hélices pour s'adapter au mieux aux vitesses à jauger. Dans le cas de fortes vitesses une hélice qui offre moins de résistance à l'écoulement est à privilégier et l'inverse pour mesurer des faibles vitesses.

POINT D'ATTENTION !

Du fait de son caractère intrusif, il est plus difficile voire dangereux de déployer un moulinet en crue. C'est parfois impossible lorsque le saumon, malgré sa masse et son profil hydrodynamique, ne parvient pas à pénétrer l'écoulement.

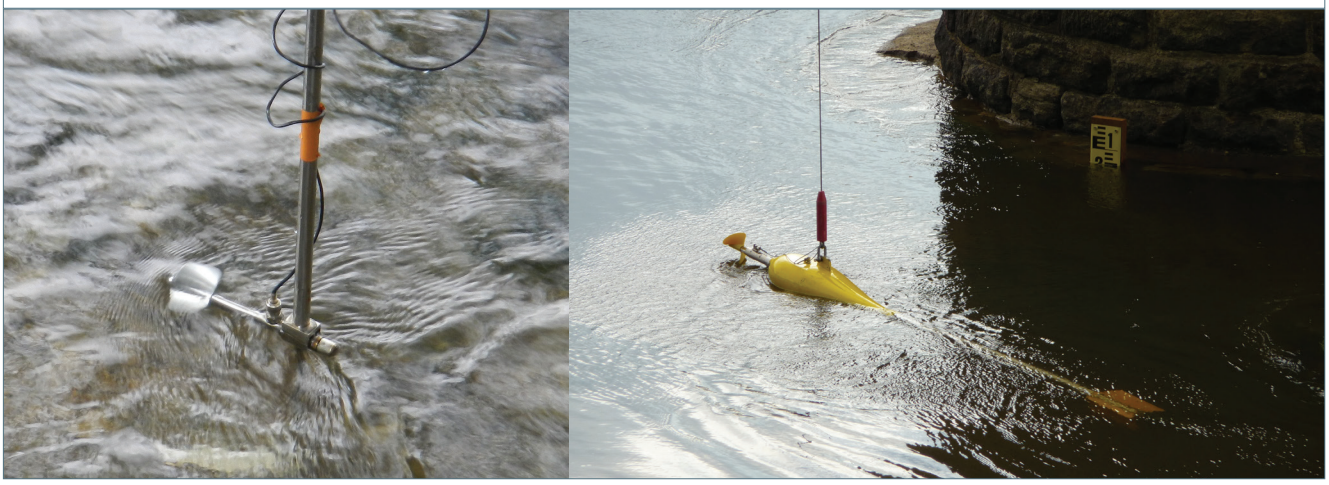
4.4.4 Courantomètre électromagnétique

Dans le capteur immergé, une bobine d'induction crée un champ magnétique entre deux électrodes fixes. Le déplacement de l'eau, conductrice, dans ce champ magnétique, produit une tension induite proportionnelle à sa vitesse (principe de Faraday). Cette tension induite est traitée par l'électronique du boîtier de mesure qui fournit à l'opérateur la vitesse moyenne sur la durée de mesure.
Le capteur est fixé sur une perche (cf. Figure 4.6) et déployé à pied dans la rivière ou depuis un pont. La mesure doit être réalisée comme pour un moulinet. Le montage sur saumon pour un jaugeage avec de fortes profondeurs n'est pas possible. La méthode de jaugeage est celle du « point par point ».
Contrairement au moulinet et comme pour le courantomètre acoustique, le capteur est le même pour toute la gamme de vitesse qui varie selon le constructeur. La mesure des faibles vitesses (en dessous de 5 cm/s par exemple) est en théorie possible. Certains modèles comportent un capteur de pression qui mesure la profondeur d'immersion du capteur, permettant ainsi de le positionner. Il est toutefois nécessaire de contrôler régulièrement cette mesure.
La pratique de l'étalonnage n'est pas systématique. Certains constructeurs proposent des étalonnages périodiques pour s'assurer que le capteur ne dérive pas dans le temps.

POINT D'ATTENTION !

Le courantomètre ne doit pas être utilisé à proximité de substances ferreuses (armature de béton) qui perturbent l'appareil. Les courantomètres électromagnétiques étant sensibles à la température, ils doivent être immergés quelques minutes avant le début du jaugeage.

⊞ FIGURE 4.5 : MONTAGE D'UN MOULINET SUR PERCHE À GAUCHE ET SUR SAUMON À DROITE (DREAL NORMANDIE, DREAL CENTRE VAL DE LOIRE)



⊞ FIGURE 4.6 : UN MODÈLE DE COURANTOMÈTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE (MF PRO DE OTT) : CAPTEUR ET BOÎTIER



4.4.5 Courantomètre acoustique

Le capteur immergé émet une onde acoustique de fréquence f en direction de deux cellules de mesure dans l'écoulement. Cette onde est réfléchie par les particules en suspension contenues dans les cellules. Le capteur reçoit en retour cette onde réfléchie et mesure sa fréquence f' qui est plus élevée que f car les particules en suspension se rapprochent du capteur : c'est l'effet Doppler. La différence entre f et f' est proportionnelle à la vitesse d'écoulement :

Équation 4.3 :

$$V \cos \alpha = \frac{C\,(f-f')}{f}$$

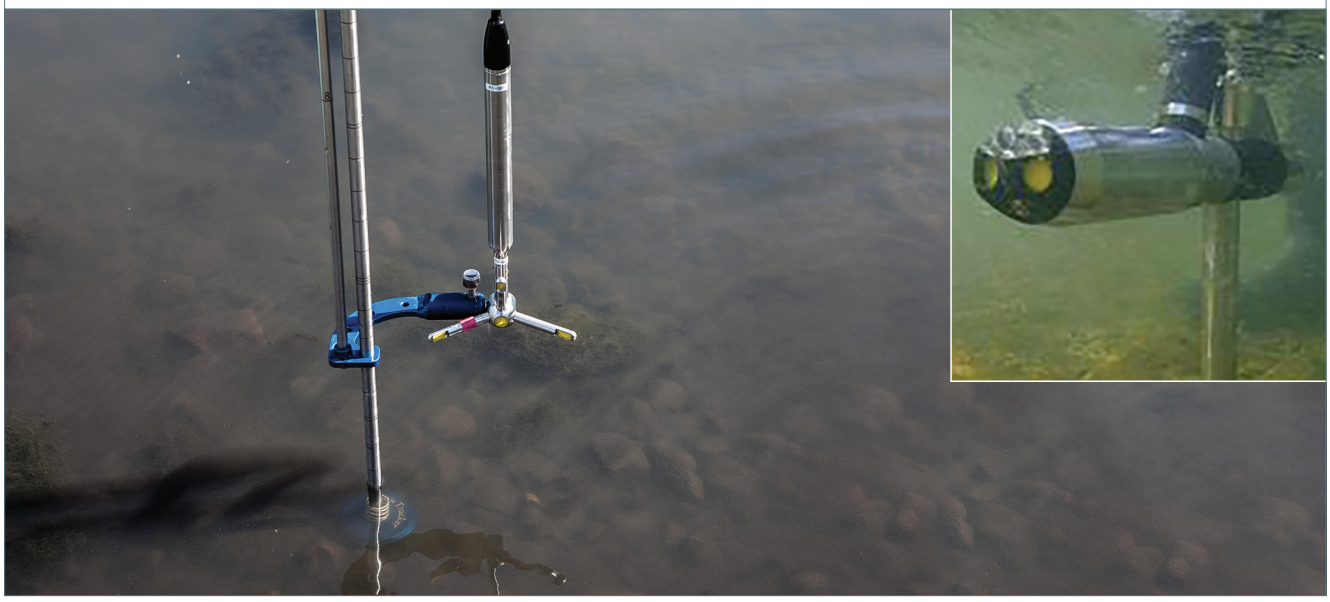
V : vitesse de l'écoulement [m/s]
α : angle entre la direction de l'écoulement et la direction de la mesure (cos **∂** = 1 si l'appareil est bien positionné dans l'axe de l'écoulement) [°]
C : Célérité des ondes sonores dans l'eau [m/s] (C vaut environ 1500 m/s)
f : fréquence de l'onde émise [Hz]
f' : fréquence de l'onde reçue [Hz]

L'analyse de deux cellules permet la mesure de deux composantes Vx et Vy de l'écoulement.
À noter que certains appareils sont munis de trois céramiques et mesurent trois composantes de vitesse.
Le capteur est fixé sur une perche (cf. Figure 4.7) et déployé à pied dans la rivière ou depuis un pont ou une passerelle. La mesure doit être réalisée comme pour un moulinet. Le montage sur saumon pour un jaugeage avec de fortes profondeurs n'est pas possible. La méthode de jaugeage est celle du « point par point ».
Ce courantomètre nécessite la présence de MES dans l'écoulement. Les retours d'expérience montrent toutefois que la mesure demeure presque toujours possible, y compris dans des eaux très faiblement chargées. La présence de micro-bulles d'air dans l'écoulement (typiquement à proximité d'une chute) est en revanche une source fréquente de perturbation de la mesure, l'onde acoustique émise se réfléchissant également sur ces micro-bulles.

POINT D'ATTENTION !

Les courantomètres acoustiques étant sensibles à la température, ils doivent être immergés quelques minutes avant le début du jaugeage.

⊞ FIGURE 4.7 : DEUX MODÈLES DE COURANTOMÈTRES ACOUSTIQUES (FLOWTRACKER DE SONTEK ET ADC DE OTT)



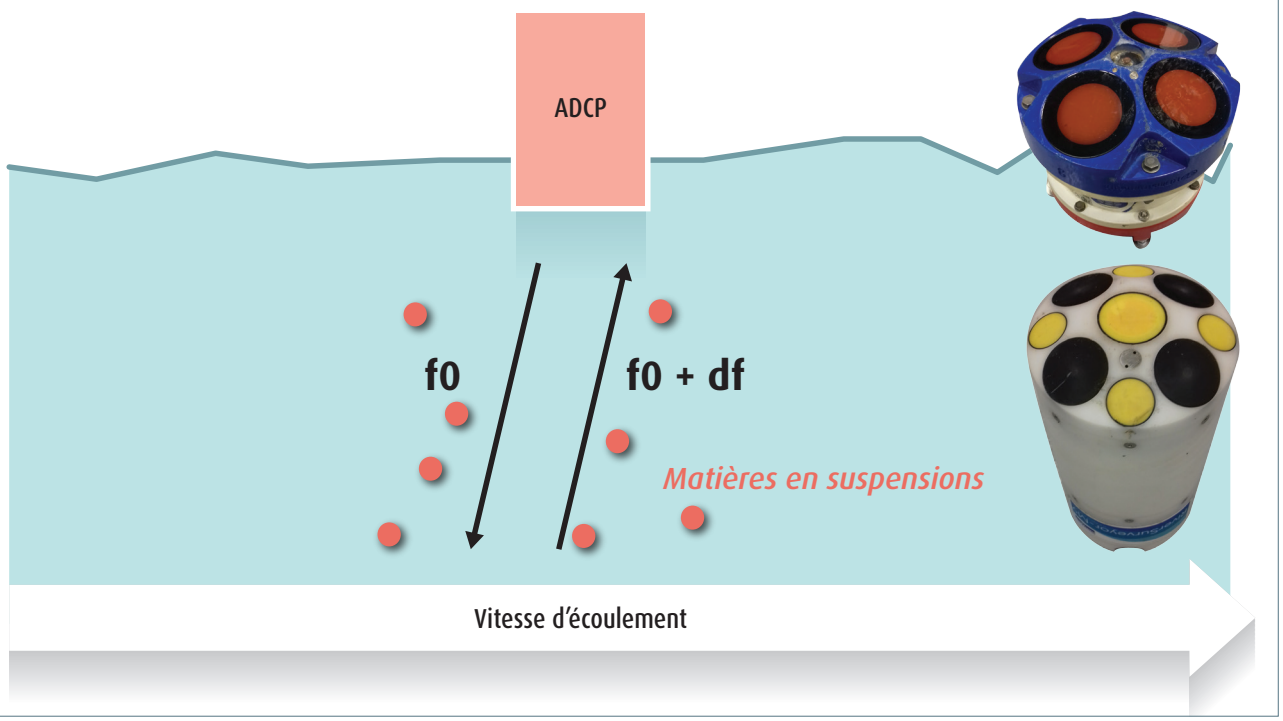
4.5. Exploration quasi complète du champ de vitesses - profileur acoustique de vitesse (ADCP)

L'adaptation pour les mesures en rivière du profileur de vitesse à effet Doppler (ADCP) à la fin du XX^{e} siècle, a constitué un saut technologique de premier plan pour l'hydrométrie. Ce type de profileur permet une exploration plus complète du champ des vitesses sans qu'elle puisse toutefois être qualifiée de complète. En effet, les mesures élémentaires de vitesse doivent être agrégées en cellules pour tenir compte des effets pulsés de l'écoulement et les zones proches du fond et de la surface restent inexplorées.
Le livre « Mesures hydrologiques par profileur Doppler » (Le Coz et al. 2008) constitue l'ouvrage de référence en France sur cette méthode de jaugeage. Il est vivement conseillé de s'y référer pour compléter les premières notions exposées ci-dessous.
L'appareil possède plusieurs transducteurs émettant, indépendamment les uns des autres, des ondes acoustiques. Celles-ci sont émises à une fréquence élevée sous la forme d'un ensemble de tirs appelé salve (ping) et verticalement depuis la surface vers le lit de la rivière.
L'analyse du signal réfléchi sur le fond permet de déterminer la profondeur (via le délai entre l'émission et la réception) et la vitesse de déplacement de l'ADCP par rapport au fond (effet Doppler, cf. équation 4.3). L'analyse du signal réfléchi sur les MES permet de déduire la profondeur de ces MES et la vitesse de l'écoulement à cette profondeur (cf. Figure 4.8).

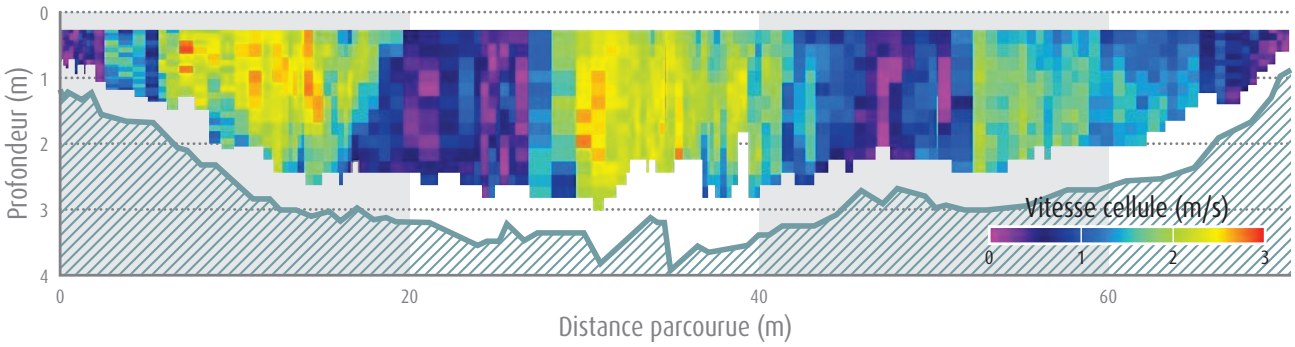
La traversée de la section par l'ADCP permet la mesure de sa géométrie et du champ des vitesses. Le tout est alors représenté par une mosaïque de cellules dans la section (cf. figure 4.9). Le champ de vitesses mesuré n'est toutefois pas complet. Les mesures ne sont pas possibles sur deux zones « aveugles », une en surface et une à proximité du fond. Les vitesses dans ces zones non explorées sont extrapolées par le logiciel de l'ADCP. Dans ces zones non mesurées, le débit extrapolé ne doit pas excéder 30 % du débit total pour une mesure convenable. S'il dépasse 50 % il est nécessaire de s'assurer de la validité des extrapolations et donc du jaugeage. Il est possible de réduire la zone « aveugle » de surface en déjaugeant de quelques centimètres le support de l'ADCP, le capteur doit alors rester bien immergé pendant toute la traversée, en particulier en crue si son support s'incline sous l'effet des fortes vitesses.

Si les premiers modèles étaient cantonnés aux jaugeages sur les rivières larges et profondes ou seulement en période de crue, des modèles permettent depuis de jauger avec des hauteurs d'eau bien plus faibles (à partir de 50 cm), donc sur davantage de rivières et pendant une plus grande partie de l'année. Certains modèles proposent en un seul appareil une gamme d'utilisation étendue.
Les capteurs ADCP étant sensibles à la température, ils doivent être immergés quelques minutes avant le début du jaugeage.
Les opérateurs ont à disposition un ordinateur équipé d'un logiciel permettant

FIGURE 4.8 : SCHÉMA DU PRINCIPE ACOUSTIQUE DE L'ADCP ET DEUX MODÈLES : LE RIO GRANDE (RDI INSTRUMENTS) ET LE M9 (SONTEK)



⊞ FIGURE 4.9 : JAUGEAGE À L'ADCP (ORNE À GRIMBOSQ, NORMANDIE, 165 M³/S).



Les zones « aveugles » en surface et au fond sont bien visibles. Elles représentent 25 % du débit sur ce jaugeage. Sur ce site jaugé en crue uniquement depuis un pont, la concentration des écoulements dans les trois arches du pont et les deux zones de vitesses plus faibles dans le sillage des piles sont bien visibles.

de configurer les modes d'acquisition, d'acquérir et de visualiser les données brutes collectées[11] et de tester le bon fonctionnement de la chaîne de mesure. Un premier opérateur paramètre et suit l'acquisition sur l'ordinateur pendant que le second se charge de réaliser les traversées. L'ADCP est maintenu en surface sur une embarcation[12] qui effectue des traversées de rivière. La vitesse de déplacement de l'embarcation doit être d'autant plus faible que la mesure attendue est précise et que les vitesses d'écoulement sont faibles. Une pratique répandue consiste à maintenir une vitesse de déplacement nettement inférieure à celle de l'écoulement. L'ADCP mesurant sa propre vitesse par rapport au fond et puisqu'il est doté d'inclinomètres et d'un compas pour corriger la verticalité, la mesure du débit est totalement indépendante du trajet suivi. Contrairement aux autres modes de jaugeages présentés jusqu'ici, un jaugeage réalisé sur une section de mesure non perpendiculaire à l'écoulement ne nécessite pas une reprise du calcul de débit par une correction trigonométrique.

Il est toutefois conseillé de réaliser les jaugeages sur des sections perpendiculaires à l'écoulement afin de pouvoir calculer les paramètres géométriques tels que la section mouillée, le périmètre mouillé, le rayon hydraulique, la vitesse débitante, etc. Ces paramètres sont ensuite comparés à ceux provenant de jaugeages effectués avec d'autres techniques ou des données topographiques connues de la section jaugée. L'embarcation support de l'ADCP (types de support, attaches, tenue au courant, systèmes de dérives, etc.) conditionne son bon déploiement. Elle fait l'objet d'un chapitre spécifique dans l'ouvrage de référence « Mesures hydrologiques par profileur Doppler ».

Il est impératif de réaliser plusieurs traversées afin de disposer d'un échantillon conséquent de mesures. La précision finale du jaugeage vient de la profusion des mesures. La répétabilité du débit jaugé constitue un bon indice de sa qualité. Le protocole de mesure couramment admis consiste à retenir6 valeurs dont l'écart à la valeur moyenne reste inférieur à une valeur qui dépend des conditions de mesure. En général, on retient plus ou moins 10 %. Si le sens de réalisation des jaugeages (rive gauche vers rive droite ou inverse) met en évidence des écarts systématiques dans le débit mesuré, cela peut être dû à la qualité de certains réglages comme celui du compas, ou au type d'embarcation utilisé. Dans ce cas, il est très important de réaliser le même nombre de traversées dans les deux sens. Des procédures de réglages sont fournies par le constructeur.

Autre précaution préalable au démarrage des mesures : contrôler la présence éventuelle de transport solide sur le fond de la rivière. L'ADCP prenant comme référence le fond du lit pour calculer la vitesse de l'écoulement, il mesure des vitesses plus faibles, en cas de dérive du fond, ce qui a pour effet de sous-estimer le débit. Une vérification simple est d'effectuer avec l'ADCP une acquisition sur un aller-retour en s'attachant à revenir au point de départ. Une trajectoire calculée par l'ADCP ne revenant pas au point de départ, mais sur un point situé plus en amont, est révélateur soit de l'existence d'un fond mobile soit d'un problème de compas. Une vérification complémentaire consiste alors à effectuer une acquisition sur un point fixe et de constater si la trajectoire de l'ADCP reste elle aussi fixe ou si elle dérive progressivement vers l'amont.

POINT D'ATTENTION !

Le transport solide étant fréquent en crue, voire systématique sur certaines rivières, ces vérifications sont essentielles pour ne pas rater ces opportunités de jaugeages en crue rares et donc précieuses.

En cas de transport solide avéré, la mesure peut être corrigée :

- dans l'idéal, par une mesure simultanée de la position de l'ADCP par un GPS embarqué. Sur les derniers modèles d'ADCP, l'option GPS est généralement prévue et son intégration dans la chaîne de calculs est automatique. Sur les modèles plus anciens, les mesures de l'ADCP sont corrigées a posteriori avec les données issues du GPS. L'utilisation d'un GPS ne peut se faire que si le compas de l'ADCP est parfaitement calibré ;

11. Profondeurs, vitesses moyennes, importance des zones « aveugles », etc.

12. Bateau motorisé, drisse motorisée ou support flottant guidé manuellement ou téléguidé

• en l'absence de GPS, en réalisant une correction de fond mobile, soit selon la méthode de l'aller-retour sur point fixe, qui donne une estimation de la dérive moyenne sur l'ensemble de la traversée (nécessite une calibration du compas), soit selon la méthode de la position fixe (recommandée en cas de défaillance du compas).

4.6. Exploration partielle du champ des vitesses

Mesurer le débit des rivières en crue avec les méthodes classiques d'exploration du champ des vitesses est difficile, voire impossible. En effet, les crues sont des événements non stationnaires dont la cinétique peut être plus rapide que la durée d'un jaugeage. De plus, les crues impliquent des conditions d'écoulements extrêmes, avec de très fortes vitesses et de nombreux débris flottants. Dans ces conditions, il est inconcevable pour un opérateur d'accéder à la rivière et il est également dangereux de mettre des appareils de mesure dans l'eau. Il apparaît donc un besoin de mesurer le débit en crue dans un laps de temps court qui minimise le contact avec la rivière. Les mesures non intrusives, jaugeages aux flotteurs, par radar de vitesse de surface ou par analyse d'images, répondent à cette exigence de rapidité et de sécurité et permettent d'accéder à la vitesse de surface des écoulements à une section donnée. Pour calculer le débit, il faut alors connaître la bathymétrie de la section et déduire la forme de la distribution verticale des vitesses à partir des mesures effectuées en surface. Des mesures complémentaires sont nécessaires : relevés topographiques pour la bathymétrie et jaugeages complémentaires pour la distribution verticale des vitesses. Ces mesures additionnelles ne peuvent pas être réalisées pendant les crues et il faut donc faire l'hypothèse de la représentativité des mesures réalisées avant ou après les événements de crue, avec l'incertitude ou le biais que cela peut engendrer.

POINT D'ATTENTION !

Vu les incertitudes associées aux mesures non intrusives (cf.paragraphe 4.8), elles sont réservées aux écoulements en crue et ne peuvent pas remplacer l'hydrométrie traditionnelle. Elles sont un complément dans la boite à outils de l'hydromètre lui permettant d'accéder à des jaugeages en conditions extrêmes.

⊞ FIGURE 4.10 : CAMÉRA À JAUGAC SUR LE LIGNON, BASSIN VERSANT DE L'ARDÈCHE (IRSTEA)



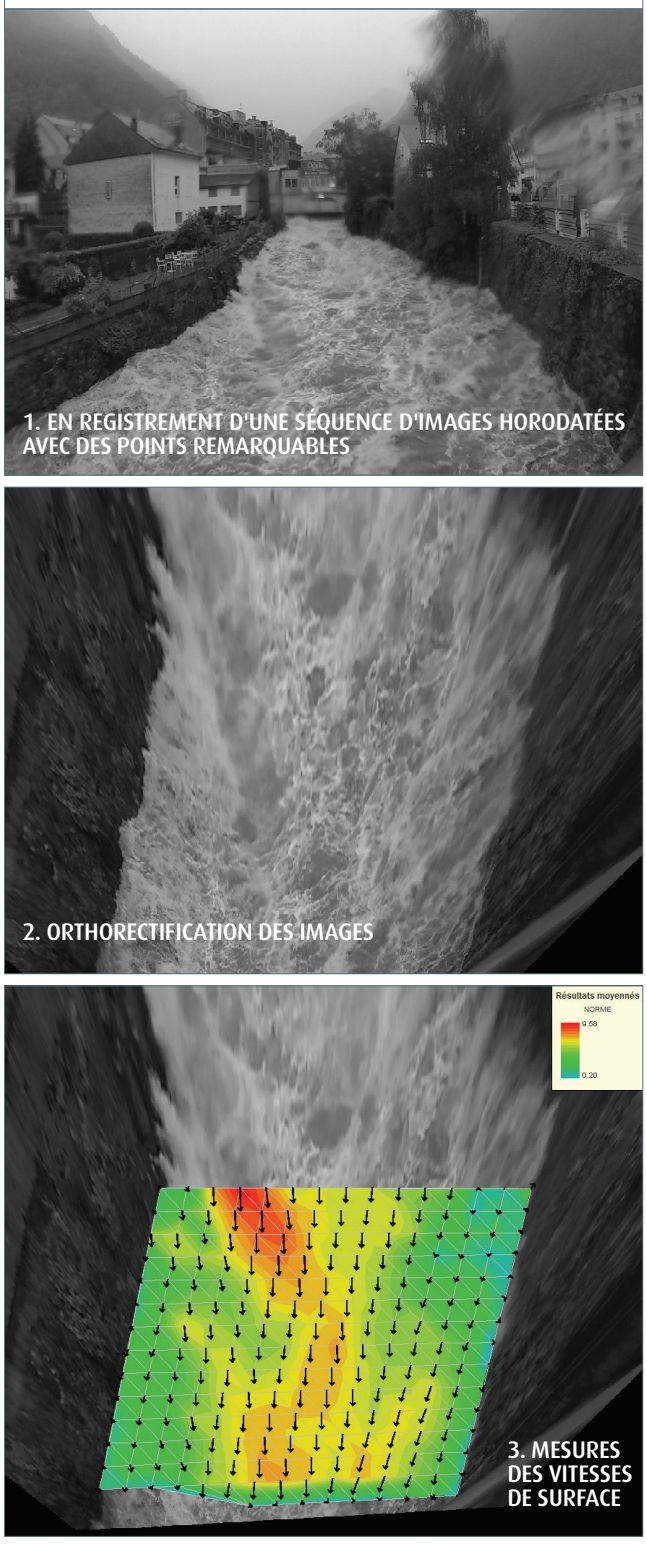
4.6.1 Analyse d'images

L'analyse d'images, également appelée LSPIV (Large-Scale Particle Image Velocimetry), permet de mesurer le champ 2D de vitesses en surface d'un écoulement à condition que des traceurs visibles, tels que des particules solides (débris végétaux, petits flottants, etc.), des bulles ou des figures de turbulence soient advectés avec l'écoulement. La LSPIV a été utilisée pour estimer des débits de rivières d'échelles très différentes, des étiages aux fortes crues ainsi que pour améliorer les courbes de tarage en régimes hydrauliques normaux. La LSPIV ne peut être mise en œuvre de nuit, en cas de brouillard, ou si des obstacles ou salissures gênent le capteur (cf. Figure 4.10). En contrepartie de ces limitations techniques, le matériel est peu coûteux et facile à déployer.

⊞ JAUGEAGE À L'ADCP (DREAL AUVERGNE-RHÔNE-ALPES)



⊞ FIGURE 4.11 : ÉTAPES POUR UNE MESURE DE DÉBIT PAR ANALYSE D'IMAGES (EDF-DTG)



Enregistrement d'image

Une séquence d'images horodatées de l'écoulement doit être enregistrée. L'intégralité de la largeur de la rivière, autour de la section d'intérêt, doit être visible sur les images. Un enregistrement stable d'au moins 10 secondes doit être réalisé. La localisation, la date et l'heure de l'enregistrement ainsi que la fréquence d'enregistrement des images doivent être connues précisément. Un tronçon de rivière avec un fond dur et stable qui sera peu modifié pendant la crue du fait de l'érosion ou de la sédimentation est préférable. Les reflets, scintillations et ombres portées sur la surface de l'eau sont à éviter. La pluie et la neige ne sont pas un problème, du moment que l'objectif reste propre.

Ortho-rectification

Une correction géométrique des images (ortho-rectification) est nécessaire pour s'affranchir des effets de distorsion de perspective. Afin de réaliser cette correction, des points remarquables doivent être identifiés tels que du mobilier urbain, des bâtiments, des ponts, des arbres caractéristiques, des rochers reconnaissables, etc. Ces points doivent être clairement visibles sur les images, et leur position doit pouvoir être relevée avec un appareil de topographie au moment de la prise de vue, ou a posteriori. Cette seconde solution est à privilégier afin de garantir la sécurité des agents. Il faut alors s'assurer que ces points n'ont pas bougé entre le moment de la prise de vue et le moment du relevé topographique.

Calcul du champ de vitesses de surface

Le déplacement des traceurs de l'écoulement sur les images ortho rectifiées est calculé grâce à une analyse statistique en corrélation des motifs. Connaissant la bathymétrie d'une section en travers et supposant un modèle de distribution verticale de vitesses, l'estimation du débit peut être déduite à partir du champ de vitesses LSPIV.
Les jaugeages par analyse d'images peuvent être conduits de façon ponctuelle et mobile (caméra ou appareil photo déployé sur un trépied) ou en station fixe (caméra fixée à demeure, type vidéo surveillance).

4.6.2 Radar de surface

Le radar vélocimétrique (SVR) est équipé d'un capteur qui émet des impulsions électromagnétiques très courtes, et interprète ensuite le signal retour pour déterminer une vitesse ponctuelle de surface (cf. Figure 4.12). Pour que le retour de signal soit bon, la surface de l'écoulement doit présenter une rugosité suffisante (vaguelettes, débris, turbulences). Les variations de hauteur d'eau pendant les mesures sont à surveiller. Dans certaines conditions de pluies fortes, le radar mesure la vitesse des gouttes. Le vent peut également perturber le champ de vitesses de surface.

Cette technique est pratiquée le plus souvent depuis un pont perpendiculaire à la rivière, en visant vers l'amont ou l'aval en fonction de l'écoulement. Le côté qui semble le moins perturbé est à privilégier. Il peut aussi être réalisé depuis une berge en veillant à bien mesurer les angles de visée successifs. Pour explorer le champ de vitesses de surface, le capteur est déplacé le long du pont par verticales successives. Le capteur est incliné vers l'écoulement (typiquement à 45°) mais cet angle peut varier suivant la configuration du site. Dans tous les cas le fonctionnement de l'inclinomètre doit être contrôlé et validé. L'utilisation d'un trépied de photographe permet

FIGURE 4.12 : DEUX TYPES DE RADAR DE SURFACE : LE SVR STALKER PRO II (EDF) ET LE SVR (DECATUR) (IRSTEA)



TABLEAU 4.1 : INDICATIONS DE COEFFICIENTS DE VITESSE EN FONCTION DU TYPE D'ÉCOULEMENT

Type d'écoulement	Coefficient de vitesse
Valeur par défaut (écoulement uniforme, rugosité moyenne)	0,86
Valeur extrême basse : écoulement non uniforme, torrents	0,60
Écoulement rugueux : faibles hauteurs d'eau, fond rugueux, rivière de piémont	0,80
Valeurs usuelles	0,84 – 0,88
Écoulement lisse : fortes hauteurs d'eau, fond lisse, canaux bétons, grands fleuves	0,91
Valeur extrême haute : écoulement non uniforme, influence d'un ouvrage	1,20

un déploiement aisé de l'instrument. Vu la variabilité des débits de crue, il est conseillé d'effectuer une première série de mesures dans un sens puis une seconde en intercalant des verticales entre celles de la première série.

4.6.3 Calcul du débit

Le champ de vitesses de surface est dépouillé avec un logiciel de jaugeage. La bathymétrie réalisée avant ou après le jaugeage, et raccordée à la lecture de l'échelle le jour du jaugeage est exploitée pour connaître la profondeur au droit de chaque mesure. La vitesse de surface mesurée est pondérée par un coefficient de vitesse. La valeur de ce coefficient peut être calculée à partir de comparaisons de jaugeages sur le site, ou à partir de la norme ISO 748 qui propose des coefficients de 0,84 à 0,9 en fonction de la rugosité du fond de la rivière. Le tableau 4.1 donne des indications complémentaires pour le choix de ce coefficient.

4.6.4 Techniques historiques

L'exploration partielle du champ de vitesse peut être réalisée à partir des vélocimètres classiques notamment les moulinets à partir d'un camion jaugeur situé sur un pont ou d'une traille téléphérique. Si le temps d'exposition des personnels et du matériel aux risques liés à l'entraînement du matériel immergé par les corps flottants s'en trouve considérablement réduit lors des crues, il n'en est pas pour autant totalement annulé. Elle n'est donc plus à privilégier. Le flotteur et le chronomètre restent des instruments de dernier recours pour mesurer les vitesses de surface. La technique de jaugeage au flotteur est décrite dans le guide technique - Police de l'eau : « Contrôle des débits réglementaires » (Le Coz et al. 2011).

4.7. Dilution d'un traceur

Cette méthode de mesure offre une alternative intéressante aux méthodes de mesure classiques par exploration du champ des vitesses, lorsque la section des cours d'eau varie rapidement, lorsque la turbulence est forte, ou encore lorsqu'il est dangereux de procéder selon les méthodes classiques notamment lors des crues.

POINT D'ATTENTION !

Couramment utilisée en zone de montagne, son utilisation pourrait être étendue à d'autres secteurs géographiques répondant à ces critères. La bonne qualité des jaugeages qui en ressort et les conditions de mise en œuvre plus sécurisantes que certaines méthodes par exploration en profondeur du champ des vitesses constituent certains de ses avantages.

4.7.1 Principe

Cette méthode repose sur un principe universel de la physique : la conservation de la masse. Il existe deux méthodes de jaugeages par dilution : par injection à débit constant et par injection instantanée (appelée également méthode globale). Le principe de base consiste à injecter un traceur en solution en un point du cours d'eau, et à contrôler l'évolution de la concentration de ce traceur dans une section située à l'aval. Quelle que soit la méthode utilisée, les trois conditions suivantes doivent être respectées :

- le régime de la rivière doit être permanent pendant toute la durée de la mesure ;
- il ne doit y avoir ni perte ni apport de traceur entre les points d'injection et de prélèvement ;
- la condition de bon mélange doit être vérifiée : la concentration de la solution injectée doit être uniforme sur la largeur de la rivière au point de prélèvement.

En cas d'apports intermédiaires entre le point d'injection et le point de prélèvement, le débit mesuré est représentatif du débit au point de prélèvement.

4.7.2 Types de traceurs utilisés

Les traceurs utilisés par les hydromètres français sont les traceurs fluorescents (Rhodamine Water Tracing et l'uranine-fluorescéine) et le NaCl (sel de cuisine fin permettant une bonne dissolution). Si le principe reste le même quel que soit le traceur utilisé, le mode opératoire et le matériel mis en œuvre diffèrent. Du fait de la simplicité de sa mise en œuvre, l'utilisation du NaCl est la plus répandue, mais la gamme de débit mesurable est limitée (inférieure à 1 m^3/s) pour des raisons pratiques (masse de sel à dissoudre et injecter). Pour les débits moyens et forts, les traceurs fluorescents doivent être mis en œuvre.

Lors de l'achat des traceurs, il est indispensable de demander aux fournisseurs la fiche de sécurité du produit. Celle-ci permet aux agents de prendre connaissance des précautions à suivre pour eux-mêmes (port des équipements de protection individuel) et pour le milieu (concentration à respecter).

⊞ « PREMIER JAUGEAGE PAR DILUTION » ŒUVRE DE JEAN THIEBAUX (ORSTOM ET EDF-DTG)



4.7.3 Méthode par injection à débit constant

Une solution de concentration C1 d'un traceur est injectée à débit constant q dans une section située à l'entrée du bief de mesure. Dans une section située à l'aval de ce bief, la concentration est mesurée pendant un temps suffisant et en un nombre de points suffisants, pour permettre de vérifier d'une part, qu'un bon mélange est obtenu, et d'autre part que la concentration C2 atteint une valeur constante. Si tout le traceur injecté passe dans la section d'échantillonnage, le débit du traceur au point d'injection est égal à celui qui traverse la section d'échantillonnage :

Équation 4.4 :

$$qC_1 = (Q+q)C_2$$

Comme C1 >> C2, on peut en déduire : $Q = q\,\frac{C_1}{C_2}$

4.7.4 Méthode par injection instantanée (cf. Figure 4.13)

L'injection instantanée en un point A d'une rivière, d'un volume V [m³] d'une solution contenant un traceur à une concentration C1 permet de connaître le débit Q [m³/s] de cette rivière en mesurant la concentration C2 du traceur en un point B durant le temps T [secondes] de passage du nuage :

Équation 4.5 :

$$Q = \frac{VC_1}{\int C_2.dt} = \frac{VC_1}{C'_2T}$$

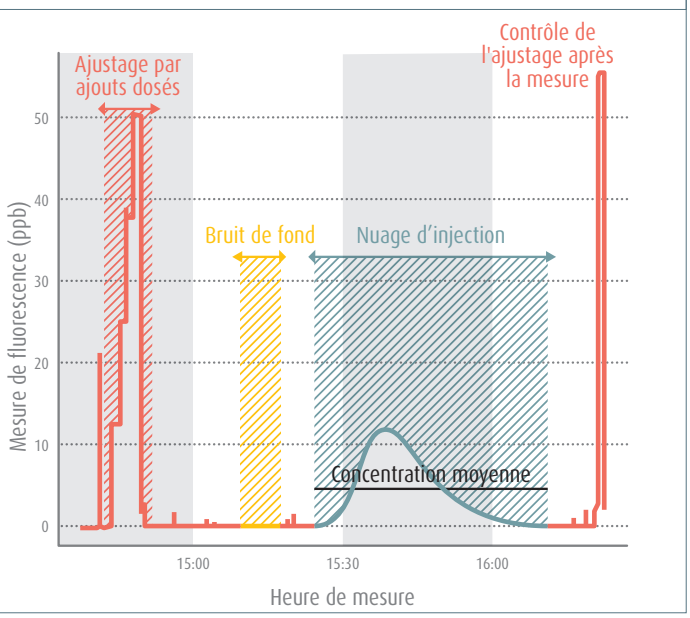
C'2 : concentration moyenne du traceur au point B pendant le temps T.
C'2 est déterminée par une mesure en continu de la concentration instantanée C2, avec une fréquence d'échantillonnage de quelques secondes, à adapter en fonction de la durée de passage du nuage.

4.7.5 Mise œuvre sur site

La méthode de mesure par injection à débit constant reste complexe à mettre en œuvre, notamment du fait de la logistique associée au matériel d'injection. Le choix est donc fait de ne décrire que le mode opératoire de la méthode par injection instantanée (traceurs fluorescents et NaCl).
Les appareils de mesure mis en œuvre avec les traceurs fluorescents et le NaCl sont respectivement des fluorimètres et des sondes de conductivité. Comme tout appareil de mesure, ils doivent être manipulés avec précaution et faire l'objet de vérifications périodiques, notamment concernant la justesse de la mesure de la température.
Afin de réduire les incertitudes de mesure, les appareils doivent être ajustés sur site, avec l'eau de rivière, dans la gamme 0-50 µg/l pour les fluorimètres et 0-100 mg/l pour les sondes de conductivité, en mettant en œuvre un protocole par ajouts dosés.
Une fois l'ajustage du ou des appareils réalisé, ceux-ci sont disposés en différents points de la section par répétition de la mesure avec une sonde ou avec plusieurs sondes en simultané. La réalisation des deux mesures en rive gauche et rive droite de la section de mesure, doit se faire dans l'écoulement, en évitant les zones d'eau morte ou de remous trop importants. Le choix du point d'injection doit tenir compte de la longueur de bon mélange. Certaines formules empiriques permettent d'avoir une estimation de cette longueur. Cependant, il est préférable de la déterminer par approche expérimentale, en réalisant une injection de fluorescéine. L'examen visuel de la dispersion du colorant permet de déterminer s'il y a des zones d'eau morte, et constitue une première indication sur la distance minimale qui doit séparer les points d'injection et de prélèvement. Après avoir bien mélangé la solution pour éviter la stratification du produit, celle-ci peut être versée dans une veine d'eau rapide permettant un bon mélange, en évitant les zones de ralentissement et de contre-courant. Bien rincer le contenant afin d'être sûr d'injecter tout le produit. La quantité de traceur à injecter est déterminée en tenant compte de la concentration moyenne visée au point de prélèvement : 10 µg/l pour les traceurs fluorescents et 5 g/l/s pour le NaCl. Elle dépend donc du débit, du temps de passage du

FIGURE 4.13 : À GAUCHE : INJECTION INSTANTANÉE DU TRACEUR RHODAMINE WT ; À DROITE : ENREGISTREMENT DE LA CONCENTRATION AU COURS DES DIFFÉRENTES PHASES DE LA MESURE (AJUSTAGE DES FLUORIMÈTRES, MESURE DU BRUIT DE FOND ET PASSAGE DU NUAGE D'INJECTION), (EDF-DTG)





nuage et de la teneur naturel en traceur du cours d'eau.
Lors du dépouillement de la mesure, qui doit être réalisé sur site, s'assurer que les conditions suivantes sont vérifiées :

- l'écart entre les valeurs de débit issues de chacun des deux appareils doit être inférieur à 10 %. La valeur de débit retenue est alors la moyenne des deux mesures. Dans le cas contraire, la mesure est considérée comme non représentative. La raison la plus probable étant que la distance de bon mélange n'a pas été atteinte. La mesure doit alors être réitérée, en augmentant la distance entre l'injection et le prélèvement ;
- la fluorescence mesurée doit avoir une valeur maximale comprise entre 10 et 50 µg/l, ou bien la concentration en sel doit atteindre au moins 15 mg/l de plus que la concentration initiale de la rivière. Dans le cas contraire, réitérer la mesure en adaptant la quantité de produit injectée.

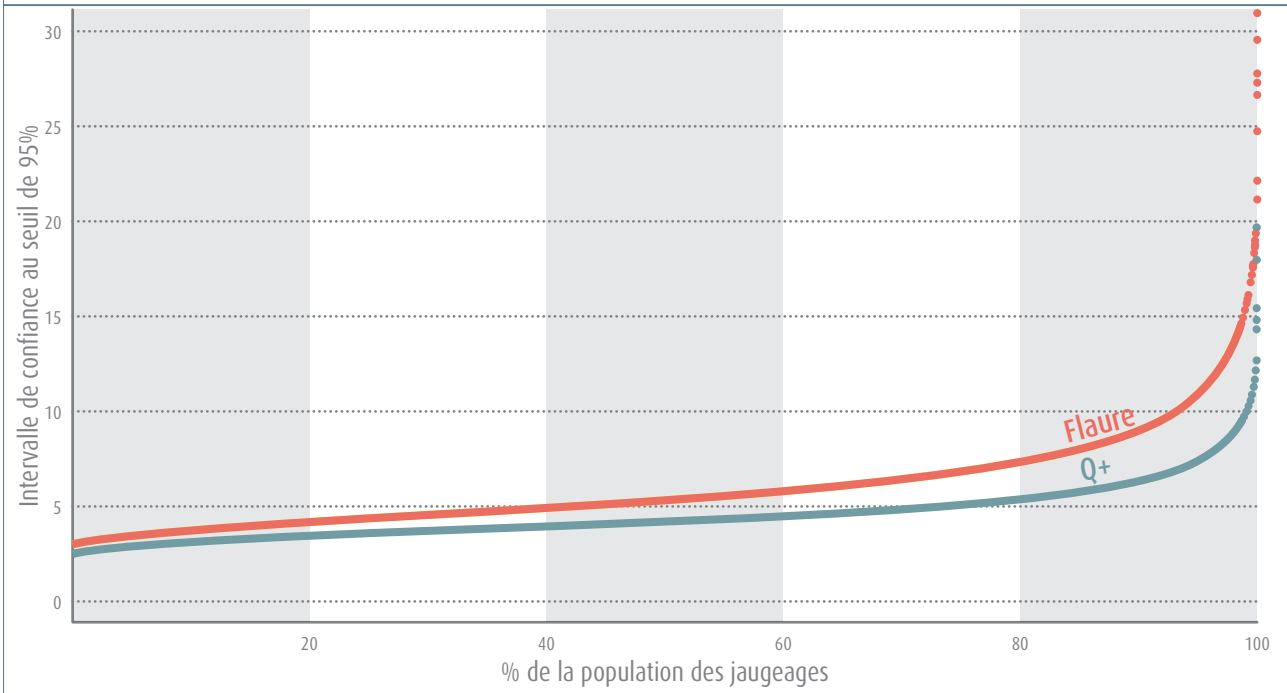
4.8. Incertitudes associées aux jaugeages

Un résultat de mesure doit s'exprimer avec une incertitude et un intervalle de confiance. L'évaluation de l'incertitude est précieuse à la fois pour le producteur des données hydrométriques (pour le tracé de la courbe de tarage par exemple, cf. chapitre 5) mais également pour l'utilisateur de la donnée pour qu'il puisse prendre des décisions en tenant compte de ces incertitudes (dimensionnement d'un ouvrage hydraulique, par exemple). Pour estimer cette incertitude, le jaugeur doit bien connaître le processus de mesure, être conscient des limites des conditions de déploiement du matériel et maîtriser les calculs qui vont lui permettre de fournir un résultat.
L'affichage des incertitudes constitue un point d'amélioration important pour les équipes d'hydrométrie et doit être une de leurs priorités. Si les bonnes pratiques décrites dans ce guide sont une base commune visant à réduire une partie des incertitudes[13], elles doivent s'accompagner d'un suivi rigoureux des équipements : maintenance des instruments, étalonnage par des laboratoires accrédités, contrôles internes ou inter-organismes réguliers lors d'intercomparaisons et traçabilité de la « vie » des instruments.
Pour chaque étape du processus de mesure, le jaugeur doit s'efforcer de limiter les erreurs systématiques (biais de mesure) pour que ne s'expriment que des erreurs aléatoires (incertitudes). La combinaison de ces incertitudes va permettre d'exprimer une incertitude sur le résultat final, « élargie » pour couvrir un intervalle à un niveau de confiance donné (généralement 95 %). Cette approche générale décrite par le guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM), est appelée approche par propagation d'incertitude, et son point de départ est le modèle (l'équation ou le calcul) qui permet de représenter le processus de mesure et l'ensemble des corrections apportées aux différentes erreurs.

4.8.1 Exploration quasi complète du champ des vitesses – Perche et saumon

Les méthodes proposées par la norme ISO 748, l'USGS (méthode IVE), Irstea (méthode Q+) et EDF (méthode FLAURE) sont autant de déclinaisons du GUM pour les jaugeages au courantomètre. La méthode ISO 748 n'était pas recommandée par la Charte Qualité de l'hydrométrie en 1998 car les auteurs considéraient, non sans raison, qu'elle donnait trop de poids aux nombres de verticales et pas suffisamment à la géométrie du chenal d'écoulement. Les méthodes Q+ et FLAURE se sont attachées à lever cet écueil tout en reprenant la formulation générale de l'ISO. Une comparaison effectuée sur plus de 3000 jaugeages est présentée figure 4.14.

FIGURE 4.14 : DISTRIBUTION DES INCERTITUDES POUR 3 185 JAUGEAGES AU MOULINET CALCULÉES SELON DEUX MÉTHODES Q+ ET FLAURE (DESPAX ET AL, 2016)



L'examen de la figure montre que l'assertion formulée par les auteurs de 1998 n'était pas dénuée de fondement puisqu'ils affirmaient que « 80 % des jaugeages sont réalisés à mieux que 6 % ».

13. Choix du site, de la section, de la technique de jaugeage, des points de mesure, etc.

L'autre approche d'estimation des incertitudes, de plus en plus courante en hydrométrie est l'approche expérimentale par essais inter-laboratoires (Norme ISO 5725), appelés également « intercomparaisons » (cf. Figure 4.15). Elle consiste à comparer les résultats de mesure obtenus par plusieurs équipes déployant des instruments de même type avec un protocole identique pour mesurer un même débit, supposé constant pendant les essais. Une analyse statistique des résultats permet d'obtenir une incertitude sur la méthode employée dans des conditions de répétabilité et de reproductibilité données. Le résultat d'incertitude obtenu peut être transposable aux mesures réalisées dans les mêmes conditions, selon des critères d'analogie à définir. Le guide pratique pour la réalisation d'intercomparaisons de mesures de débit en rivière (Bertrand et Besson, 2016) présente la démarche pour préparer, réaliser et analyser une campagne.

4.8.2 Exploration quasi complète du champ des vitesses – ADCP

La figure 4.16 permet de comprendre le principe de la méthode d'intercomparaisons qui estime l'incertitude des jaugeages pour un site donné.

POINT D'ATTENTION !

L'application de la méthode des intercomparaisons reste attachée à un site. Une méthode sur sa généralisation par analogie est en cours d'élaboration. Toutefois, pour un jaugeage avec un appareil ADCP et quand la mesure est effectuée dans de bonnes conditions d'écoulement, l'incertitude au seuil de confiance de 95 % peut être estimée entre 5 et 7 %. Si les conditions sont moins bonnes (turbulences notamment), cette incertitude peut être largement supérieure et dépasser les 10 %.

4.8.3 Exploration partielle du champ des vitesses

Vu les hypothèses réalisées sur la stabilité de la bathymétrie des profils et sur la distribution verticale des vitesses, l'incertitude des jaugeages par analyse d'images peut difficilement être inférieure à +/-15 % au seuil de confiance de 95 %.
Le débit final déterminé par la méthode du radar vélocimétrique de surface est entaché d'une forte incertitude, de l'ordre de 20 %. En effet l'hypothèse d'une bathymétrie stable et l'estimation du coefficient de vitesse induisent des incertitudes significatives sur les résultats de mesure. Cependant ce type de mesure en crue apporte une information très importante sur les hauts débits et par conséquent sur la qualité de l'extrapolation des courbes de tarage (cf. chapitre 5).
La technique des flotteurs reste celle qui produit un résultat dont l'incertitude est la plus forte. Elle est estimée à 30 % au minimum et peut atteindre 50 % dans les cas les plus défavorables.

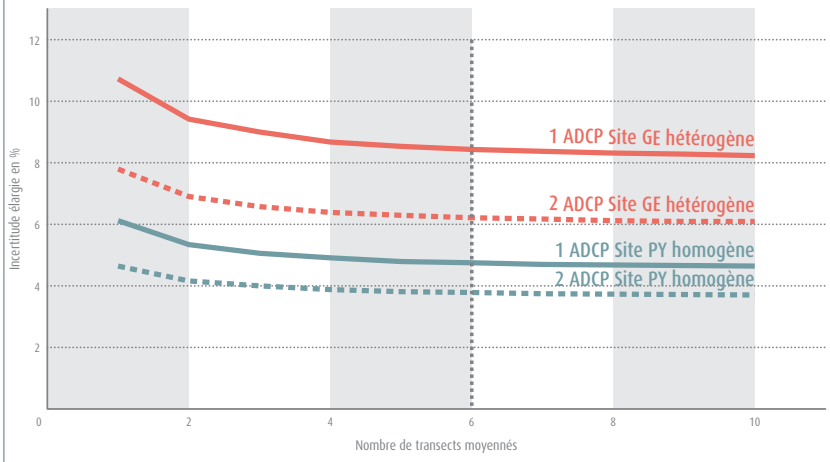
4.8.4 Dilution

Dans le cas de la méthode par injection globale, l'incertitude sur le débit est portée par les incertitudes sur la quantité de traceur injectée puis mesurée (concentration moyenne C'2 au point de prélèvement) et sur le temps T. L'incertitude sur la mesure de la concentration moyenne est dépendante du soin de l'opérateur pour réaliser la solution d'ajustage (dans le cas de la mesure avec les traceurs fluorescents) et de la linéarité de la réponse des appareils de mesure. Au seuil de confiance 95 %, l'incertitude finale de la mesure est de l'ordre de 6 % dans le meilleur des cas (Perret et al., 2012). Dans le cas de la méthode par injection à débit constant, une analyse effectuée sur 84 jaugeages a montré que l'incertitude au seuil de confiance de 95 % peut être comprise entre 4 et 5 % (Morlot, 2014).

⊞ FIGURE 4.15 : INTERCOMPARAISONS SUR L'OUVÈZE (IRSTEA)



FIGURE 4.16 : RÉSULTAT D'INTERCOMPARAISONS POUR 2 SITES DU RHÔNE (LE COZ ET AL, 2016)



Deux sites sont identifiés : GE et PY. Les deux sites sont différents du point de vue des conditions d'écoulement mais le même débit y transite. Au point GE, l'écoulement est hétérogène car situé très près du canal de fuite des turbines d'une usine hydroélectrique alors qu'au point PY, l'écoulement est homogène. Si le nombre d'instruments comparés et les traversées augmentent, les incertitudes sur la mesure sont réduites. Ainsi, pour le site GE, avec un seul appareil, l'incertitude estimée au seuil de 95 % pour 6 traversées vaut 8,5 % environ et un peu plus de 6 % avec 2 appareils. Pour le site PY et pour un nombre identique de 6 traversées moyennées, l'incertitude est ramenée à moins de 5 % avec un appareil utilisé et à 4 % environ avec 2 profileurs. Les incertitudes estimées pour le site PY sont plus faibles que pour GE dans des conditions identiques (nombre de capteurs et nombres de traversées). Ce sont les conditions perturbées de l'écoulement qui pénalisent les mesures sur le site GE. Ainsi, la méthode d'intercomparaisons permet d'exprimer des sources d'incertitudes d'origine hydraulique.

4.9. Récapitulatif des différentes techniques de jaugeage

Le tableau 4.2 synthétise des éléments chiffrés et qualitatifs sur les différentes techniques de jaugeages présentés dans ce chapitre. Il a pour objectif de préciser les conditions d'utilisation des différentes techniques de jaugeage en fonction des situations rencontrées sur le terrain et à choisir des matériels adaptés lors de l'acquisition ou du renouvellement des matériels. Les éléments chiffrés donnent des ordres de grandeur qui ne peuvent prendre en compte l'ensemble des cas particuliers rencontrés. Les matériels de jaugeage (composants, précision, gamme/conditions d'utilisation, coût) évoluant rapidement ces dernières années, il est essentiel de veiller à actualiser ces informations techniques auprès des constructeurs et de la communauté des hydromètres.

4.10. L'essentiel

• Pour l'exploration du champ des vitesses, le choix d'une bonne section de jaugeage est le préalable à une mesure de qualité. L'utilisation d'une technique de jaugeage, aussi élaborée et/ou performante soit-elle, sur une section inadaptée ne permet pas la réalisation d'une mesure satisfaisante.

• Les différentes méthodes de jaugeages décrites ne sont pas exclusives les unes des autres mais complémentaires. Le recours à telle ou telle technique doit se faire au regard des conditions hydrauliques et de l'environnement de la mesure. La maîtrise de plusieurs d'entre elles constitue donc la meilleure garantie pour réaliser de bonnes mesures dans des configurations variées.

• Parmi ces méthodes, l'adaptation aux mesures en rivière des ADCP, à la toute fin de XX^{e} siècle, a constitué un tournant majeur pour la pratique du jaugeage. Son usage s'est étendu en moins d'une vingtaine d'années à la quasi-totalité des équipes françaises. Au-delà des avantages que cette nouvelle famille d'appareils procure pour la mesure elle-même, elle a déjà contribué à améliorer les conditions d'intervention en crue en évitant l'intrusion de matériel dans la profondeur de l'écoulement et en réduisant fortement la durée du jaugeage.

• En période de crue, les conditions hydrauliques ne permettent pas toujours la mise à l'eau d'appareils. Compte-tenu de la rareté de ces événements, une mesure simplifiée par exploration du champ des vitesses de surface, facilitée grâce à des nouvelles technologies, représente toujours un meilleur résultat qu'une absence de mesure. Ce type de mesures non intrusives, constitue également une alternative de jaugeage préservant la sécurité des jaugeurs dans des conditions parfois dangereuses.

• La maîtrise de tous ces processus de mesure et de leurs incertitudes forme un axe de progrès qui reste encore largement à explorer, pour tenter de les réduire et pour qu'à chaque résultat de mesure soit associée une incertitude munie d'un intervalle de confiance. L'organisation régulière d'intercomparaisons regroupant différentes équipes de jaugeurs sur un même site contribue à cet objectif.

• À l'heure où les échanges et le partage d'expérience à distance sont facilités, la communauté des jaugeurs constitue une réelle richesse à valoriser dans un domaine technique jonglant en permanence entre les savoirs-faire traditionnels et de nouveaux outils technologiques. Le groupe Doppler Hydrométrie, actif depuis 2005, contribue à faire vivre cette communauté.

TABLEAU 4.2 : RÉCAPITULATIF DES DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE JAUGEAGE

		Moulinet	Courantomètre acoustique	Courantomètre électro-magnétique	Profileur acoustique (ADCP)	Radar de surface	Caméra (LSPIV)	Dilution
Mesurandes		Mesure ponctuelle de la composante de vitesse Vx	Mesure ponctuelle des composantes de vitesse Vx, Vy et Vz (cf. Figure 4.1)	Mesure ponctuelle de la composante de vitesse Vx (cf. Figure 4.1)	Mesure sur un profil vertical des composantes de vitesse Vx, Vy et Vz (cf. Figure 4.1)	Mesure ponctuelle de la composante de vitesse Vx en surface (cf. Figure 4.1)	Mesure spatialisée des composantes de vitesse Vx et Vy en surface (cf. Figure 4.1)	Fluorescence ou conductivité
Gamme d'utilisation	**Vitesse**	0,5 à 5 m/s (à condition de disposer d'un panel d'hélices étendu et de pouvoir monter les hélices sur un saumon)	0 - 2 m/s à 0 - 4 m/s selon matériel	0 - 2,5 m/s à 0 - 6 m/s selon matériel	0,05 à 5 m/s	1 à 10 m/s	1 à pas de limite supérieure	Toutes
	Hauteur	Toutes (à condition de pouvoir monter les hélices sur un saumon)	Restreint aux rivières et conditions jaugeables à pied (cf. Figure 8.1)		De 0,5 m à plusieurs dizaines de mètres selon modèles	Toutes	Toutes	Toutes
Autres conditions d'utilisation		Écoulements fluviaux	Écoulements fluviaux	Écoulements fluviaux	Écoulements fluviaux	Nécessité de vaguelettes, de turbulences, de débris en surface		Écoulements présentant suffisamment de turbulences pour assurer le bon mélange
Limites d'utilisation		Perturbé par végétation aquatique	Perturbé par les micro-bulles	Perturbé par la présence de masses métalliques à proximité	Perturbé par les micro-bulles	Perturbé par le vent (ride de surface) et la pluie forte	Pas de mesure de nuit ou en cas de fort brouillard	Absorption des traceurs fluorescents par les MES : mesure pas toujours possible en crue
		Impossibilité parfois de jauger par fortes vitesses même avec un saumon (rebond sur la surface)	Impossibilité de jauger des rivières importantes ou de jauger en crue		Perturbé par végétation aquatique	Mesures complémentaires nécessaires (bathmétrie, distribution verticale des vitesses)		
		Nécessité de disposer d'un panel élargi d'hélices			Compas perturbé par la présence de masses métalliques à proximité	Ne prend pas en compte l'éventuelle modification temporaire des fonds en crue.		La solubilité du sel rend difficile la mesure des débits important (> quelques m^3/s) même si certains constructeurs annoncent $50 m^3/s$.
		Stockage, transport, entretien exigeant des pièces mécaniques			L'eau doit présenter des matières en suspension (ne fonctionne pas en eau trop pure). Mais le signal peut être atténué par des eaux très chargées (mesures pas toujours possibles en crue)			
					Impossibilité de jauger les petites rivières en basses eaux			
					Sensible au fond mobile en crue (avec possibilité de correction)			

	Moulinet	Courantomètre acoustique	Courantomètre électro-magnétique	Profileur acoustique (ADCP)	Radar de surface	Caméra (LSPIV)	Dilution
Incertitude relative	7 à 15 %			5 à 10 %	15 à 20 %		3 à 10 %
	Dans des conditions bien adaptées : 5 à 10 %			*Dans des conditions bien adaptées : 5 %*			*Dans des conditions bien adaptées : 3 à 5 %*
Degré de technicité requis	Moyen	Moyen	Moyen	Fort	Fort	Fort	Fort
Sécurité	Lorsque la vitesse du courant est faible, inférieure à 0.5 m/s, la hauteur limite vaut 1 mètre environ. Lorsque la vitesse est forte, supérieure à 1.5 m/s, la hauteur limite est inférieure à 0.30 mètre (cf. Figure 8.1)			Depuis un pont en crue : risque d'interception de flottants moindre qu'au saumon + moulinet mais toujours existant	Risques très réduits en crue		Risques réduits en crue
	Déploiement par saumon nécessite de l'attention et de la prudence en crue (interception de flottants)			Risque lié à la navigation sur fleuves en crue si déploiement depuis un bateau	(méthodes non intrusives, pas d'intervention dans l'écoulement, ni à proximité immédiate)		(méthode non intrusive, pas d'intervention dans l'écoulement, seulement à proximité)
							Attention à la sécurité des zones d'injection et de prélèvement
Exemple de modèles (2016)	OTT	ADC (OTT)	MFPro, Nautilus (OTT)	StreamPro, RioGrande, River Ray, RiverPro (RDI)	SVR Pro II (Stalker)	Tous types de prises de vue (appareils photo, caméras)	GUN (Albilia)
	SEBA	Flowtracker (Sontek)	FloMate 2000 (Marsh Mc Birney)	S5, M9 (Sontek)	SVR (Decatur)		TQ-Tracer (Sommer)
			BFM801 (Valeport)	Qliner (OTT)			Salinomadd et EasyFlow (Madd)
			SensaRC2 (Hoskin)	FlowQuest (LinkQuest)			
			EMC4 (Comectec)				
Ordre de grandeur prix HT (Valeur 2016)	2 000 € - 10 000 € selon le nombre et le type d'hélices et le type de support. Une traille téléphérique peut coûter beaucoup plus cher.	10 000 €	5 000 - 10 000 €	10 000 - 40 000 €	2 000 - 3 000 €	2 000 €	5 000 - 10 000 €

4.11. Références

• AFNOR (1994) - Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs. Norme NF ISO 9555 parties 1 à 4

• AFNOR (1994) - Exactitude (justesse et fidélité) des résultats et méthodes de mesure. Norme NF ISO 5725

• AFNOR (2009) - Hydrométrie - Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de débitmètres ou de flotteurs. Norme NF EN ISO 748

• Baumgarten (1847) Notice sur le moulinet de Woltmann, destiné à mesurer les vitesses de l'eau, sur son perfectionnement et les expériences faites avec cet instrument. Annales des ponts et chaussées (1847 volume 2 p. 326 - 374)

• Bertrand X., Besson D., Guide pratique. Intercomparaions de mesures de débits en rivière, Cerema, Schapi, 2016.

• Despax A., Perret C., Garçon R., Hauet A., Belleville A., Le Coz J., Favre AC. Considering sampling strategy and cross-section complexity for estimating the uncertainty of discharge measurements using the velocity-area method. [Revue] – Journal of hydrology 533 (2016) p 128-140.

• Despax A. (2016) Incertitude des mesures de débit des cours d'eau au courantomètre. Amélioration des méthodes analytiques et apports des essais interlaboratoires. [Thèse] – Grenoble : Laboratoire d'Etude des Transferts en Hydrologie et Environnement et EDF-DTG.

• Dramais G., Le Coz J., Le Boursicaud R., Hauet A., Lagouy M. - 2014. Jaugeage par radar mobile, protocole et résultats. Houille Blanche-Revue Internationale de l eau, vol. 3, p. 23-29.

• Hauet Alexandre [et al.] Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-ADCP) et analyse d'images (LSPIV) [Conférence] // SHF Mesures hydrologiques et incertitudes. - Paris : [s.n.], 2008.

• Hauet A., Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-scale particle image velocimetry [Revue] // La Houille Blanche. - [s.l.] : SHF, 2009. - 1. - DOI 10.1051/lhb:2008085.

• Hauet A., Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry [Livre] - Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble, 2006.

• ISO/CEI GUIDE 98-3 : 2008 – Incertitude de mesure – Partie 3 : Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM : 1995).

• ISO/TR (1993) – Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Longueur de bon mélange d'un traceur – Rapport Technique ISO/TR 11656.

• Le Coz, J., Pierrefeu, G., Saysset, G., Brochot, J.-F, Marchand, P. (2008) Mesures hydrologiques par profileur Doppler. Éditions QUAE.

• Le Coz J., Camenen, B., Dramais G., Ribot-Bruno J., Ferry, M., Rosique J.-L. (2011) Contrôle des débits réglementaires. Application de l'article L.214-18 du Code de l'environnement. Guide technique Police de l'eau Onema.

• Le Coz J. , Blanquart B., Pobanz K., Dramais G., Pierrefeu G., Hauet A., Despax A., (2016) Estimating the uncertainty of streamgauging techniques using in situ collaborative interlaboratory experiments, Journal of Hydraulic Engineering, 142(7), 04016011, DOI:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001109.

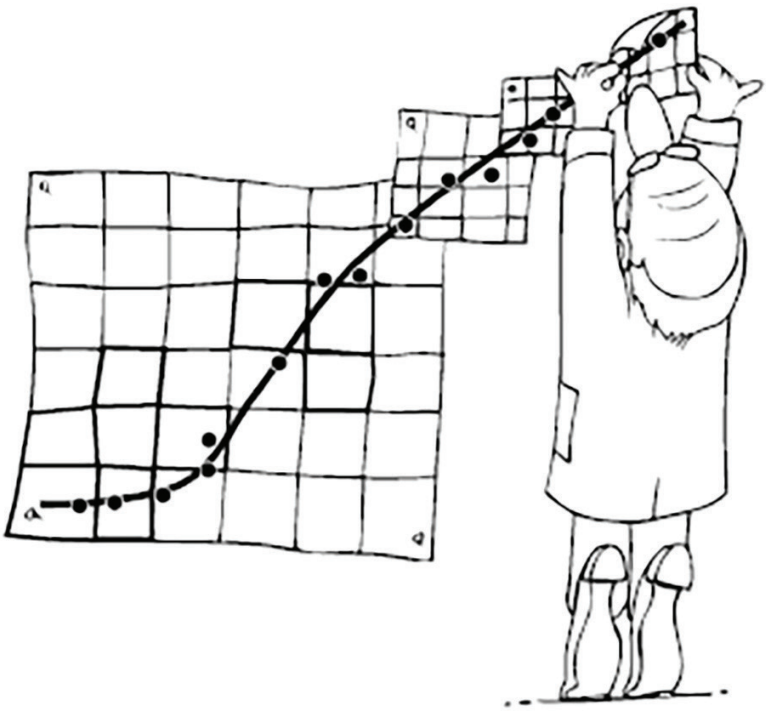
• Morlot T. (2014) La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes asscociées [Thèse] – Grenoble: Institut National Polytechnique de Grenoble.

• Perret C., Hauet A., Parrel D., Saysset G., Vignon P., Schnegg P. - 2012. Le réseau d'observation hydroclimatologique de montagne d'EDF. État des lieux. Mesures de débit par dilution d'un traceur fluorescent. Houille Blanche-Revue Internationale de l'eau, n° 3, p.18-25.

• Rateau M., Expérience et théorie sur le tube de Pitot et sur le moulinet de Woltmann (Hydromètres et anémomètres) Annales des mines (1898 série 9 volume 13 p. 331).

• Welber M., Le Coz J., Laronne J., Zolezzi G., Zamler D., Dramais G., Hauet A., Salvaro M., Field assessment of non-contact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR), Water Resources Research (2015, in revision).

Courbe de tarage



— chapitre 5

Dans le processus d'élaboration de données de débit qui va de la mesure des hauteurs d'eau à l'archivage des données de débit, l'étape qui consiste à construire et à gérer la courbe de tarage est sans conteste celle où l'interprétation humaine est maximale. Elle est donc à l'origine d'incertitudes difficiles à évaluer pesant fortement sur la qualité du débit annoncé car il ne s'agit plus d'une « simple » mesure, mais de l'élaboration d'un modèle et de son calage avec des observations (jaugeages, observations du terrain). Cette étape, au cœur du travail de l'hydromètre, est celle où il peut exprimer tout son savoir-faire et toute son expérience. Il doit donc y consacrer le temps nécessaire pour une élaboration réfléchie. Construite à partir des couples hauteur-débit (résultats des jaugeages) et de la connaissance du comportement hydraulique de la rivière au point de mesure, la courbe de tarage est la traduction graphique et mathématique de la relation physique entre hauteur d'eau et débit, pour un site donné. Si le tracé dans la gamme courante est parfois complexe à réaliser, c'est surtout aux extrémités de la courbe que les plus fortes incertitudes demeurent, car les jaugeages y sont plus rares, voire inexistants.

La relation physique entre hauteur et débit est variable dans l'espace (cf. chapitre 2) et dans le temps, ce qui implique que la courbe de tarage doit être reconsidérée régulièrement.

La courbe de tarage est le principal élément qui détermine la qualité d'une station. Une « bonne » courbe de tarage est une courbe :

- bien échantillonnée (jaugeages bien répartis et suffisants en nombre), sur une gamme adaptée à l'évolution du site et à la variabilité des débits ;
- précise, présentant une faible dispersion des jaugeages autour de la courbe de tarage ;
- univoque, associant un débit unique à chaque hauteur considérée ;
- sensible, une petite variation de débit (en pourcentage) entraîne une variation notable de la hauteur mesurée par rapport aux incertitudes de mesure du limnigramme (cf. § 2.3) ;
- documentée et justifiée avec des arguments physiques et métrologiques, qui permettent la critique et les révisions ultérieures particulièrement pour les extrapolations des débits extrêmes.

La gestion des courbes de tarage comporte trois phases essentielles :

- l'acquisition de données physiques de terrain (topographie, conditions d'écoulement, jaugeages) ;
- la construction de la courbe ;
- le suivi des courbes successives (évolutions, modifications, corrections).

À chacune de ces phases, des erreurs grossières peuvent se glisser. La cohérence globale, à la fois sur les débits, les vitesses moyennes et les sections mouillées, doit être vérifiée. Toute modification (dans le temps ou dans la relation elle-même) doit être justifiée par une cause connue, identifiable sur le terrain, et repérée dans le temps de façon suffisamment précise.

Une courbe de tarage caractérise un site donné, et n'est pas transposable dans l'espace. Elle est valable pendant une période donnée, fixée par des limites connues dans le temps.

5.1. Acquisition des données physiques

Il s'agit des jaugeages et des données topographiques. Les modalités de jaugeage ont été décrites au chapitre 4. Seules quelques précisions pratiques sont fournies ci-après.

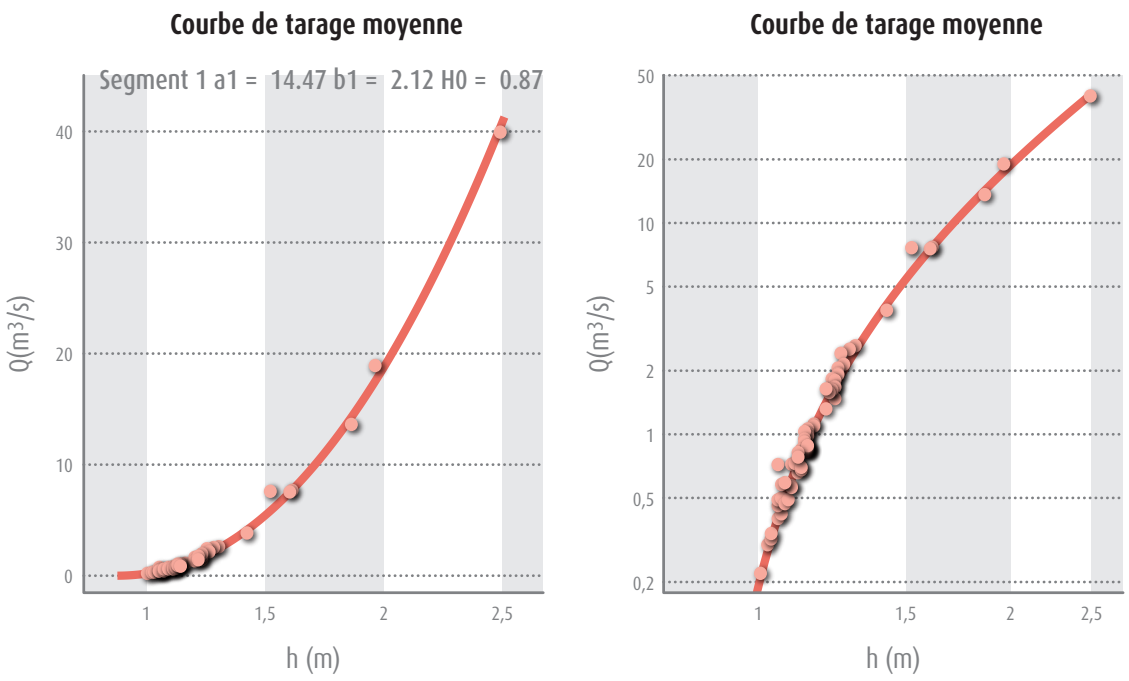
La fréquence des jaugeages doit permettre de cerner au plus près la relation hauteur-débit et son évolution, d'avoir à disposition un nombre de jaugeages représentatif de la plus grande gamme de hauteurs possibles ainsi que des transitions entre les segments de la courbe (liés au passage d'un type de contrôle hydraulique à l'autre) et éventuellement d'autres phénomènes plus transitoires comme l'hystérésis, l'influence aval variable ou la dynamique végétale par exemple. Dans ces conditions, il est difficile de donner une règle universelle pour adapter le nombre de jaugeages annuels. Certaines stations qui bénéficient de très bonnes conditions, telles qu'un seuil conçu pour la mesure et de conditions amont et aval peu ou pas évolutives, ne nécessitent qu'un ou deux jaugeages de contrôle par an. À l'opposé, les stations implantées sur des contrôles hydrauliques très évolutifs doivent faire l'objet de plus de 10 jaugeages par an. Au-delà, la pertinence de la localisation de la station doit être questionnée. Pour un réseau de mesure dont les stations sont réparties sur différents terrains, un nombre moyen de 4 à 8 jaugeages par an et par station, judicieusement répartis dans le temps et sur la gamme des hauteurs, semble raisonnable.

Il est recommandé de vérifier sur le terrain, dès la fin du jaugeage, sa position par rapport à la courbe de tarage en cours et les événements susceptibles de la modifier, afin de décider d'une éventuelle confirmation immédiatement (nouvelle mesure). Un traitement approfondi est ensuite réalisé rapidement.

Toutes les remarques sur les conditions d'écoulement doivent également être consignées et associées au jaugeage, afin de faciliter le traitement approfondi ou le retraitement ultérieur. C'est particulièrement indispensable pour les jaugeages de crue, dont les conditions pourraient ne pas se représenter par la suite. Des photos de la station et du linéaire amont et aval peuvent être utiles.

Les méthodes et logiciels de construction et de gestion des courbes de tarage actuels permettent l'utilisation plus aisée d'éléments théoriques hydrauliques pour l'établissement de la courbe de tarage mais nécessitent une connaissance approfondie de la station et de ses alentours. Une reconnaissance visuelle des contrôles hydrauliques pour différentes hauteurs peut suffire. En cas de doute ou de recours à la modélisation hydraulique (cf. § 5.2.3), le recours à des mesures topographiques[14] peut être nécessaire. Dans le cas des contrôles hydrauliques par seuil, les relevés topographiques permettent d'accéder à la connaissance du h0 (cf. chapitre 2, équation 2.3). Il est important que ces éléments soient récoltés, consignés dans le dossier station (cf. § 3.3.2) et vérifiés régulièrement.

FIGURE 5.1 : EXEMPLE D'UNE COURBE DE TARAGE- LA MORGE À VOIRON, 53 KM²



La figure 5.1 donne un exemple de courbe de tarage élaborée pour une station selon deux représentations : coordonnées naturelles et logarithmiques. La première permet de visualiser le modèle dans son ensemble sans déformation et la seconde permet de zoomer sur des points particuliers. Les coefficients du modèle hydraulique selon l'équation 2.5 sont également indiqués. Le contrôle hydraulique unique de cette station ne nécessite pas la mise en œuvre de l'équation 2.6.

14. Profils en long pour repérer les sections de contrôle successives, profil en travers des sections de contrôle, éventuellement via un géomètre externe

5.2. Construction de la courbe de tarage

Qu'il s'agisse de la première courbe d'une station nouvellement installée ou d'un changement de courbe sur une station ancienne, la méthode de construction de la courbe de tarage reste identique. Certaines étapes peuvent cependant être moins développées et approfondies lors du changement de courbe.
Pour une ouverture de station, il est utile de vérifier s'il n'existe pas de jaugeages anciens, antérieurs à la création de la station qui pourraient être réutilisés. Il faut alors rendre l'échantillon homogène, ou bien séparer les deux périodes si les raccordements ne sont pas réalisables (référence différente pour la mesure des hauteurs, méthode de calcul différente, autre site de mesure). Une nouvelle courbe se construit au fur et à mesure des nouveaux jaugeages effectués, notamment pour les débits extrêmes où des techniques d'extrapolation sont utilisées.
Pour un changement de courbe de tarage, les questions qui doivent être posées sont :
- quelle est la date de changement de la relation hauteur-débit ?
- quelle gamme de débit le changement concerne-t-il ?

La construction de la courbe repose sur la connaissance des jaugeages et du comportement hydraulique local de la rivière (contrôles). Dans la méthode historique, encore la plus répandue, la courbe est construite à partir des jaugeages, et les contrôles hydrauliques sont utilisés comme vérification (c'est la méthode décrite ci-après). Les approches BaRatin (Le Coz et al., 2013) et GesDyn (Perret et al., 2013) reposent sur l'étude du (ou des) contrôle(s) hydraulique(s) qui permet d'induire la forme du modèle de courbe de tarage, les jaugeages permettant quant à eux de caler les coefficients du modèle.

Les débits « temps réels » pour la prévision des crues ou le suivi des étiages sont de plus en plus demandés. La méthode historique demande du temps, et n'est pas très adaptée à la construction ou mise à jour en temps réel d'une courbe de tarage. Dans ce cas, une courbe temporaire présentant des incertitudes plus importantes peut être proposée. Elle est construite à partir du dernier jaugeage et fiabilisée ensuite par une analyse approfondie. La communication des incertitudes liées à cette courbe temporaire est encouragée.

5.2.1 Analyse des jaugeages

L'analyse des jaugeages doit porter sur un inventaire exhaustif des données disponibles et sur une critique des données elles-mêmes.
En premier lieu, et si cela n'a pas déjà été fait, il faut s'assurer de disposer de tous les jaugeages et observations disponibles au droit du site à tarer. L'existence d'une fiche « historique de la station » facilite le travail.
Une liste des mesures est alors dressée. Elle doit contenir :
- les dates et heures de début et de fin de chaque mesure ;
- les hauteurs d'eau lues à l'échelle au début et à la fin de chaque mesure ;
- la hauteur enregistrée sur le limnigramme correspondant à la date et à l'heure mentionnées pour la mesure ;
- le résultat de la mesure de débit ;
- les éléments géométriques de la mesure (section mouillée, largeur, profondeur moyenne, etc.) si la méthode d'exploration du champ des vitesses a été utilisée ;
- le mode opératoire et le matériel utilisé, ainsi que l'emplacement précis de la mesure par rapport à la station (ne pas mentionner « section habituelle ») ;
- les observations qualitatives diverses : mesure en montée ou en descente de crue, incidents durant la mesure elle-même, changement notable des conditions d'écoulement, etc. ;
- le nom des opérateurs ;
- éventuellement les vitesses moyennes calculées ;
- éventuellement le contrôle hydraulique actif (seuil, section, tronçon).

La validation des couples hauteur-débit débute par une analyse de la concordance des hauteurs (lues lors de la mesure et relevées sur le limnigramme) et la consultation des différents renseignements associés aux jaugeages. Elle permet notamment de déceler des erreurs de date, de station, ou plus simplement de transcription. Le choix de la (des) hauteur(s) retenue(s) pour le jaugeage est important : préférer la hauteur lue à l'échelle sauf cas particuliers (échelle illisible ou placée dans le ressaut). C'est cette série de valeurs (hauteurs échelle limnimétrique/débits) qui doit servir à la construction de la courbe.
De même, une analyse des variations géométriques, des modes opératoires et des observations qualitatives permet de déceler d'éventuelles anomalies : erreur de section, vitesses moyennes anormalement élevées ou faibles, etc.
La cohérence des valeurs doit être vérifiée : suite chronologique croissante, forts débits pour les fortes hauteurs, faibles débits pour les faibles hauteurs, similitude des conditions hydrauliques, etc. L'amplitude des valeurs mesurées (en hauteurs et débits) doit être connue.
Une visualisation de l'ensemble des jaugeages peut permettre d'identifier des jaugeages aberrants, à analyser plus finement via la fiche terrain ou l'interview des opérateurs. Si l'erreur ne peut pas être corrigée, le jaugeage doit être écarté ; ne pas oublier d'en laisser une trace en qualifiant le jaugeage de « douteux ».
L'analyse chronologique des couples hauteur-débit doit ensuite être menée, afin de détecter les anomalies ou particularités de l'échantillon à traiter. Les observations liées à chaque mesure doivent être prises en compte quand elles sont mentionnées. Sur une station ancienne, cette analyse peut permettre de détecter des périodes où la relation hauteur-débit est homogène voire de réutiliser une courbe ancienne, ou au contraire de conclure que les jaugeages anciens ne sont plus réutilisables, notamment les jaugeages réalisés en crue.
Cette analyse doit être complétée par la consultation du dossier station ou de tout autre document qui est susceptible de mentionner des événements modifiant profondément la relation hauteur-débit : construction d'ouvrage (barrage, pont) au niveau de la station ou en aval, modification du champ d'expansion des crues (digues, occupation du sol), déplacement de l'échelle limnimétrique, etc.
Il existe des outils informatiques qui effectuent des analyses statistiques basées sur des tests non paramétriques et qui aident à détecter des périodes où la relation hauteur-débit est stable et à prendre en compte l'évolution des conditions d'écoulement (cf. Figure 5.2).

5.2.2 Tracé de la courbe de tarage

Ce prétraitement étant fait, le tracé à proprement parler peut débuter. Il est souhaitable qu'il soit effectué par (ou avec) la personne qui connaît le mieux le site et son comportement hydraulique.
L'hydromètre cherche à tracer, dans un repère H-Q avec des axes arithmétiques (ou semi-logarithmique, ou log-log) une courbe qui passe « au mieux » par les jaugeages, en se concentrant sur certains tronçons de courbe (faibles débits par exemple).
Il est courant de considérer une incertitude de l'ordre de 5 % autour de la valeur des jaugeages, pouvant aller au-delà pour les débits extrêmes

TABLEAU 5.1 : EXEMPLE DE BARÈME DE TARAGE (POUR H = 14 CM, Q = 18,2 M³/S)

H (cm)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1,17	1,24	1,58	2,40	3,34	4,40	5,56	6,83	8,19	9,64
10	11,2	12,8	14,5	16,3	18,2	20,1	22,1	24,2	26,4	28,6
20	30,9	33,2	35,7	38,2	40,7	43,3	46,0	48,7	51,5	54,4
...										

(très faibles ou très forts). De même, sur les hauteurs, une marge d'incertitude est admise. D'où l'intérêt de reporter des traits verticaux et horizontaux représentant les incertitudes en débit et hauteur des jaugeages.
Même en cas de révision de la courbe de tarage, il est souhaitable de reporter l'ensemble des jaugeages, a minima ceux réalisés sur une période significative (vie d'une échelle) ou la période identifiée comme homogène à l'étape précédente. L'analyse chronologique permet de décider de la prise en compte de jaugeages anciens et de définir un intervalle de temps de validité grossière.
Le tracé d'une courbe de tarage avec des jaugeages issus de différentes techniques peut permettre de découvrir un biais sur une mesure ou une technique de mesure. Ce biais peut être dû à un appareil de mesure défectueux ou à une application mal maîtrisée d'une méthode de mesure.
Toute inflexion dans le tracé de la courbe de tarage doit pouvoir s'expliquer par une réalité physique connue sur la section de contrôle : débordement rive droite, rive gauche, seuil noyé, écoulement sous une arche supplémentaire. C'est là que les relevés topographiques, la connaissance fine du terrain et des conditions d'écoulement acquise lors des jaugeages prennent toute leur importance. Il est conseillé de tracer une courbe par tronçons (cf. équation 2.6), ce qui permet de faire le lien entre allure (pente) et conditions hydrauliques (cf. chapitre 2). Lorsqu'une courbe est définie ainsi, sa diffusion est facilitée par l'utilisation du « barème de tarage », qui présente sous forme de tableau le débit pour des hauteurs par pas de 1 cm (cf. Tableau 5.1).

Le bordereau des points, décrivant les points pivots, se présente alors sous la forme :

TABLEAU 5.2 : EXEMPLE DE BORDEREAU

H	Q	H0	a	b
19,9	0			
26,5	0,001	19,9	4721E-08	1,6179
53,5	0,997	26,0	3133E-06	1,7387
116,6	3,99	30,7	3792E-05	1,0455
201,4	18,1	33,2	2974E-07	2,1490

La superposition sur un même graphe des différentes courbes est pleine d'enseignements, en particulier pour définir les extrapolations. Sauf modification majeure du lit, les différentes courbes doivent présenter une allure générale semblable.
Il existe des outils informatiques d'aide au tracé des courbes de tarage. Ils permettent d'évaluer visuellement les écarts de la courbe aux jaugeages sélectionnés, de tenir compte des connaissances hydrauliques ou de terrain de la station (section d'écoulement, contrôles hydrauliques) et de donner des poids liés à la confiance et/ou à l'âge des jaugeages considérés. Le logiciel associé à la méthode BaRatin trace automatiquement une courbe de tarage à partir des jaugeages, de l'incertitude attribuée à chaque jaugeage par l'opérateur et de considérations sur le fonctionnement hydraulique du site (type de contrôle hydraulique par gamme de débit). Il mène à un tracé par tronçons de courbes, avec des coefficients hydrauliquement réalistes et permet d'en calculer les incertitudes par une approche bayésienne.
Certaines recherches s'orientent vers des méthodes dites « dynamiques » du tracé des courbes de tarage. Elles reposent sur le constat que la relation hauteur-débit est instable par nature. Cela va du très instable au pratiquement stable en fonction des caractéristiques de l'écoulement et des contrôles hydrauliques. Une hypothèse forte est alors formulée : chaque jaugeage représente la meilleure estimation de la relation hauteur-débit au moment où il a été réalisé, ce qui entraîne la construction d'une nouvelle courbe après chaque jaugeage. La méthode GesDyn tente ainsi d'appliquer un principe assez courant dans le monde de la mesure : réalisation d'un contrôle (le jaugeage) auquel est affecté une incertitude, comparaison au modèle proposé (la courbe de tarage en vigueur), réduction du biais constaté par recalage du modèle (nouvelle courbe de tarage) et estimation d'une nouvelle incertitude du modèle. Tous les jaugeages précédents sont également pris en compte, avec une pondération qui diminue avec leur ancienneté. La courbe est tracée à partir des jaugeages réalisés dans des conditions hydrauliques analogues.
Cette méthode est très utile pour fournir une courbe de tarage « temporaire » en temps quasi-réel suite à un nouveau jaugeage de crue aux utilisateurs pressés tels que les prévisionnistes de crue ou gestionnaires d'ouvrages. Elle peut également faciliter la gestion de changements progressifs ou dans le cas d'un réexamen complet d'une chronique, aider à la détection de changements brutaux que l'analyse chronologique n'aurait pas mis en lumière.

5.2.3 Extrapolations aux extrémités

La relation Q = f (H) doit être définie sur tout l'intervalle de variation possible des hauteurs, dans l'intervalle exploitable de la station. Cet intervalle doit au moins couvrir les plus hautes eaux observées pendant la période et, si possible, les plus hautes eaux historiques. Malheureusement, les hauteurs minimales et maximales jaugées sont souvent assez éloignées de ces bornes. La courbe de tarage doit alors être extrapolée à ses extrémités.
Les extrapolations doivent être traitées avec prudence en cas de phénomène singulier, comme la mise en charge d'un pont, de site à embâcles, car le changement de contrôle hydraulique induit n'est alors pas confronté à une mesure. En l'absence de changement de contrôle hydraulique identifié, un débit doit être considéré comme extrapolé si le débit calculé est 20 % supérieur (respectivement inférieur) au plus fort (faible) débit jaugé et/ou si la hauteur atteinte est 20 cm plus haute (respectivement basse) que la plus grande (petite) hauteur jaugée. Préciser alors que les parties extrapolées sont en dehors de la « zone de fiabilité » de la courbe de tarage, telle que définie dans la Banque Hydro.
Plusieurs méthodes d'extrapolation des forts débits existent, et le résultat est produit par l'application et la comparaison de plusieurs d'entre elles. Certaines méthodes sont basées sur des considérations hydrologiques pour reconstituer le débit d'un événement particulier : recoupements avec d'autres stations, comparaison du rapport entre débit maximal instantané et débit maximal journalier de crues anciennes ou avec des stations voisines et/ou analogues disposant de données anciennes, débits spécifiques. D'autres sont plutôt basées sur des considérations hydrauliques pour connaître directement l'allure de la courbe de tarage : relations entre vitesse moyenne et hauteur, entre vitesse moyenne et coefficient de frottement, courbes des débits unitaires superposés, cohérence de l'exposant hydraulique avec les conditions connues d'écoulement, notamment champ d'expansion, passage en charge sous un pont, etc. Elles supposent la connaissance de la géométrie de la section du (des) contrôle(s) hydraulique(s). L'extrapolation permise par l'application du logiciel BaRatin fait partie de la deuxième catégorie. Le Chapitre 7 décrit les différentes méthodes pour reconstituer des données hydrométriques après une crue et permettre ainsi une extrapolation des courbes de tarage pour les forts débits. La modélisation hydraulique (calcul des lignes d'eau en écoulement permanent par exemple) peut apporter une aide utile à l'évaluation des débits extrêmes ; elle nécessite une topographie adaptée et son emploi dépend des informations disponibles et des conditions du terrain (végétation). Elle peut donc être mise en œuvre en analysant son coût par rapport au besoin de connaissance.
Dans tous les cas, il est nécessaire de vérifier la cohérence des résultats, afin d'éviter des extrapolations amenant par exemple à des vitesses moyennes irréalistes (cf. Tableau 5.3) ou à des divergences entre plusieurs courbes pour les débits de crue. En effet, sauf cas très particuliers de recalibration complète du chenal d'écoulement, une convergence des courbes à haut débit doit être respectée.

⊞ TABLEAU 5.3 : VITESSES MAXIMALES ATTENDUES EN FONCTION DE LA PENTE

Type de rivière	Profondeur	Vitesse moyenne maximale
Plaine, pente faible	2 à 3 m	2 à 2,5 m/s
Plaine, pente moyenne	2 à 4 m	3 à 4 m/s
Montagne, pente forte		4 à 8 m/s

Sur des cours d'eau ayant des débits d'étiage très faibles, il peut être intéressant de chercher la hauteur pour laquelle le débit est nul, afin de conduire la courbe de tarage vers le bas.

5.2.4 Période de validité

Lorsque la construction de la courbe de tarage est terminée, il reste à déterminer la ou les périodes de validité. Une courbe de tarage n'est en effet valable que pour une période donnée : une courbe est valable depuis le 9 novembre 2010 à 9h30, mais rien ne prouve qu'elle sera encore valable demain.
La courbe de tarage reflétant les conditions d'écoulement, les changements de date sont rattachés à un événement particulier, tel que le changement d'échelle, des travaux sur la section de jaugeage, une crue ayant modifié le lit, un mouvement de vanne, etc. L'année civile n'est pas un découpage crédible pour déterminer la limite de validité des courbes de tarage.
Certains changements de conditions d'écoulement dans le temps sont brutaux tels que les mouvements du lit en crue, les travaux dans le lit, à l'amont, à l'aval ou au droit du site, et peuvent donc être précisément datés. D'autres sont plus progressifs, comme les variations induites par le transport sédimentaire, la pousse de végétaux, etc., il est donc plus difficile de leur affecter une date précise.
Si le changement de conditions hydrauliques est progressif et pérenne (érosion ou atterrissement, pousse de végétation pérenne), la vitesse d'évolution est prise en compte par le rythme de changement de courbe, en veillant à ce que les courbes successives ne donnent pas un écart de plus de 10 % de débit pour une même hauteur.
Si le changement des conditions hydrauliques est progressif mais temporaire, par exemple une influence due à la pousse de végétation (algues, macrophytes) dans le lit en été, une procédure de correction du fichier hauteurs-temps peut être utilisée, en veillant à bien archiver les hauteurs réellement mesurées et la correction appliquée.

POINT D'ATTENTION !

Pour vérifier le caractère temporaire de la correction hauteurs-temps appliquée, la courbe de tarage initiale doit être retrouvée lorsque l'influence a disparu.

Cette technique, comme celle qui consiste à établir une série de courbes intermédiaires, valables sur de courtes périodes, nécessite de multiplier les jaugeages de contrôle pour connaître précisément l'influence et son évolution, et donc la correction à appliquer. Les nouvelles méthodes de gestion dynamique devraient permettre de faciliter la gestion de ces cas difficiles sans toutefois s'affranchir de la nécessité de réaliser des jaugeages.
Pour affiner la date et l'heure du changement de courbe, il faut s'assurer que le passage d'une courbe de tarage à une autre ne laisse pas apparaître de discontinuité dans la chronique des débits concernée par cette évolution.
Le plus souvent, le changement de courbe est opéré en hautes eaux, à un moment où la hauteur est traduite par le même débit dans les deux courbes, et ce à n'importe quel moment de la crue respectant cette condition.

POINT D'ATTENTION !

Un changement de courbe a toujours lieu a posteriori, et la date de début de validité peut être de plusieurs années antérieure à la date de décision du changement.

5.3. Gestion des courbes de tarage

POINT D'ATTENTION !

Une fois la courbe établie, classée et cataloguée, il faut ensuite suivre son évolution, afin de vérifier sa validité dans le temps. Ce contrôle de la validité dans le temps et, le cas échéant, les précisions qui sont apportées au tracé, constituent la base du travail du gestionnaire de stations de jaugeage.

Les détarages peuvent être détectés ou suspectés par examen de l'hydrogramme (sauts, niveaux d'étiage), par analyse morphodynamique (occurrence de crues morphogènes, constat du transport solide) ou par connaissance des changements de conditions d'écoulement (travaux, dragages, curages, dynamique de la végétation). La réalisation d'un jaugeage peut confirmer cette évaluation a priori. L'examen de la population des jaugeages (nuage 0) sur une station est un excellent moyen d'évaluer la stabilité de la relation hauteur-débit.
Des mesures réparties au cours de l'année et pour toute la gamme de débits doivent permettre de suivre la vie de la courbe. Le jaugeur doit s'efforcer de réduire les extrapolations par des mesures de fort et faible débit.
Pour une station dont la relation hauteur-débit varie peu, une modification dans le temps ou dans la relation elle-même doit être justifiée par une cause connue, pour ne pas tracer une autre courbe, basée sur les jaugeages les plus récents, très peu différente de la courbe « mère ». Sauf si une méthode de tracé dynamique est appliquée, il n'est pas utile de multiplier le nombre de courbes pour « affiner » la relation avec un gain de précision illusoire.
Dans le cas où aucune cause connue ne peut expliquer un changement de courbe, un décalage systématique (toujours « au-dessus » ou « au-dessous ») entre jaugeages et courbe de tarage doit conduire à l'élaboration d'une nouvelle courbe. En première approche, cet écart doit correspondre à une hauteur de 2 à 3 cm au moins et/ou 10 % en débit, mais il faut tenir compte de la variabilité de la station et des incertitudes associées aux jaugeages dans la gamme de débit où l'écart est observé.
De même, quand le jaugeage le plus récent s'écarte du barème en vigueur, la réalisation de nouvelles mesures dans un délai rapproché est conseillée afin de statuer sur la réalité de l'écart et, le cas échéant, de permettre rapidement la construction d'une nouvelle courbe.
Les jaugeages de contrôle ont aussi pour objet de préciser la courbe en explorant des intervalles de hauteur peu ou pas jaugés. La portion haute doit notamment être vérifiée par des mesures, afin de conforter des segments de courbes basés par exemple sur un ou deux jaugeages datant de plus de 20 ans, sur une valeur isolée ou une extrapolation.
Un jaugeage « record » en hautes eaux peut permettre de reconsidérer une partie de courbes précédentes, qu'il faut alors préciser.

POINT D'ATTENTION !

Une courbe ancienne n'est jamais définitive et la date de mise à jour est aussi importante que la période de validité. En cas de changement de courbe, des débits déjà publiés peuvent être modifiés. Pour une bonne traçabilité, la courbe retouchée doit être archivée ainsi que la chronique des débits antérieurs, sous forme de débits moyens journaliers et de débits instantanés maximaux mensuels. La communication vers les utilisateurs des données de débits doit insister sur l'association systématique d'une chronique de débit ou de résultats statistiques à leur date de calcul.

Comme pour les jaugeages, les courbes de tarage sont stockées sous forme papier et/ou de fichiers informatisés. Le logiciel de stockage doit permettre des tris et des analyses multicritères, ainsi que des restitutions graphiques et numériques de qualité.

5.4. Incertitudes des courbes de tarage

L'incertitude de la courbe de tarage dépend d'abord de la qualité du contrôle hydraulique, notamment la stabilité des conditions d'écoulement et la sensibilité de la relation hauteur-débit (ou variabilité intrinsèque de la station). Elle dépend ensuite de la quantité de jaugeages, de leur répartition dans les différentes gammes de débit et de leur incertitude associée.

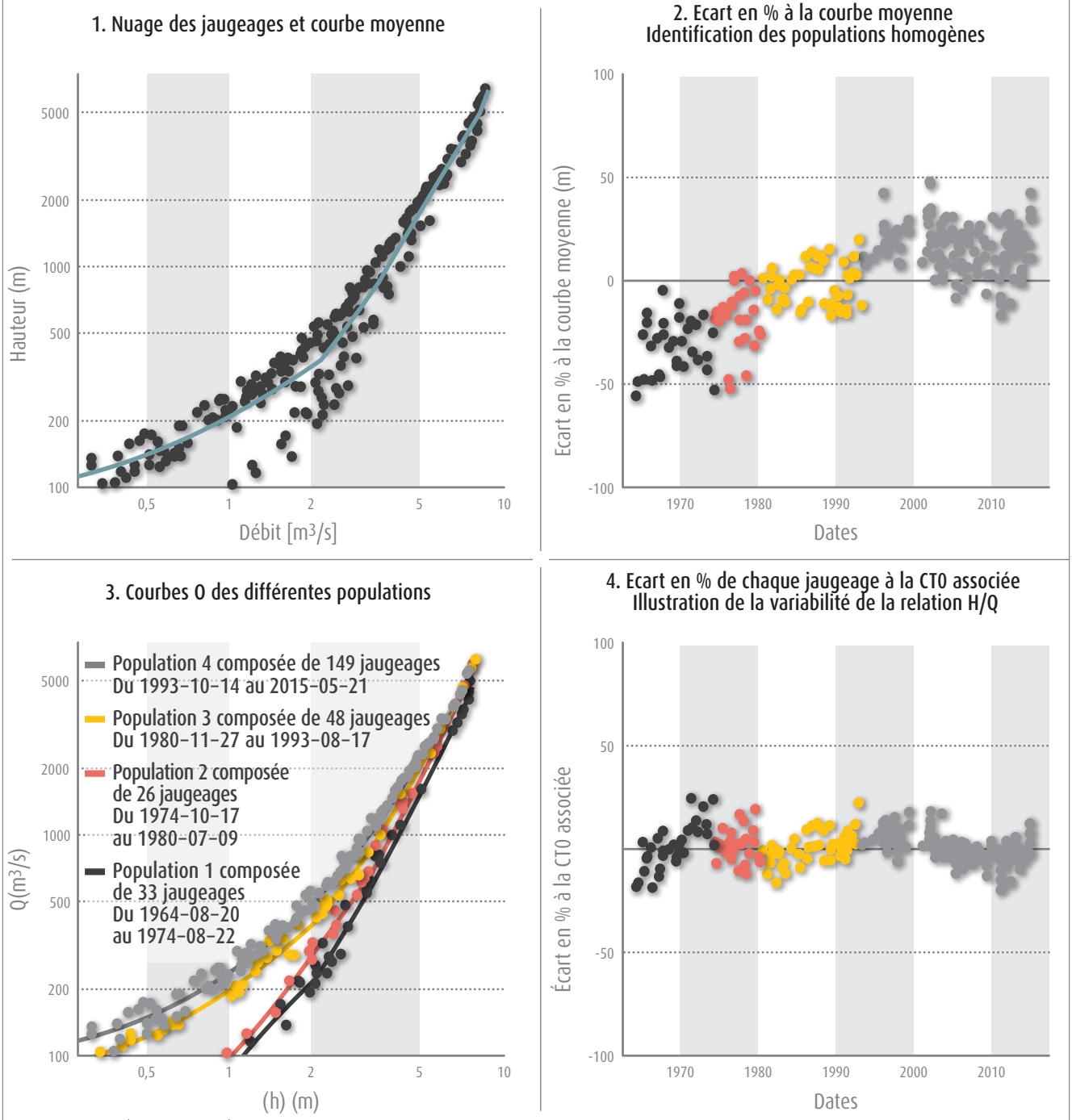
L'incertitude associée à la courbe de tarage dépend des facteurs suivants :
- l'incertitude de chaque jaugeage (souvent plus importante aux très faibles ou très forts débits) ;
- l'incertitude liée au nombre de jaugeages dans une gamme de débit : de nombreux jaugeages incertains peuvent permettre de déterminer une courbe fiable (grâce également aux considérations hydrauliques), tandis que peu de jaugeages fiables amènent à une courbe incertaine ;
- les choix du constructeur de la courbe basés sur des hypothèses, notamment aux parties extrapolées ;
- la variabilité de la relation hauteur-débit liée à la morphologie du cours d'eau : transport sédimentaire, charriage, développement d'herbiers, etc. ;
- la sensibilité du contrôle hydraulique.

La figure 5.3 illustre la complexité du tracé lié à la configuration hydraulique et montre les sources d'incertitudes.

Les applications GesDyn et BaRatin permettent de traduire numériquement cette description des incertitudes (cf. § 6.6 et annexe 1). La figure 5.4 illustre graphiquement le résultat des deux méthodes.

Enfin, comme la courbe de tarage est déterminée en régime permanent (débit et géométrie de la section constants dans le temps), elle ne devrait pas en théorie être appliquée au cours d'une crue. Deux phénomènes s'ajoutent en outre à l'incertitude des calculs de débit en crue via la courbe de tarage :
- l'hystérésis de la relation hauteur-débit (ou « courbe en raquette ») qui peut être observée lors de la propagation d'une crue : en un point donné de la rivière, le maximum de débit se produit avant le maximum de hauteur ;
- les phénomènes d'érosion/dépôt qui peuvent modifier de manière très importante la section d'écoulement lors de la crue.

⊞ FIGURE 5.2 : COMPORTEMENT DE LA RELATION HAUTEUR-DÉBIT DE LA LOIRE À MONTJEAN, 109 930 KM²



Vignette 1 : tous les jaugeages depuis 1964 ;
Vignette 2 : dispersion des jaugeages à une courbe moyenne après analyse automatique de l'homogénéité par période des jaugeages ;
Vignette 3 : construction des 4 courbes par période ;
Vignette 4 : dispersion des jaugeages aux 4 courbes par période.
La figure 5.2 illustre la variabilité intrinsèque de la relation hauteur-débit d'une station. Elle est construite à partir des données de jaugeages réalisés au droit de la station hydrométrique de la Loire à Montjean (49). La relation évolue de 1960 à 1993 en même temps que le creusement continu du lit, dû aux extractions de matériaux effectués dans le lit de la Loire et à l'obturation de bras latéraux en aval. Depuis l'arrêt des extractions, une stabilité est observée en moyenne, mais il subsiste une variabilité due au transport sédimentaire. La figure illustre également le travail d'identification, automatique ou non, de périodes où la relation hauteur-débit est assez stationnaire.

FIGURE 5.3 : COURBE DE TARAGE DE LA VIE À LA CHAPELLE PALLUAU, 118 KM² (DREAL PAYS DE LA LOIRE)

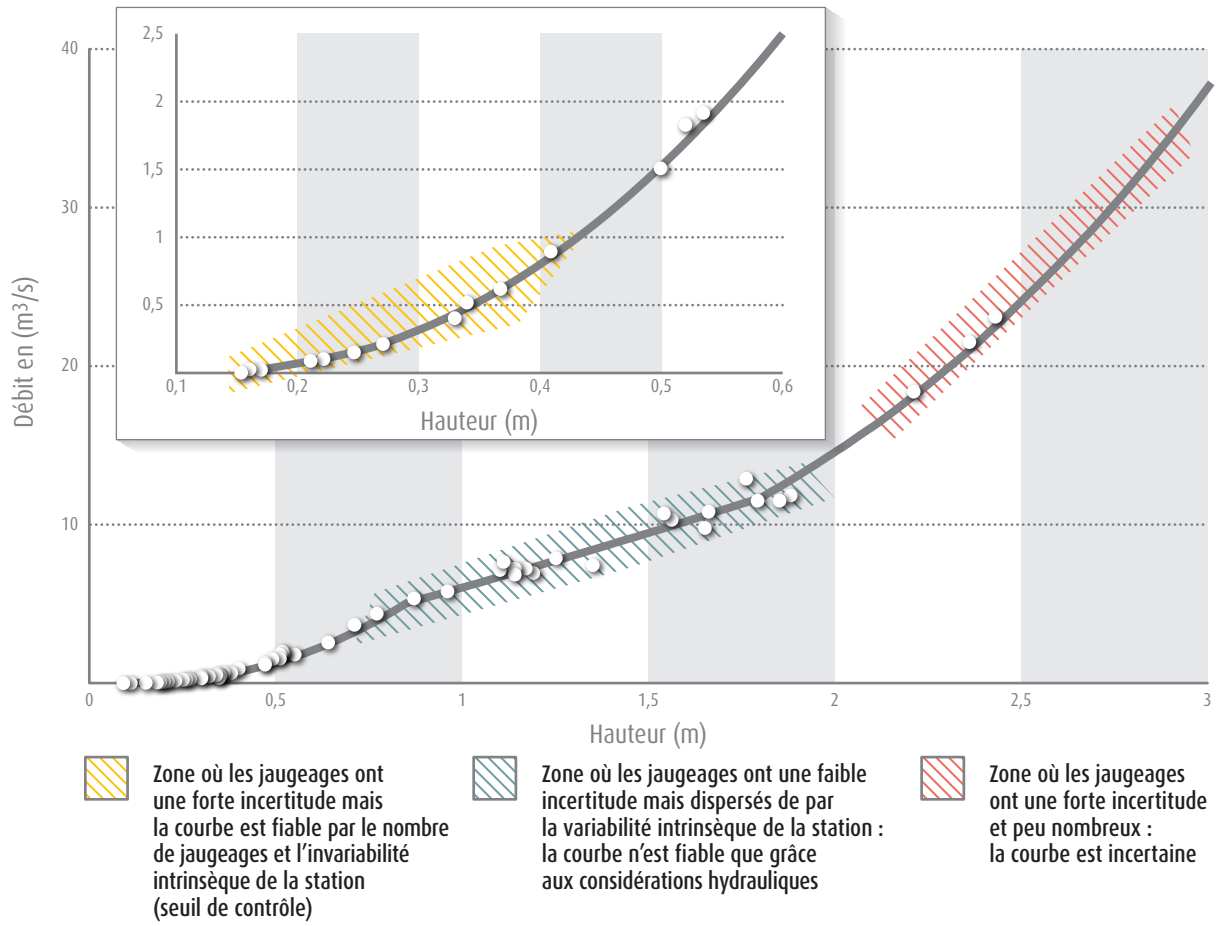
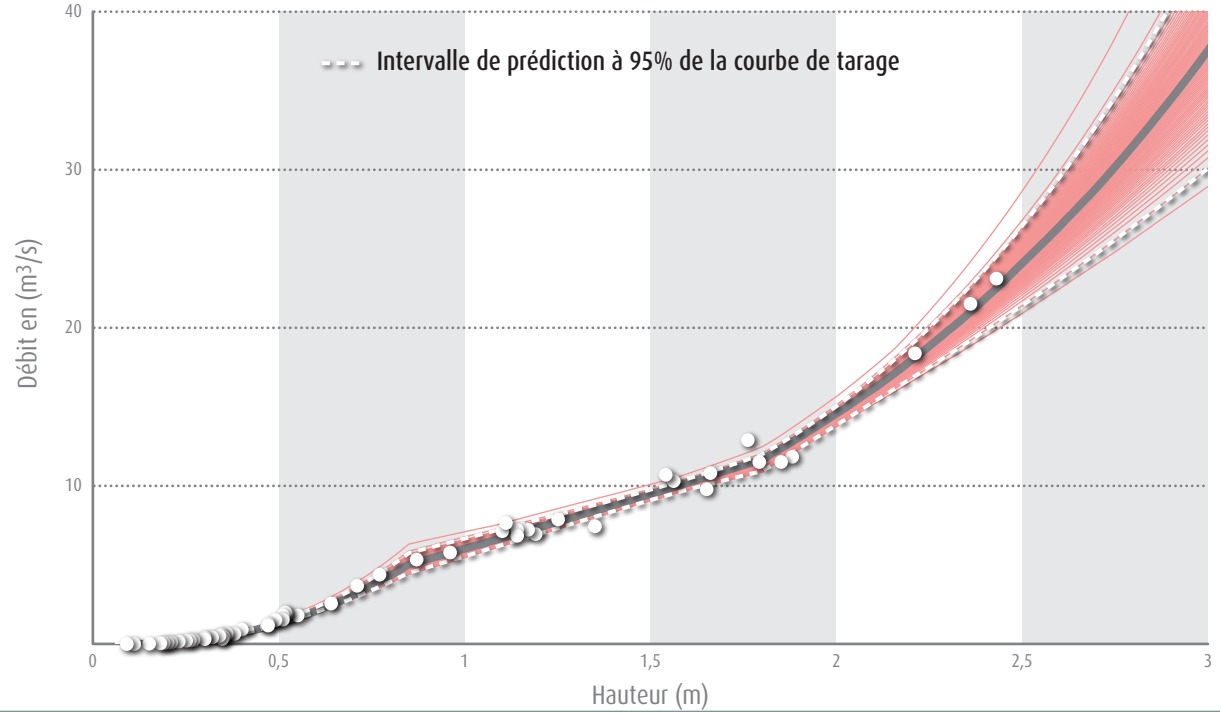


FIGURE 5.4 : COURBE DE TARAGE DE LA VIE À LA CHAPELLE PALLUAU AVEC INCERTITUDES ASSOCIEES (DREAL PAYS DE LA LOIRE)



5.5. L'essentiel

En matière de courbes de tarage, rien n'est jamais acquis. Jaccon (1987) concluait son Manuel d'hydrométrie consacré aux courbes de tarage en comparant la construction d'une courbe de tarage à une enquête policière. Il précisait que l'hydrologue trouve « toujours » la solution de l'énigme.

- Une courbe de tarage n'est jamais définitive. Elle peut être remise en question à tout moment. Toute courbe de tarage doit donc comporter une période de validité, une date de mise à jour et les bornes de la zone de fiabilité (ou bornes d'extrapolation).
- La mise au format et l'archivage des courbes de manière fiable et pérenne doivent être systématiques et inclus dans les logiciels de stockage/traitement des courbes de tarage.
- Les modifications éventuelles des courbes stockées doivent toujours être possibles, le fait de stocker les courbes ne doit pas les « figer » dans le temps.
- Les changements ou mises à jour de courbes doivent pouvoir être expliqués et ces explications archivées.
- Ce souci de suivi permanent, cette volonté de faire coller la courbe à la réalité de la vie de la station est un jeu qui nécessite patience, pugnacité et disponibilité.
- La construction d'une bonne courbe de tarage s'appuie sur des jaugeages en nombre suffisant, judicieusement répartis sur toute la gamme de variation de hauteurs et dans le temps et sur une importante expertise et étude des conditions hydrauliques (voire du fonctionnement hydrologique du bassin).
- Les approches méthodologiques sont en train d'évoluer et des outils permettront aussi une quantification des incertitudes des courbes de tarage.

5.6. Références

- Jaccon G.- Manuel d'hydrométrie Tome 5 – Tracé de la courbe de tarage et calcul des débits, IRD-ORSTOM, 1987

- Le Coz J., Chaléon C., Bonnifait L., Le Boursicaud R., Renard B., Branger F., Diribarne J., Valente M. - Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin - Jérôme. - La Houille Blanche, 6, 31-41, doi : 10.1051/lhb/2013048 - 2013

- Perret C., Morlot T., Favre AC. - La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes associées : un indicateur de qualité et de suivi – La Houille Blanche, 6, 24-30, doi : 10.1051/lhb/2013047 - 2013

- Poligot-Pitsch S., Geffray G. et Pichon N. - Contribution de l'hydrométrie au suivi de l'évolution du lit de la Loire aval - , La Houille Blanche, 5, 24-30, doi : 10.1051/lhb/2014046 - 2014

- Norme ISO 18320 « Hydrometry – Determination of the stage-discharge relationship » (en cours de validation)

- Roche PA., Miquel J., Gaume E. - Hydrologie quantitative Processus, modèles et aide à la décision Edition Springer 2012, désormais diffusé par les éditions Lavoisier.



Traitement des données

— chapitre 6

Les données de débits peuvent être utilisées à différentes fins : élaboration des PAPI et PPRI, construction d'ouvrages de génie civil, instruction d'autorisations « loi sur l'eau » ou « Installations Classées », élaboration de contrat de rivière, etc. Elles doivent répondre à de plus en plus d'usages en temps « quasi-réel », pour alimenter des modèles numériques afin de recréer des hydrogrammes de crues notamment. Il est donc primordial de pouvoir stocker et mettre à disposition des usagers des données de débit « qualifiées » qui prennent en compte toute la chaîne d'incertitude depuis la mesure du capteur jusqu'à l'établissement de l'hydrogramme.
Le traitement des données vise à obtenir :
• des données corrigées des erreurs de mesure et d'interprétation possibles tout au long de la chaîne de production ;
• des données simplifiées pour ne garder que l'information signifiante ;
• des données complètes afin de pouvoir calculer des statistiques fiables.
Pour cela, après leur collecte les données subissent plusieurs traitements et contrôles et leur statut évolue (cf. Tableau 6.1).

6.1. Traitement des données de hauteur et pré-validation des débits

Le premier contrôle intervient sur le terrain dans le cadre de la maintenance préventive décrite au paragraphe 3.3.1. Les contrôles de calage, les anomalies relevées et les solutions apportées doivent être notés sur un registre propre à la station qui sert ensuite aux traitements complets effectués au bureau. La bonne connaissance du site est essentielle à une pratique judicieuse du traitement des données. Qu'il soit graphique ou numérique, il est impératif de conserver sans limitation de temps l'enregistrement brut, sur un support fiable.

6.1.1 Contrôle visuel du limnigramme

Le contrôle visuel de la chronique de hauteur (limnigramme) est un moyen simple mais efficace pour déceler des anomalies grossières, des incohérences et des absences d'information. L'efficacité de ce contrôle peut être améliorée en confrontant les données de la chronique avec d'autres sources disponibles (deuxième capteur, pluviométrie, etc.). La présence d'un deuxième capteur sur une même station présente donc un grand intérêt. L'usage d'un zoom mal adapté peut avoir pour effet de masquer des anomalies ou au contraire, de révéler des anomalies qui n'en sont pas.

6.1.2 Correction des données de hauteur

Il est souvent possible de corriger les anomalies qui ont été détectées. La figure 6.1 présente trois cas parmi les plus courants :
• correction linéaire de la hauteur entre deux recalages du capteur ou suite au nettoyage d'embâcles sur le seuil ;
• suppression des valeurs isolées ou aléatoires aberrantes puis reconstitution par interpolation linéaire lorsque le défaut est de faible durée (quelques heures au plus) et sans épisode pluvieux ;
• élimination des plages de valeurs erronées enregistrées suite à un défaut du capteur (période de gel, dysfonctionnement, etc.).

⊞ TABLEAU 6.1 : LA CHAÎNE DE TRAITEMENT DES DONNÉES

Statut des données	Brute	Corrigée	Pré-validée	Validée
Type de données	Signal hauteur-temps enregistré sur le terrain	Hauteurs	Hauteurs et débits	Hauteurs et débits
Type de traitements (exemples)		Contrôle visuel pour supprimer les points aberrants	Filtrage, lissage, compactage, recalage dans le temps ou en hauteur (cf. § 6.1)	Contrôles et corrélations sur de longues périodes (cf. § 6.2)
Fréquence		Journalière ou hebdomadaire	Mensuelle	Annuelle ou pluri-annuelle

6.1.3 Filtrage, lissage et compactage

Le filtrage consiste à éliminer le bruit de fond lié à la précision de la mesure au regard du batillage du cours d'eau, ou de variations faibles (1 à quelques mm), aléatoires, non signifiantes, d'une fréquence de quelques secondes. Le filtrage peut être manuel ou automatique. La règle utilisée sur chaque site doit être formalisée, documentée et appliquée de façon constante.
Il est ensuite possible de procéder au lissage, c'est-à-dire à l'élimination des variations de hauteur faibles et de courtes durées (inférieure à la demi-heure), représentant un volume modeste, dont le volume en plus ou en moins s'équilibre. La fréquence source est donc plus longue et le phénomène physique peut être identifié (par exemple : clapet à niveau dit constant). Le lissage résulte d'une décision réfléchie. Il doit être réalisé sur des petites sections de courbes, de façon à ne pas supprimer d'informations significatives, en particulier lors d'une crue (modification du maximum de la crue). Il est donc à proscrire sur les pics de crues. Certains logiciels proposent un « lissage automatique » transformant automatiquement les données brutes en données moyennées, à partir d'un code de calcul de filtrage sur une gamme de variation de hauteur forte. Cette pratique peut conduire à la perte d'informations significatives notamment en crue et n'est donc pas recommandée.
Le compactage consiste à discrétiser la courbe du limnigramme en tronçons de droites. C'est l'équivalent du « cerisage » décrit au paragraphe 6.4. Le compactage permet de réduire significativement le nombre de points bancarisés.

6.1.4 Contrôle visuel final

Le report légèrement décalé du limnigramme brut et du limnigramme obtenu après traitement est indispensable et peut conduire à remettre en cause certaines simplifications. Que ce soit pour les fichiers graphiques ou numériques, l'hydromètre doit toujours s'assurer qu'il travaille bien sur les données de la station désirée ; l'échange de feuille ou de fichier étant toujours possible.

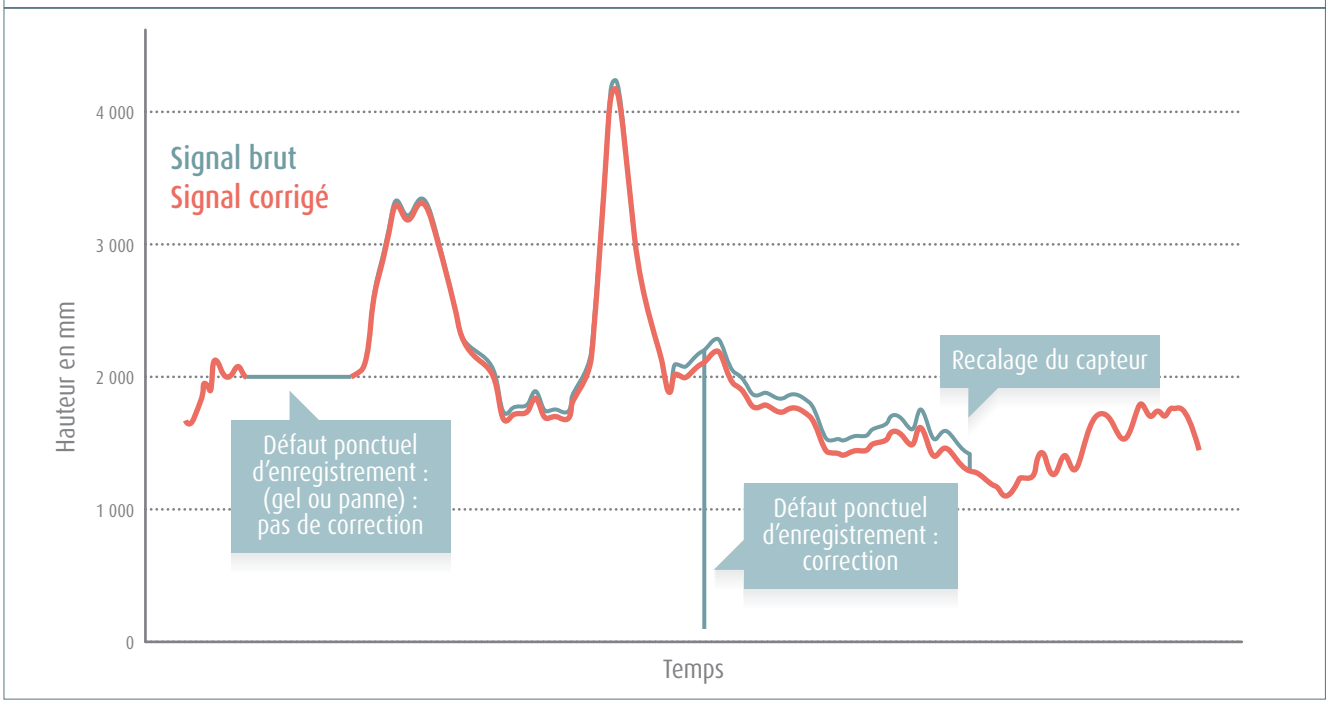
6.1.5 Contrôle des débits

Une fois ces premiers traitements effectués, des contrôles de cohérence et de vraisemblance sur les débits produits permettent de détecter des valeurs aberrantes et d'identifier les valeurs exceptionnelles, nécessitant une attention soutenue. Les événements (jaugeages, travaux sur la station, travaux dans la rivière) sont passés en revue et exploités pour conforter la chronique de débit produite.
Certaines des méthodes décrites dans le paragraphe 6.2 (comparaison entre stations, modèles simples, analyse des débits spécifiques) peuvent également permettre de détecter des anomalies, voire de les corriger, et de compléter une éventuelle lacune de faible durée. L'ensemble des traitements informatiques possibles aujourd'hui ne doivent pas se substituer aux contrôles par l'opérateur, mais favoriser son expertise.

6.2. Validation des données

La validation est faite au pas de temps annuel ou plus. Elle nécessite une prise de recul dans le temps et dans l'espace. Plusieurs méthodes

FIGURE 6.1 : CORRECTION DU LIMNIGRAMME



peuvent être employées : contrôle visuel, comparaison inter-station, corrélation linéaire, etc.

L'objectif de cette étape est de détecter des anomalies ou des erreurs qui auraient échappé à la première phase de validation :
• sur la mesure de hauteur : panne ou dérive capteur, influence de la végétation, modification du contrôle aval, etc. ;
• évolution ou anomalie de la courbe de tarage : nombre insuffisant de jaugeages, détarage non pris en compte, gamme de débits non jaugés entraînant des interpolations ou des extrapolations, date de changement de courbe de tarage mal choisie, tracé erroné, etc. ;
• non prise en compte des informations « terrain », oubli de déclaration des absences d'informations, incohérence des valeurs exceptionnelles, date et durée de l'étiage, dates et importance des crues.

6.2.1 Contrôle visuels

A ce stade, le contrôle visuel reste un excellent moyen de détection des anomalies. Le contrôle doit se faire à différentes échelles de temps (mois, trimestre, année), pour s'adapter aux types d'anomalies recherchées (par exemple : quelques semaines pour les erreurs de tarissement, quelques jours pour les erreurs de changement de courbe de tarage). La figure 6.2 compile quatre anomalies le plus souvent rencontrées : date de changement de courbe de tarage mal choisie, oubli d'envoi des données de hauteur dans la base de données de stockage (Banque Hydro par exemple), erreur d'unité ou de codage, défaut capteur.

6.2.2 Comparaison de stations

Le contrôle visuel ne permet pas de déceler toutes les anomalies d'un signal. L'analyse spatiale et temporelle de plusieurs stations se révèle un outil puissant. Elle consiste en un examen minutieux des graphiques superposés des chroniques de débits de plusieurs stations au comportement hydrologique comparable (amont-aval, affluent, rivière du bassin voisin, etc.).
La figure 6.3 met en évidence un écart entre les stations amont et aval après la crue qui incite à s'interroger sur les courbes de tarage des deux stations.

POINT D'ATTENTION !

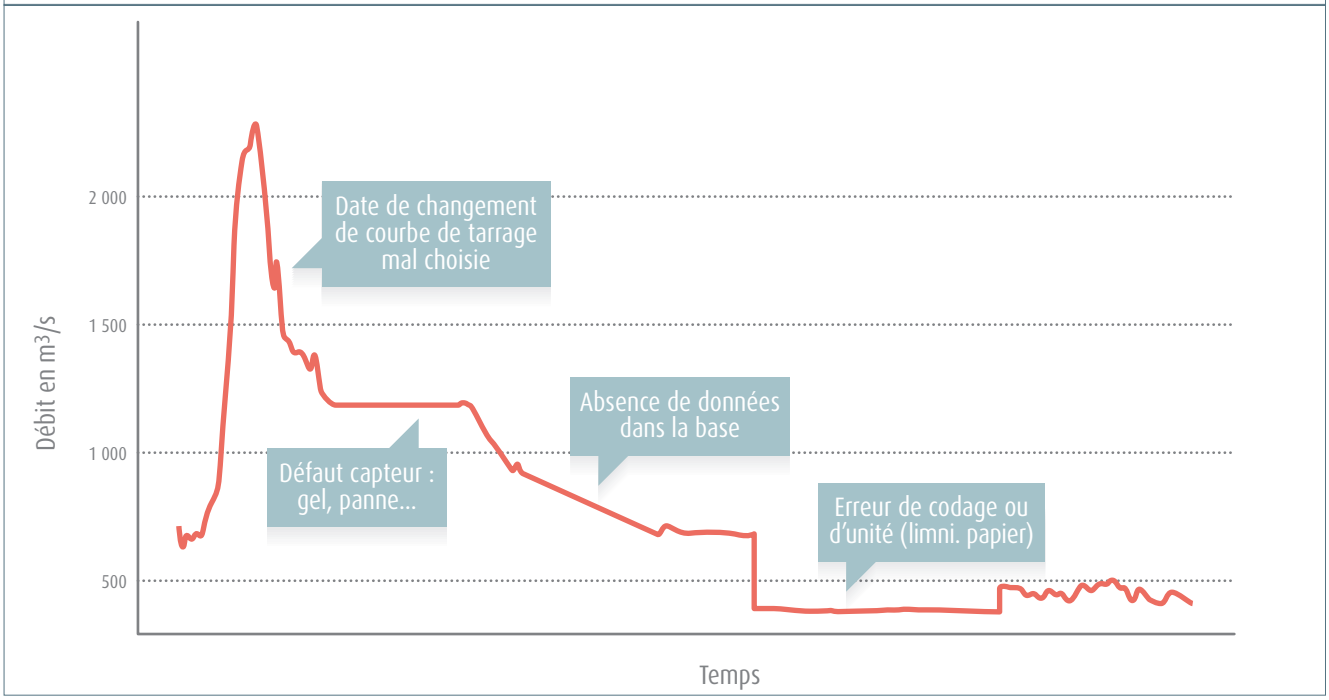
L'examen du temps de transfert entre les stations étudiées peut mettre en évidence une éventuelle dérive sur les enregistrements de hauteurs (panne capteur) ou une dérive sur les débits (courbe de tarage).

Les paramètres pluie et température peuvent être ajoutés sur le graphe de manière à vérifier la cohérence des variations de débit : augmentation du débit suite à des pluies ou à une hausse des températures sur un bassin enneigé, baisse du débit suite à une période de gel ou absence de précipitations.

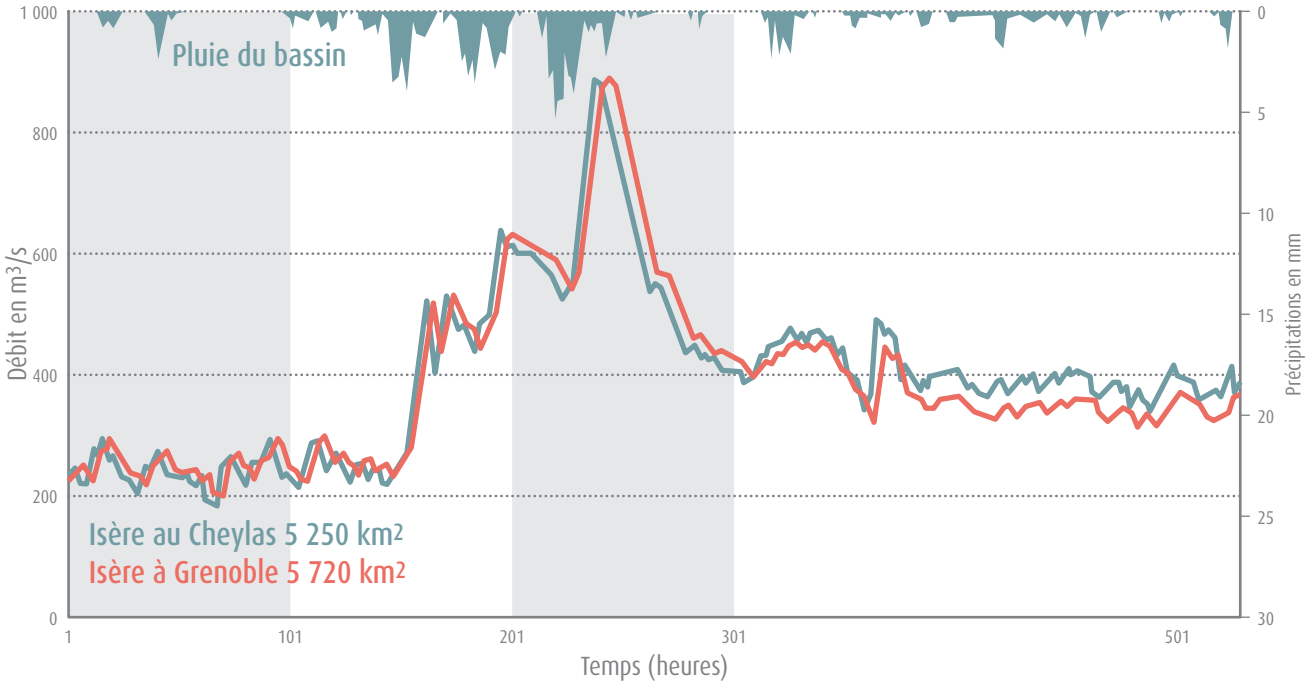
6.2.3 Utilisation de corrélations linéaires

Si la superposition simple ne suffit pas, la confrontation est également possible avec des hydrogrammes élaborés à partir de corrélations. Ainsi, les observations d'une station S1 peuvent être modélisées simplement

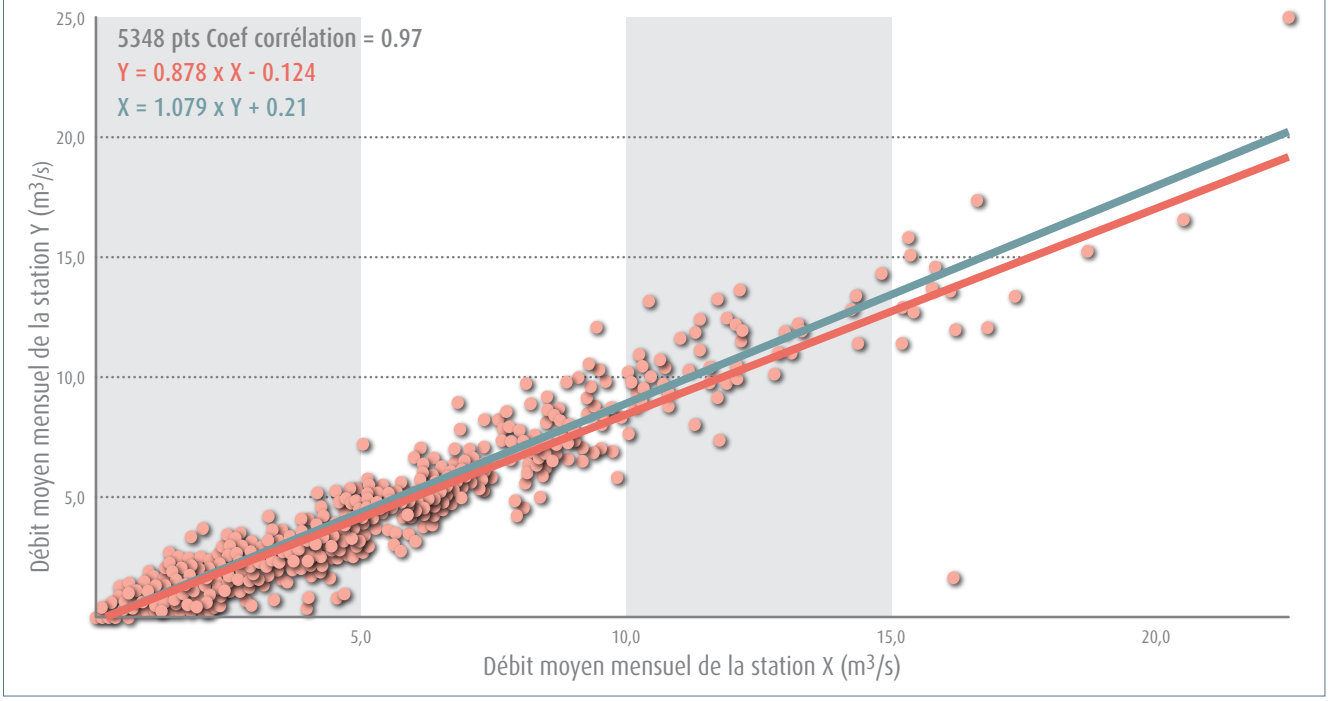
FIGURE 6.2 : HYDROGRAMME COMPORTANT DES ANOMALIES



⊞ FIGURE 6.3 : COMPARAISON DES HYDROGRAMMES DE DEUX STATIONS



⊞ FIGURE 6.4 : CORRÉLATION LINÉAIRE ENTRE DEUX STATIONS



par les observations d'une station S2 supposée hydrologiquement proche. La réciproque est vraie aussi. Une relation linéaire au pas de temps mensuel est recherchée :

Équation 6.1 :

$$Q_{s1modélisé} = a.\ Q_{s2observé} + b$$

Les coefficients a et b doivent avoir un sens physique : a doit être cohérent avec le rapport des bassins versants, b doit être cohérent avec la « productivité » (ou différence des débits de base) de chaque rivière. En pratique, b doit être le plus petit possible sauf justification particulière. Dans le cadre d'un modèle linéaire simple, la relation entre QS1 et QS2 se représente graphiquement à travers un nuage de points. Le coefficient de corrélation témoigne de la qualité de la corrélation linéaire entre les deux séries : plus le coefficient est proche des valeurs extrêmes -1 et 1, plus la corrélation entre les variables est bonne. Une corrélation égale à 0 signifie que les variables ne sont pas corrélées linéairement. Attention à l'impact des fortes valeurs qui peuvent tendre à faire converger le coefficient de corrélation à 1 ou -1 sans que la corrélation soit bonne.
La corrélation linéaire permet de mettre en évidence les erreurs grossières et les problèmes dans le tracé ou les périodes d'application des courbes de tarage et de reconstituer les données manquantes (cf. § 6.3). Elle ne permet pas de détecter les dérives légères.
Cette méthode d'analyse ne peut toutefois se faire sans l'existence d'une station comparable hydrologiquement. Il faut la considérer comme un moyen supplémentaire de détection d'erreur car en comparant deux stations, on fait l'hypothèse que la variable d'explication (la station comparable) est une référence fiable, ce qui n'est jamais certain.

Des modèles linéaires sur les logarithmes des débits ou sur les débits spécifiques (débits divisés par la surface du bassin versant) sont aussi possibles, notamment si les tailles des bassins versants sont trop différentes. Plusieurs modèles peuvent être construits selon la gamme de débit. Des échantillons trop restreints ou trop asymétriques peuvent fausser les conclusions.

POINT D'ATTENTION !

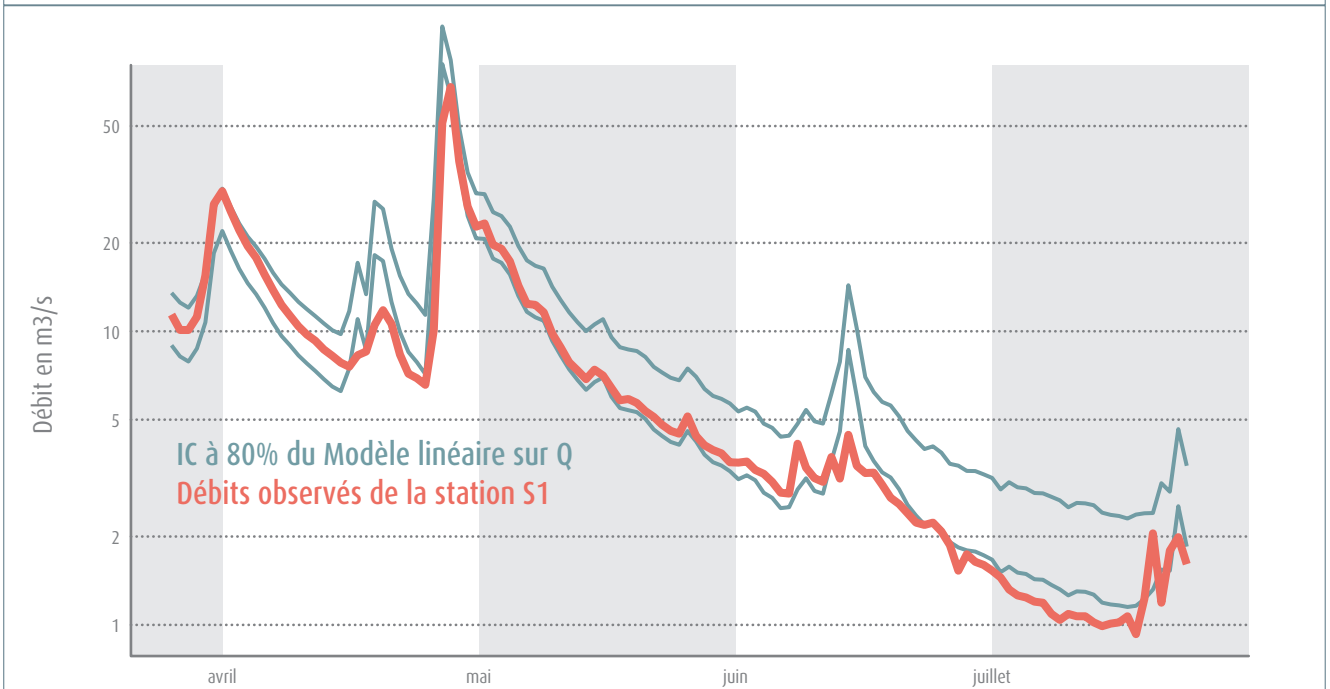
Les écarts entre les valeurs observées et les valeurs modélisées sont appelés résidus. Si le modèle ainsi défini est de bonne qualité (coefficient de corrélation proche de 1 ou -1), les valeurs observées qui s'écartent des valeurs modélisées doivent faire l'objet d'une analyse particulière.

Deux applications d'un modèle linéaire sont présentées :
- la comparaison directe des valeurs observées aux valeurs modélisées pour la détection d'anomalies ponctuelles ;
- l'analyse des résidus du modèle pour la détection de non stationnarité.

Le modèle comme outil de détection d'erreur

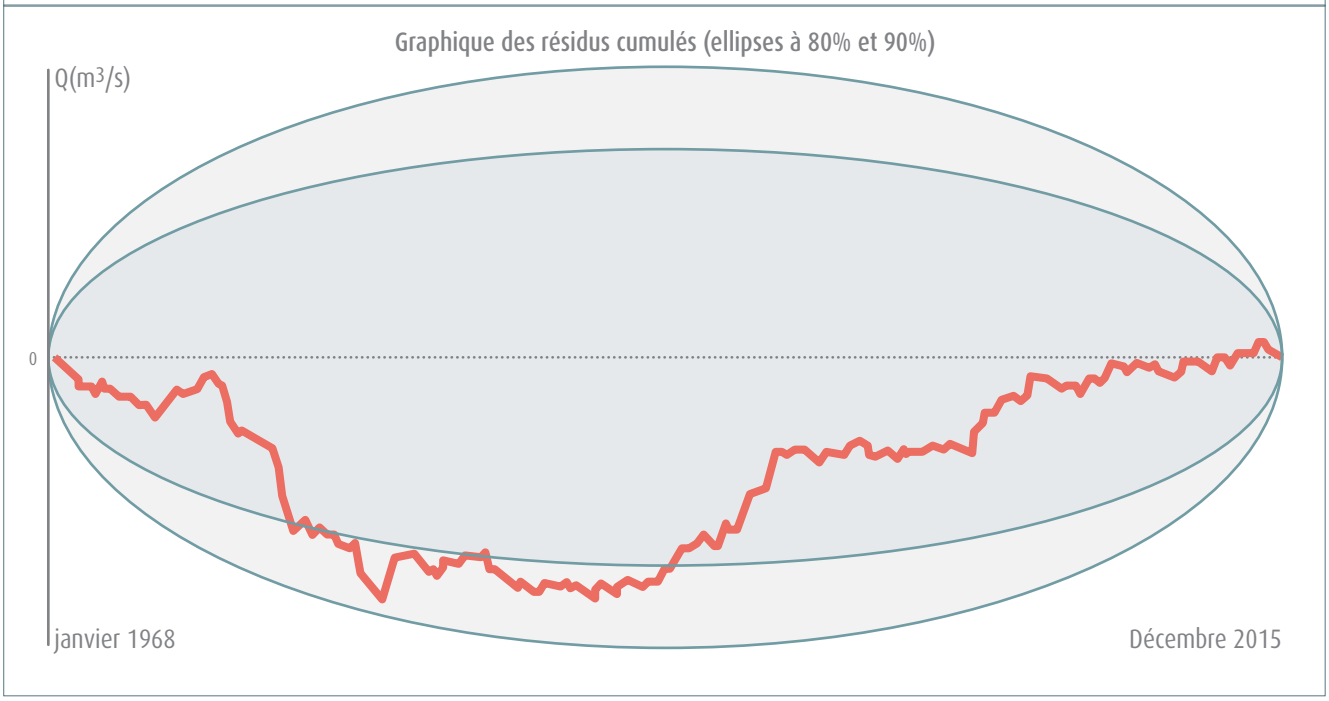
Les coefficients du modèle linéaire peuvent être appliqués aux débits moyens journaliers et le comportement des résidus peut lui-même être modélisé. On peut en déduire un intervalle de confiance du modèle. Un exemple de comparaison de la chronique observée d'une année donnée aux quantiles 10 et 90 du modèle linéaire est présenté en figure 6.5.
Les modèles linéaires doivent être utilisés avec précaution dans la mesure où ceux-ci représentent un comportement statistique moyen du bassin versant mais n'intègrent pas les particularités climatiques d'un

FIGURE 6.5 : COMPARAISON D'UNE CHRONIQUE AU MODÈLE MUNI DE SON INTERVALLE DE CONFIANCE



Les valeurs de l'étiage sont très proches de la borne inférieure de l'intervalle de confiance à 80 %, ce qui doit inciter à vérifier la courbe de tarage pour les bas débits.

FIGURE 6.6 : REPRÉSENTATION DU CUMUL DES RÉSIDUS ET ELLIPSE DE BOIS



épisode pluvieux donné. L'utilisation de modèles linéaires fait l'objet d'un bonus.

Analyse du cumul des résidus du modèle

L'analyse des résidus du modèle est également riche d'enseignements. Elle permet de détecter certaines anomalies citées précédemment. La figure 6.6 présente l'analyse du cumul des résidus.

Le cumul des résidus permet de mettre en évidence des « non-stationnarités » (modifications de relation) entre deux stations et de repérer les périodes correspondantes (Bois et al., 2007). Il est basé sur l'étude des cumuls des résidus de la régression de la série à tester (cumul des différences entre la valeur observée et la valeur calculée à partir de la régression). Elle peut être effectuée directement à partir des chroniques de 2 stations, ou à partir d'une chronique et d'un modèle.
Si la courbe des résidus cumulés sort de l'ellipse délimitant l'intervalle de confiance (valeur habituellement fixée à 80 et 90 % en hydrométrie), cela signifie qu'il y a 80 ou 90 % de chance que ces écarts ne soient pas dus au hasard mais à une non stationnarité entre les deux stations. Au plan théorique, l'ellipse ne doit être tracée que sous hypothèse d'indépendance des résidus (c'est à dire lorsque le résidu à l'instant t est indépendant du résidu à l'instant t-1). Il faut donc en pratique, travailler à un pas de temps suffisamment grand, au moins mensuel, pour que cette condition soit vérifiée et que la position de la courbe du cumul des résidus par rapport aux ellipses ait un sens. Pour un pas de temps inférieur (journalier par exemple), il faut se limiter à interpréter les changements importants d'inflexion de la courbe des résidus.

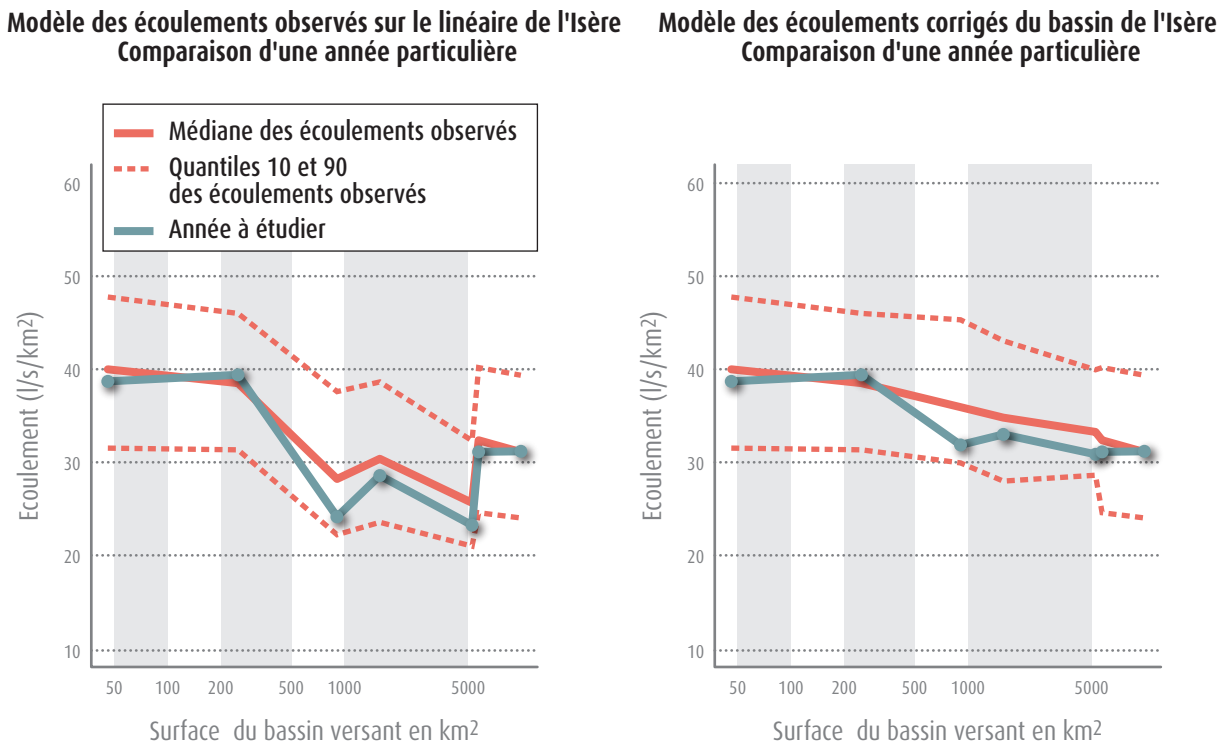
6.2.4 Modèles pluie-débit

La modélisation pluie-débit s'est largement développée ces dernières années pour les besoins de la prévision des crues. Nombre de bassins versants disposent de modèles de ce type, qui constituent des outils de détection des anomalies très efficaces en confrontant les observations de débit au modèle proposé. L'avantage de ce type de modèle consiste dans sa prise en compte des conditions initiales du bassin versant (capacités hydriques, précipitations et températures observées). Par rapport au modèle linéaire, les paramètres supplémentaires permettent de s'affranchir de la nécessité de trouver une station hydrologiquement proche. Voir l'ouvrage cité en référence (Roche et al. 2012) pour aller plus loin, ou se rapprocher des services de prévisions des crues qui disposent de ce type de modèles.

6.2.5 Analyse des écoulements spécifiques

L'écoulement spécifique est défini comme le rapport du débit (journalier, mensuel, annuel) à la surface du bassin versant contrôlé. L'analyse des écoulements spécifiques sur un ou plusieurs bassins versants est riche d'enseignements car ceux-ci suivent en général, une loi de décroissance au fur et à mesure que la taille du bassin versant augmente. Un point singulier dans la représentation graphique doit attirer l'attention. L'exercice reste parfois délicat notamment sur les bassins karstiques où des pertes dans les écoulements de surface créent des anomalies graphiques qui ne le sont pas au sens physique. Il faut également prendre garde aux prélèvements anthropiques qui engendrent des anomalies qui sont tout à fait explicables. La figure 6.7 montre un exemple d'analyse au pas de temps annuel.

FIGURE 6.7 : ANALYSE DES ÉCOULEMENTS SPÉCIFIQUES ANNUELS



La figure de gauche montre l'évolution statistique (moyenne, quantiles 10 et 90 en pointillés) des écoulements annuels observés du bassin pour des stations réparties de l'amont vers l'aval. Les écoulements observés pour l'année à analyser en particulier sont reportés et peuvent être comparés au modèle de référence. L'hydromètre peut s'interroger sur les raisons qui font que l'écoulement spécifique de la troisième station est proche du quantile 10 % alors que la station en amont est quant à elle, légèrement supérieure à la médiane. La figure de droite présente le même type de modèle pour les écoulements désinfluencés du bassin, en tenant compte des volumes qui sont dérivés. A l'aval du bassin, le signal observé est quasiment identique au signal désinfluencé.

6.2.6 Analyse spatiale sur certaines valeurs statistiques

Cette méthode d'analyse consiste à représenter de façon cartographique une valeur statistique en vue de déceler d'éventuelles hétérogénéités dans les résultats.
Les valeurs statistiques de l'écoulement (telles que les débits moyens mensuels (moyennes eaux), les débits maxi journaliers mensuels (hautes eaux), les débits minimums sur x jours consécutifs (VCNx) du mois, etc.) sont cartographiées et comparées aux valeurs moyennes inter-annuelles correspondantes. Une analyse cartographique des débits spécifiques peut compléter l'analyse.

6.3. Reconstitution des données manquantes

La plupart des traitements statistiques requièrent de disposer de données continues dans le temps et sont pénalisés en cas d'absences d'informations. C'est pourquoi, lorsque l'enregistrement des hauteurs d'eau est très douteux ou manquant pendant une certaine durée, le service gestionnaire doit s'efforcer de combler l'absence de données dans la chronique des débits, voire des hauteurs d'eau. L'action qui consiste à pallier cette absence d'information est appelée « reconstitution ».
Les modalités, les difficultés et les possibilités de reconstitution sont très variables et doivent être appréhendées au regard de quatre principaux critères :

- la durée de l'absence d'information, d'autant plus pénalisante qu'elle est longue ;
- l'hydrologie du moment, dont le cas le plus favorable correspond à une période stable, sans précipitation ;
- la présence de stations hydrologiquement comparables qui permet de limiter l'incertitude sur la reconstitution des débits manquants ;
- le caractère ordinaire (débits observés couramment) ou plus rare (étiage sévère ou forte crue) des débits à reconstituer. Dans ce dernier cas, il faut évaluer l'incidence sur les traitements statistiques qui pourront être faits : est-il plus pénalisant de ne pas prendre en compte un débit remarquable (parce-qu'il n'est pas reconstitué), ou de prendre en compte un débit remarquable entaché d'une forte incertitude ?

Dans tous les cas, il est primordial de tracer et de conserver les éléments et la méthode utilisés pour reconstituer l'information manquante, quels que soient les moyens mis en œuvre. Cela permet une critique ou une révision ultérieure. La Banque Hydro permet de repérer les données reconstituées grâce à la précision de leur « méthode d'obtention » (cf. § 6.5).

6.3.1 Les cas les plus faciles

Sur des rivières non influencées, sur des durées courtes (de 3 à 8 jours au plus), durant une période sans pluie et hors situation de crue, il est possible de retracer la courbe de variation des hauteurs en fonction du temps à partir des données à notre disposition. Dans la plupart des cas, il est toutefois préférable de reconstituer les données par l'étude des débits (comparaisons, corrélations, etc.). Les hauteurs sont ensuite calculées à partir des débits reconstitués et de la courbe de tarage.

POINT D'ATTENTION !

La reconstitution des débits en période d'étiage est devenue plus difficile du fait du développement des prélèvements (irrigation, etc.).

6.3.2 Les cas les plus difficiles

La reconstitution est plus difficile dès qu'il y a une influence (apports liés à la pluviométrie, etc.) ou sur une période de longue durée (plusieurs semaines par exemple) sans information. Les moyens mis en œuvre pour la reconstitution sont alors plus importants. La reconstitution est encore plus complexe, suite à de fortes pluies, quand le régime du cours d'eau réagit aux précipitations et est moins régulé par des nappes.

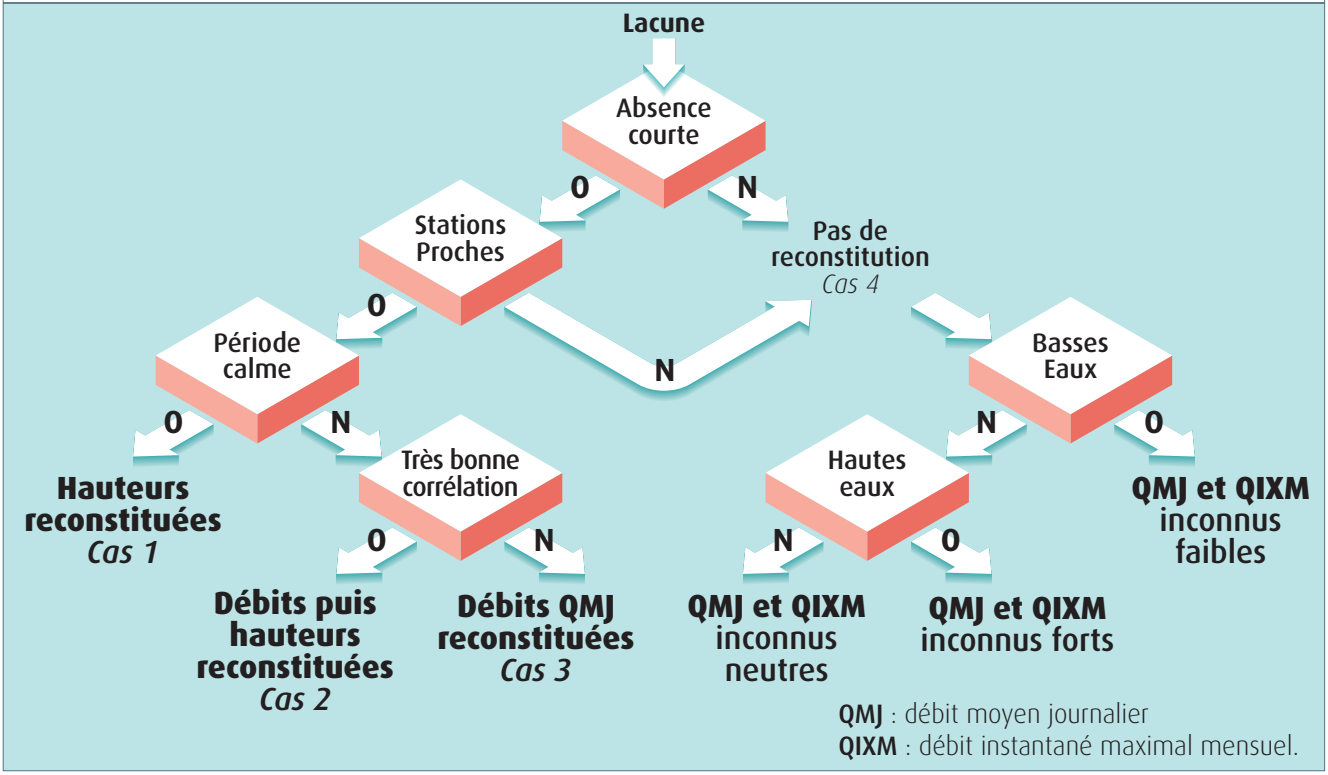
6.3.3 Comment reconstituer ?

La première étape est de rechercher les éléments de base de la reconstitution : les débits des stations de jaugeage proches, les informations disponibles sur les pluies tombées, les niveaux éventuellement observés à proximité, etc. Les méthodes décrites au paragraphe 6.2 pour le traitement des données (modèles linéaires et pluie-débit, écoulements spécifiques) peuvent aussi être utilisées pour la reconstitution des données. La corrélation linéaire peut notamment être utilisée pour reconstituer un débit caractéristique d'étiage à partir de jaugeages ponctuels (cette méthode est décrite en bonus).
Les données manquantes peuvent être reconstituées au pas de temps journalier et mensuel. Une valeur ponctuelle infra-journalière peut éventuellement être interpolée dans les cas les plus évidents.
La reconstitution du débit d'un pic de crue, surtout s'il s'agit de la plus forte crue de l'année doit être tentée mais avec les plus grandes précautions. Une méthodologie particulière peut être mise en œuvre dans ce cas. Elle est décrite de manière spécifique au chapitre 7.
La chronique de débits corrigés grâce aux reconstitutions doit ensuite être critiquée de manière à détecter d'éventuelles incohérences.

6.3.4 Que faire si les données ne peuvent pas être reconstituées ?

Les calculs statistiques automatiques de la Banque Hydro (débits minimum ou maximum mensuels par exemple) sont effectués en constituant un échantillon rassemblant une valeur par année (civile ou hydrologique). L'absence d'une seule donnée sur une année empêche l'identification de la valeur à introduire dans l'échantillon pour cette année donnée (la Banque Hydro ne pouvant déterminer si la valeur absente ne serait pas justement la valeur à choisir). En qualifiant de manière judicieuse certaines variables (hauteur et débits et/ou QMJ) en « inconnue faible », « inconnue forte » ou « inconnue neutre » cela permet d'indiquer dans quelle gamme de débit se situe la donnée inconnue et d'utiliser malgré tout l'année où se situe cette

⊞ FIGURE 6.8 : ARBRE DE DÉCISION POUR LA RECONSTITUTION (CAS 1 À 3) OU L'UTILISATION DES « INCONNUS » DE LA BANQUE HYDRO (CAS 4)



lacune dans les procédures statistiques où l'inconnue n'est pas indispensable. L'arbre de décision de la figure 6.8 précise l'utilisation des statuts « inconnue faible », « inconnue forte » et « inconnue neutre » dans la Banque Hydro (cas 4).

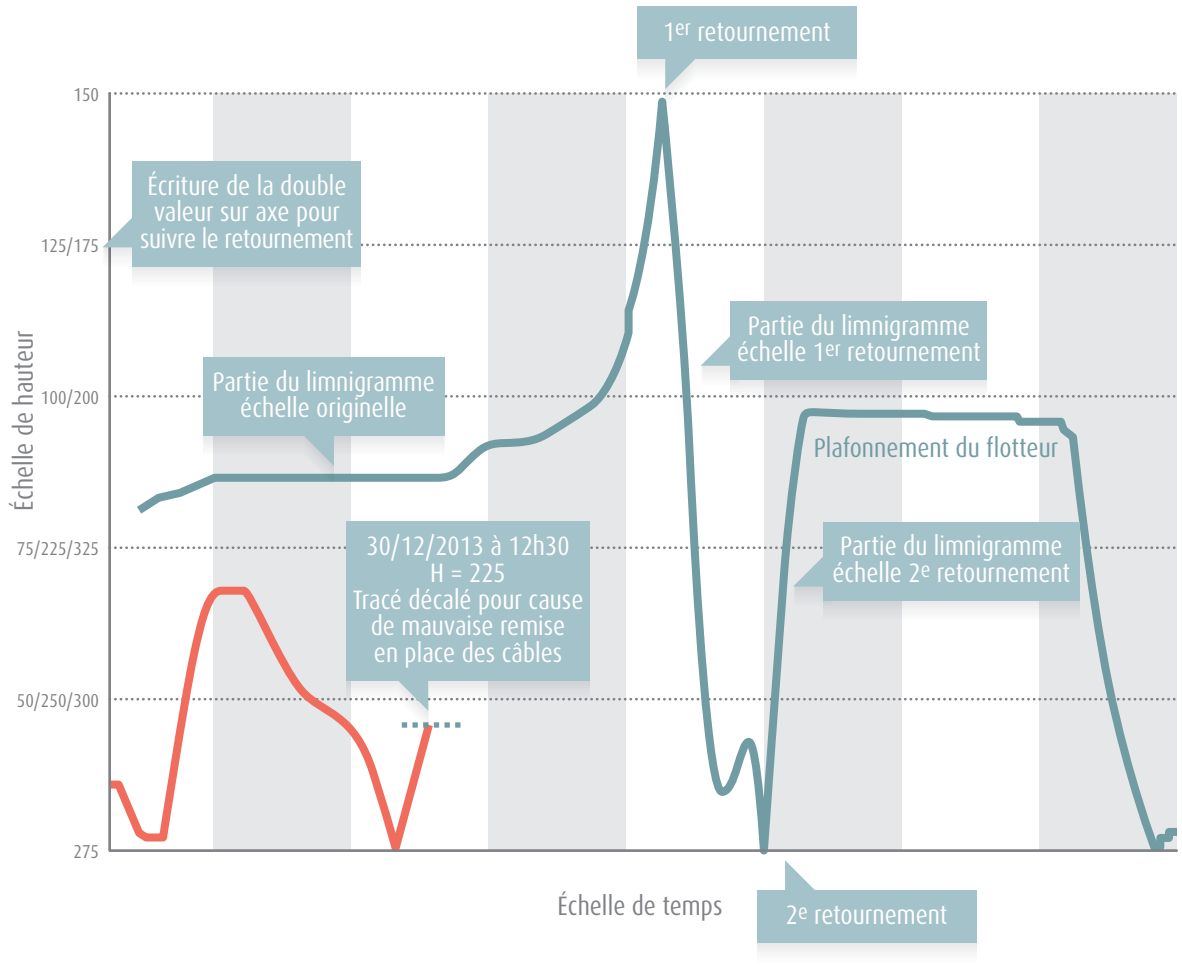
6.4. Traitement des données anciennes

Lors des opérations de numérisation des données anciennes enregistrées sur papier il est préconisé de procéder à un examen minutieux des limnigraphes de façon à identifier les anomalies d'enregistrement (dérive brusque ou progressive du capteur ou de l'horodateur). Après analyse, les anomalies font l'objet d'une correction soit ponctuelle, soit durant la période incertaine entre deux contrôles.
Le calage de base des limnigraphes est vérifié en rapprochant les hauteurs début et fin et les valeurs portées sur les enregistrements.
Le « cerisage » est l'étape intermédiaire de traitement du limnigraphe. Le tracé est codé de façon à ce que l'enregistrement entre deux points « cerises » puisse être raisonnablement assimilé à une droite. La flèche entre la droite définie par deux points « cerise » successifs et la courbe réelle ne doit pas être supérieure à 5 mm réels, ni générer une erreur de débit supérieure à 5 %. En cas de forte variation de hauteur, la multiplication des points « cerises » est recommandée.
Les retournements (cf. Figure 6.9) doivent être analysés avec précision et correctement saisis. Les contrôles sur les hauteurs de début et de fin sont indispensables. La continuité de l'enregistrement d'une feuille à l'autre doit être vérifiée pour éviter les marches d'escalier aux limites.
Des outils informatiques existent pour faciliter le travail de digitalisation des données anciennes.

6.5. Mise à disposition des données

Les données acquises et validées par les services de l'État sont stockées dans la Banque Hydro et accessibles gratuitement sur www.hydro.eaufrance.fr. La bancarisation des données respecte le scénario d'échange préconisé par le Sandre, pour répondre à un objectif d'harmonisation et d'échange de données entre les différents acteurs

FIGURE 6.9 : EXEMPLE DE LIMNIGRAPHE ISSU D'UN CAPTEUR À FLOTTEUR ET CODEUR AVEC DOUBLE RETOURNEMENT



⊞ TABLEAU 6.2 : DIFFÉRENTES POSSIBILITÉS DE QUALIFICATION DES DONNÉES DANS LA BANQUE HYDRO

Statut de la donnée	Brute, corrigée, pré-validée, validée
Qualification de la donnée	Douteuse, bonne, non qualifiée
Méthode d'obtention de la donnée	Mesurée, calculée, reconstituée, expertisée
Continuité de la donnée	Indique si la donnée est jugée continue vis-à-vis de la précédente d'un point de vue temporel. S'il n'y a pas de continuité, il est possible de qualifier la plage de discontinuité en inconnue faible, forte ou neutre.

impliqués dans l'hydrométrie, en temps réel aussi bien qu'en temps différé. La modernisation de la Banque Hydro (opération HYDRO 3) permet d'archiver tous les statuts de la donnée (du statut brut au statut validé) pour une meilleure traçabilité des traitements effectués. La Banque Hydro permet aussi d'affecter aux données une méthode d'obtention, une qualification et un code de continuité (cf. Tableau 6.2).

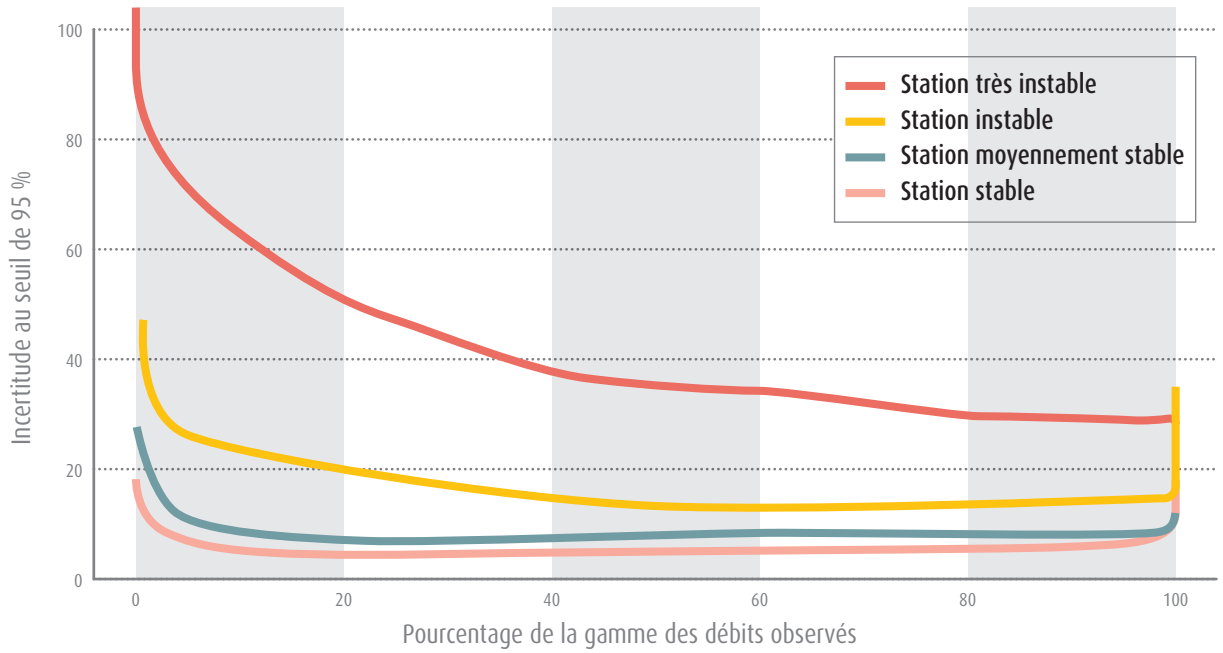
Les autres gestionnaires de stations hydrométriques sont fortement incités à renseigner également cette base de données, dans un souci d'archivage commun des données produites. La bancarisation de données qualifiées dans la Banque Hydro est souvent une condition d'éligibilité aux aides des différents financeurs de nouveaux réseaux de mesure (agences de l'eau, départements).

6.6. Incertitudes sur les données produites

Les données de débit publiées sont le résultat d'un processus dont chacune des phases est affectée par des incertitudes qui sont rappelées ici brièvement :

- incertitudes liées à la mesure de hauteur : précision du capteur, dérive et calage du capteur dans le temps (cf. chapitre 3) ;
- incertitudes des jaugeages (cf. chapitre 4) ;
- incertitudes liées à la courbe de tarage : sensibilité de la relation hauteur-débit, a priori sur le tracé, extrapolations aux extrémités, variabilité dans le temps de la relation hauteur-débit (cf. chapitre 5).

⊞ FIGURE 6.10 : INCERTITUDE ATTENDUE POUR QUATRE STATIONS AU COMPORTEMENT TRÈS CONTRASTÉ



Les incertitudes les plus faibles calculées sont très rarement inférieures à 5 % au seuil de confiance de 95 %. Elles sont obtenues pour des stations très bien suivies sur des rivières de plaine où les modifications géométriques du lit restent faibles pour les débits faibles à modérés. Cet ordre de grandeur exclut les extrêmes pour lesquels les conditions et la fréquence des jaugeages sont moins bonnes. Lorsque le contrôle hydraulique est constitué par un tronçon à pente significative où le charriage est plus marqué, les incertitudes attendues sont plus conséquentes. Elles sont comprises entre 10 et 20 % pour les débits courants et peuvent largement dépasser les 20 % pour les débits faibles. L'exemple de la station « très instable » est une situation extrême qui reste exceptionnelle. Il est présenté pour attirer l'attention des gestionnaires sur certaines situations très particulières rencontrées en montagne, en l'absence de section de contrôle marquée et lorsque le charriage est très important. Dans ces conditions, les incertitudes attendues ne sont pas inférieures à 30 % dans les situations d'écoulement les plus favorables et peuvent atteindre les 100 % pour les étiages et les crues. Le maintien du point de mesure ne peut alors s'envisager qu'après la prise de conscience et l'acceptation de ces niveaux d'incertitude par l'ensemble des utilisateurs.

Les incertitudes des débits produits à partir des stations d'hydrométrie varient très fortement en fonction du type de cours d'eau, des possibilités d'aménagement du contrôle hydraulique, de la fréquence des jaugeages et de la gamme de débit.
Pour proposer une incertitude sur la donnée de débit, il faut donc composer l'ensemble des sources d'incertitude. Les méthodes GesDyn et BaRatin permettent de calculer l'incertitude d'un hydrogramme (cf. annexe 1 et bibliographie).
La figure 6.10 présente l'incertitude attendue (méthode GesDyn) en fonction de la gamme de débit suivant le module (rapport du débit et de la moyenne inter annuelle des débits) pour quatre stations contrastées représentatives de situations qui peuvent se rencontrer sur le territoire français.

POINT D'ATTENTION !

L'incertitude n'est pas honteuse. Toute mesure est incertaine, aucun domaine n'y échappe. L'analyse d'incertitude des données hydrométriques n'est pas un outil pour juger de la qualité professionnelle du producteur. Elle n'est que le reflet des conditions qui ont prévalu à la production des données. Un bon service peut produire une donnée à forte incertitude, et néanmoins utile, dans des conditions particulières (par exemple un jaugeage aux flotteurs en crue violente). Les services qui œuvrent sur les rivières de montagne produisent des données entachées d'incertitudes plus fortes que ceux qui travaillent en plaine. La réduction des incertitudes passent parfois par des efforts très conséquents à la charge des services, et l'intérêt de les engager est à évaluer à l'aune des enjeux associés.

L'incertitude doit permettre à l'utilisateur de données de prendre des décisions éclairées. Toutefois il reste encore un important travail de recherche et d'accompagnement pour aider les décisionnaires à maîtriser le concept d'incertitude en regard des enjeux associés à leurs besoins.

L'incertitude est utile au producteur de données. Avec des outils adaptés, l'analyse d'incertitude ne complique pas le travail de l'hydromètre, mais au contraire lui permet d'optimiser son processus de mesure (comme la fréquence des jaugeages) et de justifier les ressources demandées.

Il ne faut pas confondre assurance qualité (qui démontre la conformité du processus de mesure à des procédures écrites) et analyse d'incertitude (qui ne peut s'effectuer qu'après la première). Des données conformes à une procédure, avec un code qualité "bon" ou "douteux" par exemple, peuvent ensuite être assorties d'une incertitude, petite ou grande.

6.7. Références

• Bois P., Obled C. Zin I. - Introduction au traitement des données en hydrologie, ENSE3 2007.

• Irstea, Onema : Guide technique pour l'exploitation des jaugeages en hydrologie pour la prédétermination des débits caractéristique d'étiage, 2016.

• Le Coz J., Chaléon C., Bonnifait L., Le Boursicaud R., Renard B., Branger F., Diribarne J., Valente M. - Analyse bayésienne des courbes de tarage et de leurs incertitudes : la méthode BaRatin - La Houille Blanche, 6, 31-41, doi:10.1051/lhb/2013048.

• Musy A - Hydrologie Générale. EPFL Section SIE et GC 4e semestre 2005.

• Perret C., Morlot T., Favre AC. - La gestion dynamique des relations hauteur-débit des stations d'hydrométrie et le calcul des incertitudes associées : un indicateur de qualité et de suivi – La Houille Blanche, 6, 24-30, doi : 10.1051/lhb/2013047.

• Pons F., Hydrometry data rescue, a stake for the future, Floodrisk 2016.

• Roche PA., Miquel J., Gaume E. - Hydrologie quantitative Processus, modèles et aide à la décision Edition Springer 2012.

• SANDRE, Scénario d'échanges des données hydrométriques.

Reconstitution de données hydrométriques post-crue

— chapitre 7

7.1. Intérêt et objectifs – Domaine d'application

En cas de lacune dans les enregistrements de hauteurs lors d'une crue, ou bien en cas d'absence de jaugeages permettant de préciser les débits atteints, il peut être intéressant d'évaluer ces débits a posteriori, notamment le débit de pointe. Cette information peut par exemple servir à reconstituer une chronique de données continue (débits maxima annuels, ou hydrogramme de la crue), et aider si nécessaire à revoir l'extrapolation de la courbe de tarage de la station.

Ce travail de reconstitution nécessite généralement d'effectuer des relevés sur le terrain pour confirmer les hauteurs d'eau et la section d'écoulement en crue, et collecter les informations nécessaires à l'estimation des vitesses. Ce dernier point s'avère le plus délicat et peut être traité soit par interprétation du fonctionnement hydraulique de la section considérée, soit par l'exploitation d'informations plus factuelles sur les vitesses d'écoulements lorsqu'elles existent (vidéos en crue, ou bien photographies).

7.2. Choix du site étudié

Si l'objectif est bien de reconstituer une valeur de débit au niveau d'une station (la plupart du temps le débit de pointe de la crue), il est parfois préférable de réaliser l'analyse sur un site différent dont les caractéristiques répondent mieux à l'objectif visé. Les conditions d'écoulement au niveau de la station considérée ne sont en effet pas toujours adaptées à une reconstitution des débits pour des crues majeures.

La première étape est donc de choisir un site d'estimation adapté. Cette recherche nécessite un travail de reconnaissance qui peut être important (pouvant porter sur plusieurs kilomètres de rivière), mais elle peut être anticipée par les hydromètres sur certaines stations à fort enjeu en crue. Le site retenu doit être suffisamment proche du site de la station pour pouvoir garantir une valeur similaire du débit (pas d'apports significatifs entre le site retenu et la station). Il est également nécessaire de pouvoir relier le débit estimé à un niveau d'eau correspondant à la station, qui doit éventuellement être relevé en cas de lacune. Les autres critères à prendre en compte pour le choix du site sont les suivants :

- largeur d'écoulement en crue limitée : larges débordements en lit majeur à éviter ;
- section stable lors de la crue : pas de phénomènes significatifs d'érosion/comblement du lit, pas d'embâcles susceptibles d'avoir modifié de façon significative la section d'écoulement ;
- section présentant des conditions hydrauliques simples permettant l'application d'une formule d'hydraulique déterminée : choisir par exemple des tronçons rectilignes, de pente et section d'écoulement uniformes pour l'application de la formule de Manning-Strickler (équation 2.4). À défaut d'une section parfaitement uniforme, l'application de la méthode de la pente de la ligne d'eau est possible (cf. NF ISO 1070, AFNOR, 1992) : dans ce cas un tronçon progressivement convergent (se rétrécissant) est préférable à un tronçon divergent (s'élargissant). Pour l'application d'une formule de seuil, rechercher un seuil de géométrie simple, avec une chute suffisante pour assurer le fonctionnement dénoyé, et des vitesses d'approche les plus faibles possibles ;
- pas d'influence aval marquée : attention notamment aux sections situées à l'amont des ouvrages ou des confluences ;
- section présentant des laisses de crue nombreuses et redondantes (pour fiabiliser l'information sur les niveaux et la forme de la ligne d'eau) et persistance des laisses de crue (qui peuvent être effacées rapidement en secteur urbain notamment) ;
- présence de témoins potentiels de la crue à proximité, permettant de disposer de descriptions des écoulements en crue.

Certains aspects pratiques doivent également être pris en considération pour permettre les levés de terrain : végétation peu dense, visibilité amont/aval suffisante pour relever les pentes du lit et de la ligne d'eau, possibilité de traverser le cours d'eau, etc.

Les sections sous ouvrages peuvent s'avérer intéressantes car généralement peu larges et stables, surtout si des éléments pour préciser les vitesses d'écoulement y sont disponibles : différence de niveau liée au choc sur piles amont, différence de niveau amont-aval, séquence vidéo.

POINT D'ATTENTION !

Il est toujours préférable d'exploiter plusieurs sites et de recouper les estimations obtenues. La redondance d'information est un élément clé permettant la critique et l'évaluation des incertitudes.

7.3. Réalisation des levés dans les sections retenues

Les principales informations à regrouper lors des levés sont listées ci-dessous. Elles varient sensiblement en fonction des modalités d'exploitation prévues pour l'estimation du débit (exploitation d'une vidéo ou formule hydraulique à utiliser) et peuvent inclure :

- un ou plusieurs profils en travers (suivant les besoins), incluant le niveau des laisses de crues associées, ainsi que la bathymétrie si nécessaire, de façon à aboutir à la section d'écoulement complète ;
- position XY et photos des sections levées ;
- suivant le mode d'exploitation visé, le profil en long du lit et de la ligne d'eau d'après les laisses de crue (pour application de la formule de Manning-Strickler ou de la méthode de la pente de la ligne d'eau) ;
- le cas échéant, position de repères pour exploitation de vidéos et/ou photos ;
- un schéma (ou carte) du site, avec le cours d'eau, les singularités, l'occupation du sol, les traces d'écoulements à fortes vitesses (végétation couchée, érosion), et les emplacements des mesures s'avère également très utile.

POINT D'ATTENTION !

Des erreurs importantes sont possibles sur le niveau des laisses de crue, qui doivent par conséquent être sélectionnées avec précaution.

Voici quelques exemples de pièges à éviter :

- **la végétation arbustive peut avoir plié sous l'effet de l'écoulement puis se redresser après la crue, amenant à surestimer le niveau des laisses ;**
- **les laisses situées sur des obstacles en milieu de l'écoulement sont souvent plus représentatives de la charge que de la hauteur d'eau (différence de niveau de l'ordre de $V^2/2g$) ; sur les rives, la présence ponctuelle de vagues, ou l'arrivée brutale de fronts d'onde, peuvent également générer des laisses plus hautes que le niveau moyen dans la section ;**
- **les traces d'humidité sur les murs peuvent être liées à des remontées capillaires, et ne sont donc pas nécessairement représentatives du niveau d'eau maxi (contrairement aux dépôts limoneux).**

De façon à fiabiliser les levés, il est préférable de lever un nombre important de laisses de crue sur les deux rives, leur redondance permettant une critique ultérieure par comparaison graphique (cf. Figure 7.1). L'idéal est que l'hydrométrie visite le site dès que possible après l'événement pour sélectionner et matérialiser (peinture, clous, étiquettes, photos) les marques de crue fraîches, sans attendre le levé topographique si celui-ci ne peut pas être réalisé rapidement. Les laisses potentiellement douteuses ou supposées représentatives de la charge sont à identifier. Enfin, les profils en long des laisses de crue et du fond du lit doivent être levés sur une longueur suffisante pour permettre une bonne estimation des pentes, avec des laisses suffisamment nombreuses pour permettre l'analyse de la forme de la ligne d'eau (hypothèse de régime uniforme). Une bonne estimation de la pente s'avère difficile lorsque celle-ci est inférieure à 0,5 %.

7.4. Interviews de témoins

En parallèle aux levés, des informations complémentaires particulièrement utiles peuvent parfois être collectées auprès des témoins habitant à proximité de la section considérée :

- confirmation du niveau maximum dans la section ;
- horaire du pic de crue (importance si simulations pluie-débit ultérieures) ;
- dynamique de montée/décrue (horaires et niveaux associés) ;
- autres éléments descriptifs du déroulement : embâcles, évolution du fond et des berges, chemins d'écoulement lors de la crue (éventuels contournements) ;
- photos ou vidéos en crue.

Il est capital de croiser et recouper ces informations auprès de différentes sources (lorsqu'elles existent).

7.5. Estimation de la vitesse des écoulements

L'estimation de la vitesse moyenne des écoulements dans la section considérée constitue la principale difficulté (et probablement la principale source d'erreurs). Celle-ci peut être réalisée de deux façons : soit par l'analyse du fonctionnement hydraulique de la section, soit par reconstitution directe d'informations sur les champs de vitesse en crue à partir de vidéos ou photos.

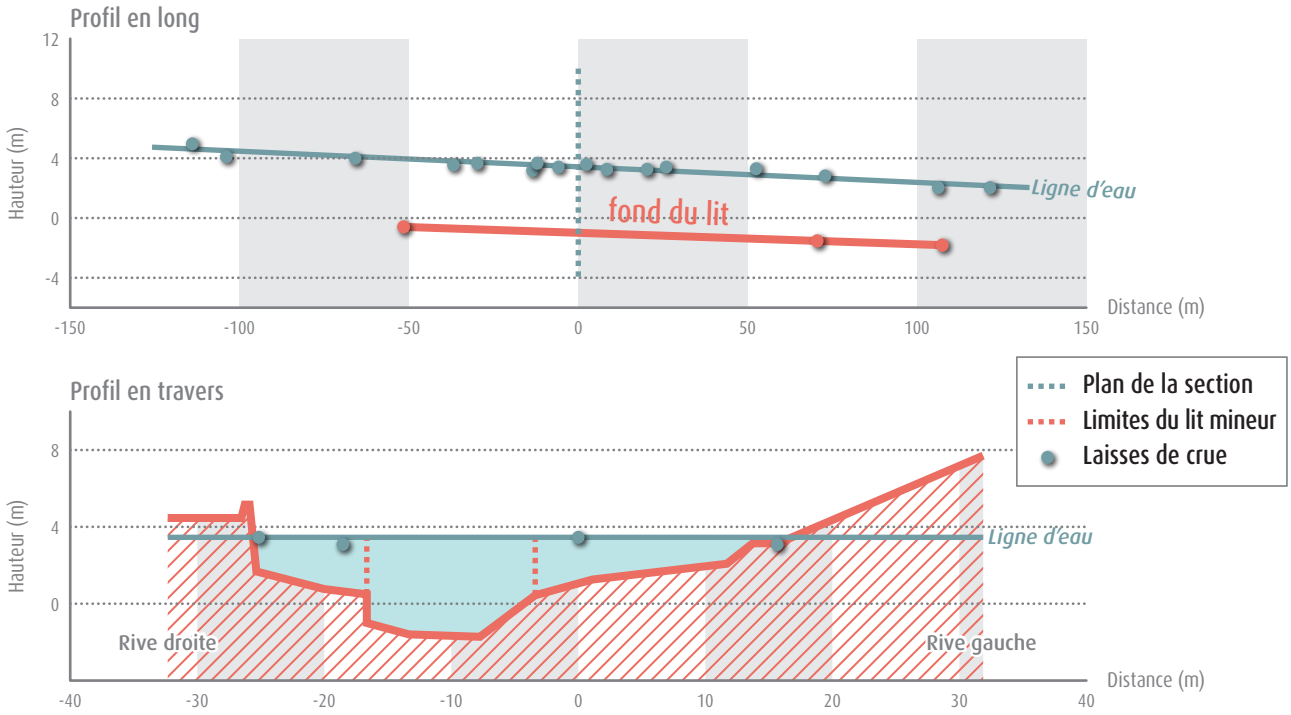
7.5.1 Interprétation du fonctionnement hydraulique de la section

Différentes méthodes sont regroupées dans cette catégorie, elles présentent néanmoins toutes des limites liées aux hypothèses sous-jacentes effectuées et/ou au choix des paramètres les plus adaptés :

- formule de Manning Strickler, applicable sous hypothèse d'écoulement uniforme, hypothèse qui peut être vérifiée en comparant la pente et la forme de la ligne d'eau (cf. Figure 7.1) à celle du lit. Dans ce cas le choix du paramètre de rugosité (coefficient de Strickler K) s'avère déterminant ;
- méthode de la pente de la ligne d'eau en cas d'écoulement graduellement varié. Dans ce cas, le coefficient de Strickler K n'est plus le seul paramètre à déterminer (coefficients de charge dynamique et de perte de charge à évaluer), ce qui rend l'application plus complexe ;
- construction d'un modèle hydraulique 1D local permettant de traiter des cas pour lesquels la ligne d'eau est plus chahutée, mais toujours avec la nécessité d'une estimation de la rugosité du lit ;
- formule de seuil (dénoyé). L'application de cette formule nécessite l'estimation d'un coefficient de débit qui dépend des caractéristiques du seuil : le choix de ce coefficient est déterminant et doit être réalisé avec précaution (Cerema, 2005). La formule nécessite également de connaître la charge à l'amont du seuil, donc le terme $V^2/2g$ où V est la vitesse d'écoulement à l'approche du seuil (vitesse qui ne peut pas toujours être négligée en crue). À défaut de connaître cette vitesse, celle-ci peut être estimée par itération : application de la formule de seuil avec une vitesse d'approche nulle, estimation de la vitesse à l'amont du seuil à partir du débit obtenu et de la section, utilisation de la valeur de vitesse estimée pour ré-appliquer la formule de seuil, etc. ;
- formules de pertes de charge au passage sous un ouvrage, avec ici aussi un choix de paramètre à effectuer (coefficient de contraction), ainsi qu'une hypothèse sur la vitesse d'approche.

D'une façon générale, il est donc important d'appliquer les formules hydrauliques avec précaution et en étant conscient des hypothèses et des

⊞ FIGURE 7.1 : EXEMPLE DE PROFIL EN LONG ET PROFIL EN TRAVERS AVEC INDICATION DES LAISSES DE CRUE RELEVÉES



La redondance des laisses permet de fiabiliser l'information sur la ligne d'eau. L'hypothèse d'un régime uniforme est validée lorsque la pente de la ligne d'eau est voisine de celle du fond du lit.

limites inhérentes à chaque cas. Il peut également être utile de consolider l'analyse à partir d'éléments factuels qui, bien que restant assez subjectifs, peuvent confirmer ou infirmer la présence d'écoulements à vitesses élevées : description des témoins, végétation couchée ou intacte, érosion des berges, etc.

7.5.2 Analyse de vidéos et/ou photos

La méthode la plus simple consiste à se servir des photos ou vidéos disponibles pour évaluer la vitesse d'objets flottants, ou bien la différence entre ligne d'eau et ligne de charge dans la section (donnant une indication du terme $V^2/2g$) à partir de la surélévation observée au niveau du choc sur un obstacle (cf. Figure 7.2).
Une méthode plus élaborée consiste à reconstituer le champ de vitesses de surface sur toute la section à l'aide d'un logiciel d'analyse d'images de type LSPIV (cf. chapitre 4, Figure 4.11). Pour cela il est nécessaire de disposer de vidéos présentant les caractéristiques nécessaires à une telle analyse :

- champ fixe sur au moins 1s ;
- prise de vue permettant de visualiser l'ensemble de la section sur l'image (par exemple depuis un pont, ou depuis la berge) ;
- profil en travers pouvant être levé a posteriori, où le niveau d'eau peut être évalué ;
- surface libre la plus plane possible (la pente peut être prise en considération), avec un écoulement le plus uniforme possible (pour l'estimation du coefficient de surface) ;
- présence de repères fixes sur les deux rives dont la position peut être relevée (cf. Figure 4.11).

Ces méthodes ne fournissent qu'une indication partielle sur le champ de vitesses (vitesses ponctuelles ou champ de vitesses en surface), qu'il faut donc extrapoler à la vitesse moyenne dans la section par application d'un coefficient généralement situé dans une gamme de 0,8 à 0,9 (cf. Tableau 4.1).

7.6. Critique des résultats

Un premier niveau de critique peut porter sur l'ordre de grandeur des vitesses d'écoulement estimées. Pour cela il peut être notamment intéressant d'estimer le nombre de Froude, en étant conscient que les écoulements super-critiques à l'échelle d'un tronçon en crue restent rares et ne sont généralement rencontrés que localement, ou dans des configurations très particulières : pentes très fortes, écoulements chenalisés et sans obstacle.
Un deuxième niveau de critique consiste à exploiter la redondance d'information dès que possible : cohérence amont/aval des estimations effectuées, ordre de grandeur des débits spécifiques. Ceci permet d'éliminer les estimations les plus incohérentes. Si la redondance est insuffisante, une simulation pluie-débit peut permettre de vérifier que les débits de pointe estimés sont compatibles avec des rendements d'écoulements raisonnables et dans tous les cas inférieurs à 100 %.

FIGURE 7.2 : EXEMPLES D'ESTIMATIONS PONCTUELLES DE VITESSE D'ÉCOULEMENT DE SURFACE RÉALISÉES À PARTIR DE VIDÉOS (IFSTTAR)



À gauche : parcours d'un objet flottant ; à droite : surélévation fournissant une évaluation du terme $V^2/2g$ ($1.25 < V^2/2g < 1.75$ m, soit $5 < V < 5.9$ m/s)

7.7. Références

• AFNOR (1992) – Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthode de la pente de la ligne d'eau – Norme NF ISO 1070

• CEREMA DTec EMF, Notice sur les déversoirs. Synthèse des lois d'écoulements au droit des seuils et déversoirs, Février 2005, 87p.

• CEREMA, guide méthodologique, Protocole de collecte d'informations par reconnaissances de terrain suite à une inondation, 2015

• Degoutte G., Aide-mémoire d'hydraulique à surface libre, cours agroparistech, 32p.

• Gaume E. et al., Post Flash-flood Investigations - Methodological note, report T23-06-02 of the EU FloodSite project, 2006, 54 p.

• Gaume E., and Borga M., Post-flood field investigations in upland catchments after major flash floods : proposal of a methodology and illustrations, Journal of Flood Risk Management, 2008, 1, pp 175-189

• Payrastre O., Bonnifait L., Le Boursicaud R., Gaume E., Gasset R., Busseuil G., Estimation des débits des crues de juin 2013 dans les Pyrénées, rapport de la convention DGPR/Ifsttar 2013 n°2101140317, 2014, 15p.

• Payrastre O., Gaume E., Javelle P., Janet B., Fourmigué P., Lefort P., Martin A., Boudevillain B., Brunet P., Delrieu G., Marchi L., Aubert Y., Dautrey E., Durand L., Lang M., Boissier L., Douvinet J., Martin C., Ruin I. et l'équipe TTO2D d'HYMEX. Analyse hydrologique de la catastrophe du 15 juin 2010 dans la région de Draguignan (Var, France). Congrès SHF : « Evènements extrêmes fluviaux et maritimes », Paris, 1-2 février 2012

• Payrastre O., Naulin J.P., N'Guyen C.C., Gaume E., Analyse hydrologique des crues de juin 2010 dans le Var, rapport de la convention DGPR/Ifsttar 2011 n°21.00.46.03.2, 2012, 32p.

• Exploitation de vidéos pour détermination des vitesses :
> https://floodscale.irstea.fr/donnees/videos-amateurs-de-rivieres-en-crue/videos-amateurs-de-rivieres-en-crue
> Guide méthodologique Collecte et préparation de film amateur en vue d'une exploitation par analyse d'image
> Fudaa-LSPIV 1.3.2, Guide d'utilisation, version v04 du 17-09-2013, Magali Jodeau, Alexandre Hauet, Jérôme Le Coz

Prévention des risques professionnels et formation en hydrométrie

— chapitre 8

8.1. Enjeux et réglementation

L'exercice du métier d'hydromètre comporte un certain nombre de risques à maîtriser. La gravité de certains de ces risques étant extrême, il est du devoir de chacun de tout mettre en œuvre pour réduire les risques à un niveau résiduel acceptable. Ainsi, la prévention des risques ne doit pas être considérée comme un frein à l'activité car les moyens (la connaissance, les formations, les équipements) ont évolué ces dernières années. L'adaptation des mesures de prévention aux réalités de terrain conditionne l'acceptation de celles-ci par les agents. Le code du travail (art L 4121-1 du code du travail) oblige tout employeur à prendre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité et protéger la santé physique et mentale des travailleurs. La prévention des risques passe par l'évaluation des risques qui doit être traduite dans le DUERP (document unique d'évaluation des risques professionnels). Ce dernier permet l'identification, le classement et le choix de traitement préventif des risques. La prévention repose sur l'ensemble de la communauté de travail : les chefs de services, le médecin de prévention, les agents chargés de la sécurité et de la prévention (ASP), le Comité Hygiène, Sécurité et condition de travail (CHSCT), les assistantes sociales et surtout sur les travailleurs.

8.2. Prévention et responsables de services

8.2.1 Méthode d'analyse

La prévention doit prendre une part importante dans le management. Elle doit être conduite en s'appuyant sur la méthode d'analyse de risque utilisée pour la rédaction du DUERP . Cette analyse de risque doit faire l'objet d'adaptations aux réalités locales. Un regard d'expert métier combiné avec un regard extérieur permettent une meilleure analyse des situations d'exposition à un danger. Le tableau 8.1 inspiré d'un DUERP présente une synthèse des principaux risques rencontrés en hydrométrie ainsi que leur classement et moyen de prévention. Celui-ci peut être complété par des fiches de risques, de recommandations et de « sécurité- station ». Ces fiches permettent de détailler les risques, leur définition, les dommages causés, leurs moyens de prévention ainsi que la transmission de consignes particulières. Elles peuvent se trouver dans les véhicules, dans les boîtiers « stations » en support papier ou informatique. Le classement entre les risques s'effectue après avoir quantifié leur importance en combinant plusieurs facteurs : gravité des conséquences x fréquence d'exposition.

POINT D'ATTENTION !

Des actions collectives (suppression ou réduction de l'exposition, protections collectives) sont toujours à mettre en place avant des mesures individuelles (formations, équipements de protection individuelle = EPI).

8.2.2 Moyens de prévention

Le choix de moyens adaptés doit permettre aux agents de travailler avec le minimum de contrainte, ce qui changera leur regard face à la prévention. Il existe un large choix d'EPI qui sont de plus en plus adaptés au travail en extérieur dont l'hydrométrie.
Des formations très concrètes permettent une bonne sensibilisation des agents (ex : simulation chute en rivière) et des visites de terrain avec des responsables hiérarchiques peuvent renforcer la prise de conscience.

8.3. Prévention et hydromètres

8.3.1 Fondamentaux

Les agents de services d'hydrométrie (hydromètres, agents de maintenance) sont exposés à de nombreux risques liés aux activités de bureau, d'atelier, de travaux en extérieur avec des déplacements fréquents à pied, en véhicule terrestre, en bateau.

POINT D'ATTENTION !

Quelques principes fondamentaux méritent d'être particulièrement mis en avant. Ils contribuent à la réduction des risques dans l'exercice du métier d'hydromètre :

- **Aucun jaugeage ne vaut la vie d'un jaugeur. Un jaugeur ne doit pas risquer sa vie pour tenter le « jaugeage du siècle ».**
- **La réduction ou la suppression du risque repose pour une grande partie sur le travail en binôme. Il permet une surveillance mutuelle, un partage des connaissances du terrain et de la prise de décision.**
- **Tous les risques des zones de travail doivent être identifiés que ce soit aux abords immédiats mais aussi en AVAL et en AMONT (par exemple : présence d'aménagements qui font varier rapidement le débit).**
- **La maîtrise de plusieurs techniques de jaugeages permet de réduire voire d'annuler le risque lors de la réalisation d'une mesure (par exemple : les techniques non intrusives dans l'écoulement).**
- **Une bonne préparation et l'organisation des journées de travail limitent la précipitation et l'effet de surprise. Avant le départ : connaître les prévisions météo et débits, choisir les matériels de travail et EPI adaptés aux conditions météo et en vérifier l'état.**
- **Avoir un téléphone portable et connaître les zones de bonne réception du réseau téléphonique.**
- **La routine bien qu'attirante est l'ennemie de la sécurité. Les hydromètres doivent rester vigilants, attentifs et appliquer les consignes de sécurité.**

8.3.2 Zoom sur le risque de chute à l'eau

Le risque de chute à l'eau est un des risques critiques pour les hydromètres. Les agents doivent avoir une attention permanente pour limiter le risque d'accident, qu'ils soient aux abords, dans ou sur le cours d'eau.

Un cours d'eau en aval d'un ouvrage hydroélectrique (barrage, usine) présente toujours un risque potentiel supplémentaire. Les lâchers d'eau nécessaires à la production électrique ou le maintien du débit peuvent à tout instant entraîner une montée rapide des eaux. Même par beau temps, il faut rester très prudent. Avant de partir, les intervenants doivent se mettre en rapport avec les gestionnaires des ouvrages du secteur, qui dans certains cas leur font signer une « Convention d'informations réciproques relative aux travaux dans le cours d'eau » qui permet de les tenir informés des manœuvres éventuelles. Le compagnonnage en matière de sécurité comme dans les autres domaines de l'hydrométrie est primordial car les risques d'un site ne sont pas tous visibles et évidents.

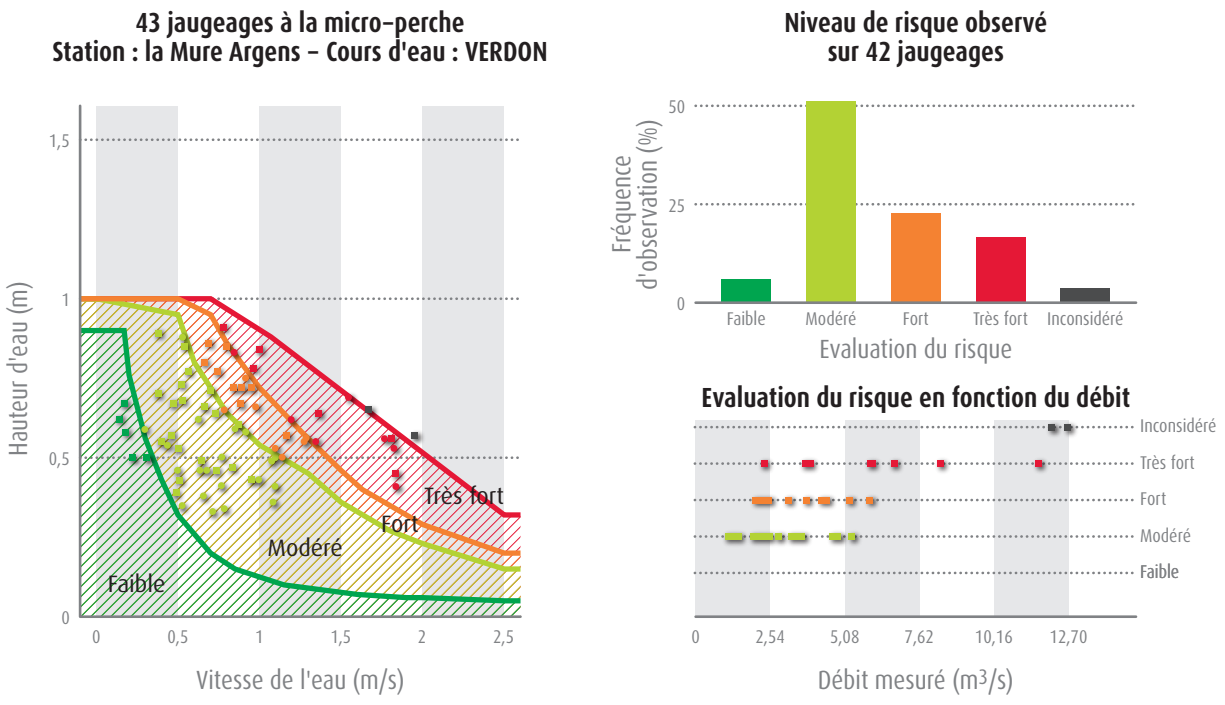
8.3.3 Quelques recommandations pour le travail en rivière

Les consignes suivantes peuvent tout à fait figurer dans une fiche « recommandations » :

- avant le départ, prendre le bulletin météo du jour ;
- vérifier l'état des EPI (gilet de sauvetage, etc.) ;
- choisir les vêtements en fonction des conditions météo (chaud, humide, froid) et du type de jaugeage (cuissarde, waders, etc.) ;
- repérer les zones de dangers (remous, trous, obstacles, ponts, barrage, etc.) ;
- sur place, choisir la technique de jaugeage (perche, ADCP, bateau) en fonction des conditions d'écoulement ;
- en cas d'orage quittez le cours d'eau et rejoignez votre véhicule.

Si le jaugeage est réalisé avec un agent dans l'eau : bien connaître ses capacités de déplacement dans l'eau en fonction du couple vitesse-hauteur d'eau et évaluer le besoin de porter un gilet de sauvetage. Le ressenti dépend du poids, de la taille de chaque agent et de la nature du fond de la rivière.

FIGURE 8.1 : ANALYSE HAUTEUR-VITESSE PERMETTANT DE DÉTERMINER LES CONDITIONS D'INTERVENTION (EDF – DTG)



Si le travail est embarqué : port du gilet de sauvetage obligatoire. Se référer au chef de bord qui doit être titulaire du permis adéquat et doit veiller à la présence de l'armement obligatoire et au bon état du bateau. C'est le chef de bord et lui seul qui décide de la possibilité ou pas de naviguer en fonction des conditions météo ou de débit. Surveiller la profondeur, les corps flottants et les autres embarcations.
À titre d'illustration, l'analyse-type réalisée par EDF-DTG sur son réseau de stations est présentée figure 8.1. L'utilisation des courbes de stabilité permet de définir, à partir de l'historique des jaugeages réalisés sur un site donné au courantomètre sur perche, le niveau de risque par gamme de débit. Une fiche spécifique est confectionnée pour chaque station. Utilisée lors de la préparation de l'intervention, elle permet d'anticiper le choix du moyen de mesure qui sera mis en œuvre en détaillant la nature du risque, les dommages, les actions de prévention et les formations.

⊞ TABLEAU 8.1 : SYNTHÈSE DES PRINCIPAUX RISQUES RENCONTRÉS

Nature du risque	Situation de travail	Niveau de risque	Actions de prévention	Suivi des actions de prévention
Chute à l'eau	Toutes activités dans l'eau, en bateau, sur les rives, du pont.		Formation gestion chute à l'eau, Formation pilotage bateau en condition difficile. Port EPI gilet de sauvetage. Travail en binôme. Corde de sauvetage	Recyclage tous les 2 ans Vérification gilet 1 fois / an
Chute de hauteur	Descente des camions, bord de rives, pont, travaux sur cordes		Formation travaux sur cordes Port EPI (harnais antichute)	Recyclage tous les 3 ans Vérification annuelle du matériel
Routier	Stationnement bord de route, Jaugeage sur ou bords de route		Stationnement en zone protégée Signalisation véhicule Formation Balisage chantier mobile Port EPI haute visibilité	
Routier	Trajet mission		Respect code de la route Stage conduite en situation difficile Rotation des conducteurs. Temps de conduite limité pause régulière toutes les 2 h max	
Chute de plein pied	Accès à la station, à la rivière		Vigilance si surface humide, Aménagement des accès (escalier, garde-corps, etc.). Fiche sécurité par station	Revue des accès tous les 5 ans
Charge physique	Manipulation charge lourde (batterie, appareil de mesure, etc.)		Réduction du poids des équipements. Utilisation engin de levage (brouette pour catamaran, etc.) Formation geste et posture Port EPI (chaussure sécurité, etc.)	Suivi annuel médecin de prévention
Outils et équipements de travail	Découpe métal, Installation station, Élagage		Sous traitance des gros chantiers. Formation élagage, Port des EPI (visière, manchette, gant, pantalon forestier, etc.)	Vérification annuelle des éléments de sécurité des appareils. Contrôle des EPI avant chaque utilisation
Incendie explosion	Utilisation et stockage de produit explosif		Charge des batteries dans un local dédié et ventilé. Stockage produits inflammables et explosifs dans armoire de sécurité Extincteur à disposition	Vérification annuelle des extincteurs
Armoire thermique/ climatique	Travail par forte chaleur ou froid		Adapter les horaires de travail. Véhicule climatisé. Pneus hiver. Hydratation. Port EPI (chapeau, lunette soleil, vêtement chaud, pluie) Consigne de protection : s'abriter, différer la mission, etc.	
Attaque animal, insecte, reptiles	Traversée de champ, hautes herbes, zone d'habitat		Se détourner des zones à risques. Formation premiers secours. Bombes anti-guêpes.	
Agents biologiques (virus, bactéries)	Contact avec l'eau des rivières		Éviter contact avec l'eau si blessure. Nettoyage régulier des mains. Vaccination et trousse premiers secours dans chaque véhicule.	
Électrique	Installation station, intervention sur circuit électrique		Respect norme installation électrique Protection des éléments nus sous tension Formation et habilitation électrique Port des EPI	Consuel à l'installation en 220V. Recyclage habilitation électrique tous les trois ans.
Manutention mécanique	Manipulation engin de levage (poutre saumon)		Respect des consignes d'utilisation Port des EPI (chaussures sécurité, gants, etc.)	Vérification annuelle des éléments de levage
Absence de possibilité de secours	Travail isolé ou en zone inaccessible		Fiche sécurité avec coordonnées pour chaque station. Relation avec service de secours départementaux. Dispositif d'alerte pour travailleurs isolés	

8.4. Quelques situations délicates



L'agent ne porte pas de gilet de sauvetage.



L'agent évolue sur une surface glissante sans être assuré et sans gilet de sauvetage.



La berge est train de s'effondrer sous l'effet du courant.



Moyen de mesure inadapté compte tenu du couple hauteur-vitesse.

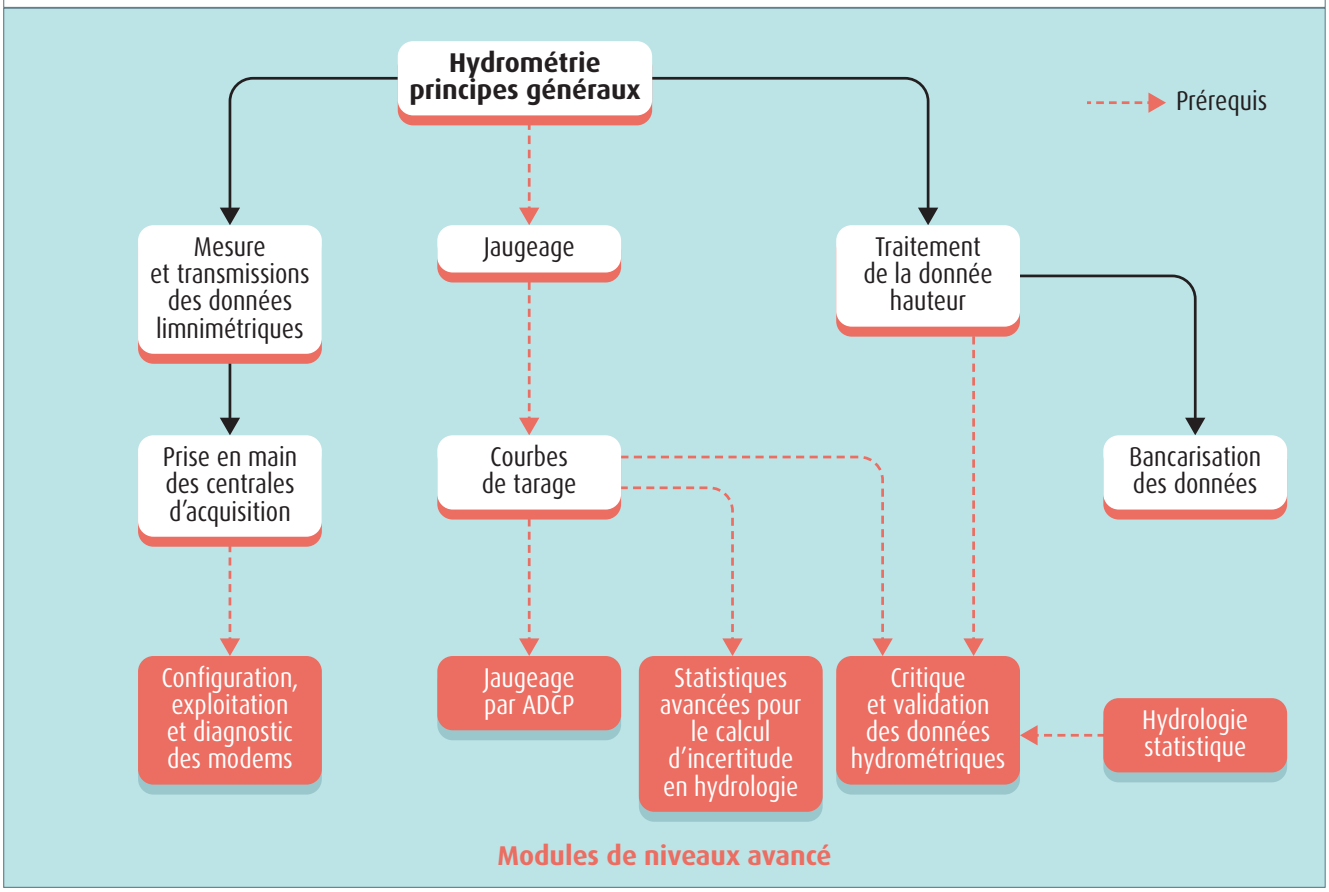
8.5. Formation en hydrométrie

Divers organismes proposent des formations continue en hydrométrie dont l'Ifore et l'OIEau.
La figure 8.2 montre un parcours type de formation en hydrométrie pour acquérir la majorité des compétences nécessaires à l'exercice du métier d'hydromètre.

8.6. Références

- Fiche travail & sécurité : les travaux au contact de l'eau
- Fiche INRS (Institut national de recherche et de sécurité) sur les Équipements individuels de flottaison
- Fiche spécifique sur la Leptospirose
- Information INRS sur les Zoonoses
- Informations sur la maladie de lyme

FIGURE 8.2 : EXEMPLE DE PARCOURS DE FORMATION CONTINUE POUR UN HYDROMÈTRE



Normes en hydrométrie

— chapitre 9

9.1. Qu'est-ce qu'une norme ?

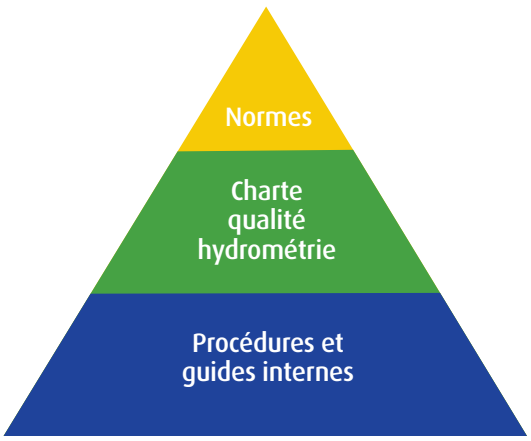
Une norme est un document de référence approuvé par un institut de normalisation reconnu tel que l'Association Française de NORmalisation (AFNOR).
Une norme définit des caractéristiques et des règles volontaires applicables aux activités de son champ d'application (ici l'hydrométrie). Il s'agit d'un langage commun entre acteurs d'un même champ d'activité. Une loi ou un règlement (qui relèvent tout deux des pouvoirs publics) ont une application imposée. Certaines normes peuvent soutenir la réglementation en étant citées comme documents de référence. Seul 1 % des normes sont d'application obligatoire.
La norme est issue d'un consensus, c'est-à-dire d'un accord général caractérisé par l'absence d'opposition ferme lors du processus de prise en considération des vues des parties concernées. Une norme traduit un engagement à satisfaire un niveau de qualité et de sécurité reconnu et approuvé. La conformité aux normes peut faire l'objet d'une déclaration du fournisseur sous sa seule responsabilité. Il s'engage par-là sur la qualité de sa production, de ses prestations ou de son organisation. Le fournisseur ou le client peut aussi demander que cette conformité soit attestée par un tiers (laboratoire, organisme d'inspection, organisme de certification, etc.), qui se charge de vérifier que le produit, le service ou le système concerné répond aux exigences de la norme.
L'AFNOR est le représentant français de la normalisation au niveau du CEN (Comité Européen de Normalisation) et de l'ISO (Organisation internationale de normalisation) auprès desquels elle défend les positions françaises (cf. Figure 9.1).

Les normes sont utiles aux différents acteurs du métier. Elles peuvent aider à :
- homogénéiser les méthodes et les pratiques et à mettre en place des procédures identifiées et conformes aux pratiques attendues ;
- minimiser des conflits juridiques ou réglementaires et faciliter le contrôle et la résolution de ces conflits ;
- définir des référencements techniques nationaux (prescriptions, cahiers des charges, etc.) ;
- apporter une visibilité nationale, européenne ou internationale ;
- bâtir des réglementations ;
- disposer d'arguments de vente ou de conformité pour les industriels ;
- bénéficier d'accréditations ou de qualifications par des organismes de contrôle reconnus pour les prestataires.

Les normes (comme les guides, procédures et référentiels divers) nécessitent des mises à jour. Elles se doivent d'être pertinentes, réactives et suivre les évolutions du métier. Lorsqu'elles ne le sont plus (ou pas encore), un autre document peut anticiper les évolutions, en rappelant la norme existante en cours et les écarts par rapport à celle-ci. C'est dans cet objectif que les travaux de la commission de normalisation en hydrométrie ont été relancés en 2014.

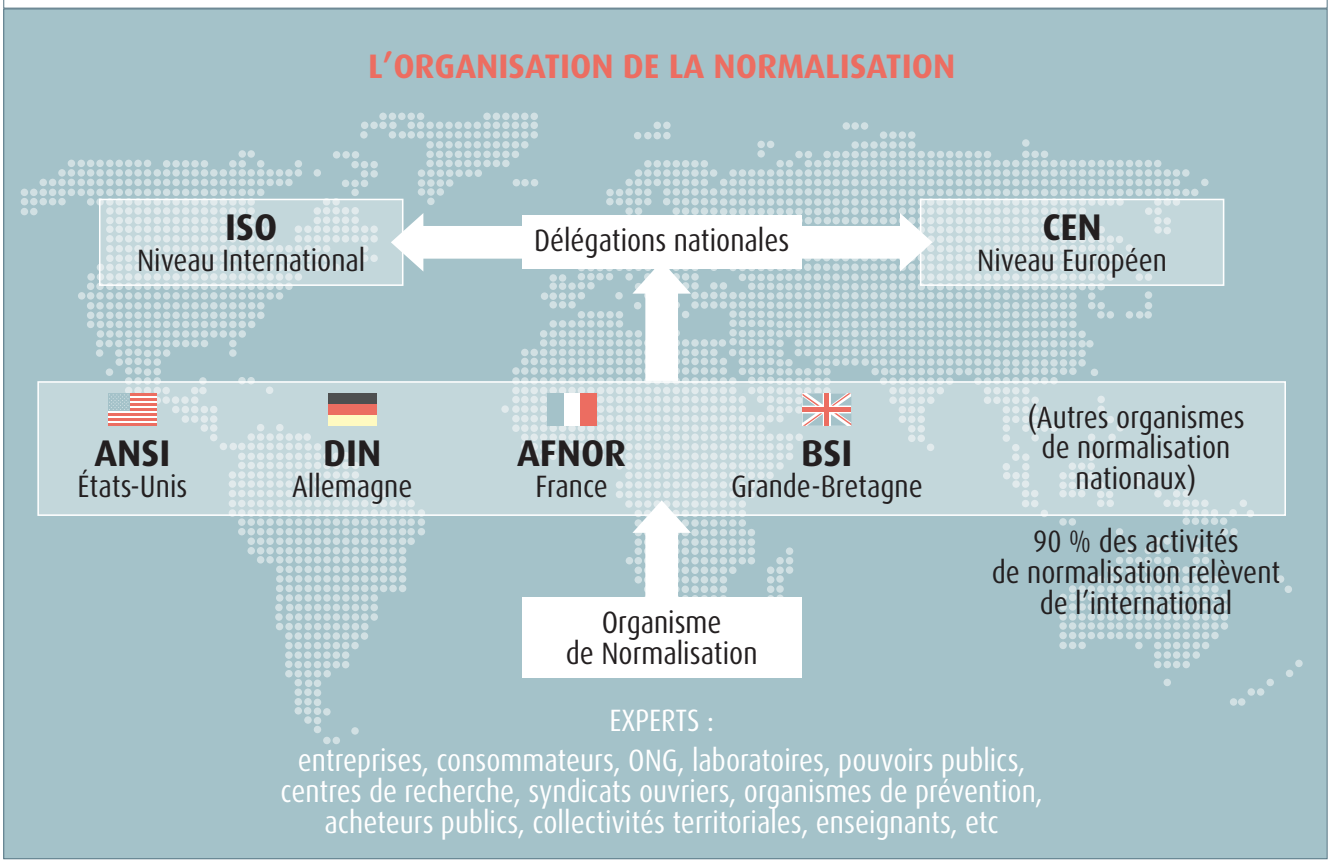
9.2. Normalisation en hydrométrie

La commission de normalisation nationale X10C « Hydrométrie » de l'AFNOR intervient pour la normalisation « des méthodes, procédures, instruments et équipements se rapportant aux techniques pour la détermination hydrométrique du niveau, de la vitesse et des écoulements de l'eau, des transports solides dans les canaux découverts, de la précipitation et de l'évapotranspiration, et de l'existence et du mouvement de la nappe superficielle, y compris :
- la terminologie et les symboles ;
- la recherche, l'évaluation, l'analyse, l'interprétation et la présentation des données ;
- l'évaluation des incertitudes. »



Dans le domaine de l'hydrométrie, aucune norme n'a de caractère obligatoire contrairement aux méthodes applicables à la surveillance DCE, qui sont prescrites par un arrêté ministériel.
Les normes en hydrométrie ne couvrent que certains aspects de la charte qualité. De même, la charte qualité n'aborde pas tous les détails que des procédures internes sont susceptibles de contenir. Alors que les procédures internes et la Charte qualité peuvent se référer aux normes, les normes ne peuvent pas se référer aux chartes ni aux procédures internes.

FIGURE 9.1 : L'ORGANISATION DE LA NORMALISATION (AFNOR)



La charte de qualité en hydrométrie est, comme les normes, le fruit d'un travail commun entre professionnels du même sujet. Cependant elle n'est pas validée par une instance de normalisation et son sujet est plus vaste que le périmètre d'une seule norme. Elle est moins prescriptive que les normes, l'objectif de la charte étant de dresser les bonnes pratiques. Il est toutefois important que les référentiels existants (guides, procédures, chartes, normes, etc.) ne soient pas en contradiction les uns par rapport aux autres.

Chaque intervenant en hydrométrie devrait connaître les normes applicables pour s'en inspirer lors de la mise au point de ses procédures internes, voire participer à l'amélioration des normes par son retour d'expérience sur ses pratiques. Ainsi, ces différents documents peuvent s'enrichir par ces allers-retours, voire susciter les progrès scientifiques ou techniques du domaine. Cela est d'autant plus important que les processus amenant à l'actualisation des normes sont plus longs que pour l'actualisation de la charte, eux-mêmes plus longs que les évolutions des procédures internes.

9.3. Fonctionnement de la normalisation

Les NF sont des textes nationaux français, les NF EN sont des textes européens repris dans la collection nationale, les NF EN ISO sont des normes internationales reprises en normes européennes et transcrites en textes français. Les normes sont accessibles sur les sites des organismes de normalisation via paiement (entre 50 et 150 euros selon les normes). La commission AFNOR X10C donne son avis sur les normes ISO lorsqu'elles sont en consultation. La reprise d'une norme internationale ISO dans la collection française fait l'objet d'un vote au sein de la commission X10C, alors que la reprise d'une norme européenne EN ou EN-ISO dans la collection française est automatique. Les normes nationales doivent, soit reprendre les textes normatifs européens s'ils existent, soit être compatibles avec ces textes européens. Les normes nationales en contradiction ou portant sur le même sujet et le même contenu qu'une norme européenne sont supprimées de la collection. Une norme homologuée (NF, NF EN ou NF EN ISO) reprise en collection française fait obligatoirement l'objet d'une consultation nationale via une enquête publique. Tout un chacun peut alors donner son avis sur le contenu technique du texte.

9.4. Références

• ISO : pour l'hydrométrie se rendre sur Élaboration des normes>Comités techniques> ISO/TC 113

• CEN : pour l'hydrométrie se rendre sur : standards.cen.eu > technical bodies > CEN/TC 318

• AFNOR : permet d'accéder aux normes et aux enquêtes publiques. Pour l'hydrométrie se rendre sur : Grand cycle de l'eau>Hydrométrie

TABLEAU 9.1 : LISTE DES NORMES À CONNAÎTRE EN HYDROMÉTRIE

NF-EN-ISO (Fr)	748:2009	Hydrométrie	Hydrométrie - Mesurage du débit des liquides dans les canaux découverts au moyen de moulinets ou de flotteurs
NF-EN-ISO (Fr)	18365:2014	Hydrométrie	Hydrométrie - sélection, établissement et exploitation d'une station hydrométrique
ISO	18320-en cours de validation	Hydrométrie	Hydrométrie - Détermination de la relation hauteur-débit
NF-ISO (Fr)	1070:1992	Hydrométrie	Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts - Méthode de la pente de la ligne d'eau.
NF-EN-ISO (Fr)	9555:1994 Parties 1 à 4	Hydrométrie	Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs
NF-EN-ISO	6416:2005	ADCP/ultrason	Hydrométrie - Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique
ISO	15769:2010	ADCP/ultrason	Hydrométrie - Lignes directrices pour l'application des compteurs de vitesse ultrasoniques fixes utilisant l'effet Doppler et la corrélation d'échos
ISO/TR	24578:2012	ADCP/ultrason	Hydrométrie - Profils Doppler acoustiques - Méthode et application pour le mesurage du débit en conduites ouverte
ISO/TR	1088:2007	Incertitudes	Hydrométrie - Méthodes d'exploration du champ des vitesses à l'aide de moulinets Recueil et traitement des données pour la détermination des incertitudes de mesurage du débit
ISO	5168:2005	Incertitudes	Mesure de débit des fluides - Procédures pour le calcul de l'incertitude
ISO/TS	25377:2007	Incertitudes	Lignes directrices relatives à l'incertitude en hydrométrie
ISO	3455:2007	Autres	Hydrométrie - Étalonnage des moulinets en bassins découverts rectilignes
NF-EN-ISO (Fr)	4373:2009	Autres	Hydrométrie - Appareils de mesure du niveau de l'eau

TR : Technical Report
TS : Technical Specification

Méthode pour estimer l'incertitude de la donnée

Approche statistique classique de l'incertitude : GesDyn

La formulation de l'incertitude proposée par GesDyn est directement inspirée de l'approche GUM. Les sources d'incertitudes sont identifiées et composées de manière quadratique. La formulation est donc classique et sans surprise. On suppose que la variable aléatoire modélisant le débit Q(h,t) suit une loi normale de moyenne μ(h) et de variance $\sigma^2(h,t)$.

Équation A1.1 :

$$Q(h,t) \sim N[\mu(h), \sigma^2(h,t)] \text{ où } \sigma^2(h,t) = Ir^2(h) + Se^2(h) + \sigma_A^2(h,t)$$

$\sigma_A^2(h,t)$ est la variance modélisant la variabilité de la relation hauteur-débit. Elle est estimée à partir de l'étude de la variabilité en fonction du temps des jaugeages autour d'un modèle de courbe de tarage moyen. L'homogénéité de la population des jaugeages doit être vérifiée au préalable. Une relation peut être très variable dans le temps tout en étant homogène : oscillations autour d'une position d'équilibre.

$Se^2(h)$ est la variance modélisant l'incertitude sur le tracé de la courbe de tarage. Elle prend en compte l'incertitude de chaque jaugeage. En pratique, elle est estimée en prenant les quantiles 15 et 85 % des N courbes de tarage calculées à partir des simulations de Monte Carlo dans le modèle d'incertitude des jaugeages de la population.

$Ir^2(h)$ est la variance modélisant l'incertitude sur la mesure de la hauteur. Elle prend en compte la sensibilité S de la relation hauteur-débit, l'incertitude P du capteur, l'incertitude de la dérive C de ce dernier et donc à la possibilité de recalage.

Équation A1.2 :

$$Ir^2(h) = S(h)\sqrt{P^2 + C^2}$$

Usuellement, on retient : P = C = 1 cm au seuil de confiance de 95 %.

Approche bayésienne de l'incertitude : BaRatin

Le logiciel BaRatin, compatible avec le logiciel BAREME[15], permet la construction de courbes de tarage avec estimation des incertitudes associées, en combinant une information a priori sur les contrôles hydrauliques et l'information contenue dans les jaugeages. Les résultats sont exprimés sous forme d'un grand échantillon de courbes de tarage possibles, permettant de calculer l'enveloppe d'incertitude au niveau de confiance souhaité (en général 95 %). Cette technique permet de propager les incertitudes sur les hydrogrammes à différents pas de temps, les indicateurs hydrologiques statistiques qui en sont tirés, et toute autre utilisation (modélisation hydrologique en particulier).
Les incertitudes des jaugeages sont considérées individuellement pour chaque jaugeage, même si des incertitudes forfaitaires par type de jaugeage peuvent être définies. Les incertitudes exprimées par l'utilisateur sur sa connaissance a priori des contrôles hydrauliques sont également prises en compte. Cette connaissance a priori, même très incertaine, permet de définir le nombre et la nature des contrôles (et donc l'équation de la courbe de tarage) ainsi que les distributions a priori des paramètres de cette équation.
Une courbe de tarage issue de BaRatin est issue d'un faisceau de courbes de tarage, chacune correspondant à un jeu de paramètres possible. Les paramètres sont ceux de l'équation de la courbe de tarage, θ1, ainsi que γ1 et γ2 qui permettent de définir l'écart-type de la loi normale selon laquelle l'erreur restante est échantillonnée. L'échantillonnage du i-ème hydrogramme calculé avec la i-ème courbe de tarage se fait selon l'équation suivante :

Équation A1.3 :

$$Q_i(t) = f\left(\overbrace{\tilde{h}(t) + \varepsilon_i^h(t) + \delta_i^h}^{h_i(t)} \mid \theta_i\right) + \varepsilon_i^f(t)$$

$\hat{Q}_i(t)$

$h_i(t)$: i-ème limnigramme échantillonné

$\tilde{h}(t)$: limnigramme mesuré

$\varepsilon_i^h(t)$: erreur non-systématique associée à la mesure de hauteur d'eau, échantillonnée à chaque pas de temps selon la loi normale $N(0, \sigma_A^h)$ où σ_A^h est l'écart type de l'erreur non-systématique

δ_i^h : erreur systématique associée à la mesure de hauteur d'eau, échantillonnée selon la loi normale $N(0, \sigma_B^h)$ et constante entre deux recalages du limnigraphe où σ_B^h est l'écart type de l'erreur systématique

θ_i : vecteur du i-ème jeu de paramètres de la courbe de tarage d'équation f

$Q_i(t)$: hydrogramme calculé avec la i-ème courbe de tarage et le i-ème limnigramme

$\varepsilon_i^f(t)$: erreur restante associée à la courbe de tarage, échantillonnée selon la loi normale $N\left(0, \gamma_{1,i} + \gamma_{2,i}\hat{Q}_i(t)\right)$

L'incertitude totale sur la courbe de tarage ainsi obtenue comporte deux composantes :
• l'incertitude « paramétrique », liée au calage des paramètres de l'équation de la courbe de tarage ;
• l'incertitude « restante » (ou « structurelle »), liée aux imperfections de l'équation utilisée pour représenter la réalité de la relation hauteur-débit sur le site de la station hydrométrique.
En plus de ces deux composantes d'incertitude liées à la courbe de tarage, l'incertitude totale sur l'hydrogramme (et les calculs hydrologiques dérivés) comporte deux composantes supplémentaires liées au limnigramme :
• l'incertitude liée aux erreurs non systématiques du limnigramme, ou erreurs indépendantes d'un pas de temps à l'autre (batillage, erreurs aléatoires du capteur) ; cette composante diminue rapidement avec l'agrégation temporelle .
• l'incertitude liée aux erreurs systématiques du limnigramme, ou erreurs constantes ou fortement corrélées par période entre deux recalages du limnigraphe sur l'échelle (écart entre capteur et échelle, écart entre niveau à l'échelle et niveau moyen dans la section) ; cette composante diminue lentement avec l'agrégation temporelle ;
La propagation de ces erreurs du limnigramme impacte plus ou moins fortement l'incertitude de l'hydrogramme et des calculs hydrologiques selon la sensibilité des contrôles hydrauliques de la station.

15. Logiciel utilisé par les services de l'Etat pour l'analyse des jaugeages et le tracé des courbes de tarage

— contributeurs

La rédaction de cette nouvelle édition de la Charte qualité Hydrométrie a été commanditée par le Schapi sous l'égide du CODOST (Conseil d'orientation scientifique et technique du réseau Vigicrues).
Rachel Puechberty (Schapi) en a assuré la maîtrise d'ouvrage.
Le comité de rédaction a été piloté par **Christian Perret**, (Groupe Doppler Hydrométrie) et **Stéphanie Poligot-Pitsch** (DREAL Pays de la Loire). Il était composé de : **Philippe Battaglia** (DREAL Grand Est, UH Meuse Moselle), **Arnaud Belleville** (EDF-DTG), **Pierre Bompart** (CNR), **Guillaume Chauvel** (DREAL Auvergne-Rhône-Alpes), **Jocelyn Cousseau** (DREAL Pays de la Loire), **Guillaume Dramais** (Irstea), **Gwen Glaziou**, (DREAL Normandie), **Alexandre Hauet** (EDF-DTG), **Stéphane Hélouin** (DREAL Normandie), **Michel Lang** (Irstea), **Frédérique Larrarte** (Ifsttar), **Jérôme Le Coz**, (Irstea), **Pierre Marchand** (IRD), **Pascal Moquet** (DREAL Grand Est, UH Champagne-Ardenne), **Olivier Payrastre** (Ifsttar), **Gilles Pierrefeu** (CNR) et **Gérard Rauzy** (DREAL Occitanie, UH Midi-Pyrénées).

Le comité de rédaction remercie tous les relecteurs du document, membres d'organismes institutionnels (Onema, DREAL, Schapi, Agences de l'eau, etc.) ou privés (CACG, CNR, EDF, etc.), en activité ou retraités, qui à travers leurs remarques, ont permis d'en améliorer la pertinence et la qualité.

Document consultable et téléchargeable sur le site www.eaufrance.fr.
Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Schapi doit être demandé.

Date de parution : Janvier 2017
Rédaction : Groupe Doppler Hydrométrie
Création graphique : Citizen Press
Photos : Irstea, CNR, EDF, DREAL, AQUI'BRIE, USGS, OHMCV
Illustration : Antoine Levesque
Impression : Delort Imprimerie
Cet ouvrage a été imprimé avec des encres végétales, sur papier PEFC issu de forêts gérées durablement, imprimeur certifié ISO 14001 et 26000.

Ministère de l'environnement de l'énergie et de la mer
Direction générale de la prévention des risques
Service des risques naturels et hydrauliques
Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations
42 avenue Gaspard Coriolis 31057 Toulouse cedex 01
Tél. 33 (0)5 34 63 85 50
schapi@developpement-durable.gouv.fr

VIGICRUES

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Environnement, de l'Énergie et de la Mer

irstea

eDF

GROUPE DOPPLER HYDROMÉTRIE

IFSTTAR

CNR