



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

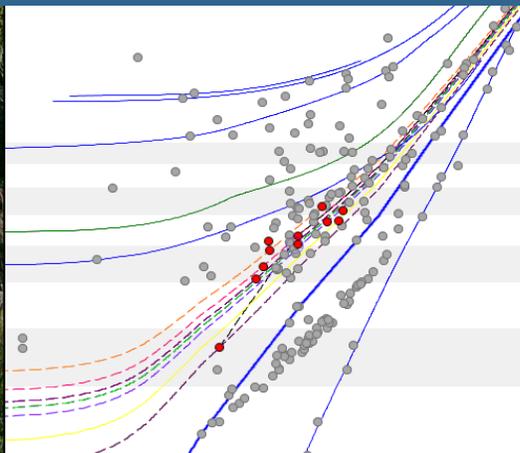


Manuel d'hydrométrie – Calculs des données

Élaboration et gestion des courbes de tarage



Relevés hydrologiques du Canada
Environnement and Changement climatique Canada
qSOP-NA049-01-2016



Auteur responsable : Relevés hydrologiques du Canada

Direction générale de la surveillance météorologique et environnementale
Publication autorisée par le sous-ministre adjoint,
Service météorologique du Canada

Sauf avis contraire, le contenu de ce document peut, sans frais ni autre permission, être reproduit en tout ou en partie et par quelque moyen que ce soit à des fins personnelles ou publiques, mais non à des fins commerciales.

On vous demande seulement :

- de faire preuve de diligence raisonnable en assurant l'exactitude du matériel reproduit;
- d'indiquer le titre complet du matériel reproduit et l'organisation qui en est l'auteur;
- d'indiquer que la reproduction est une copie d'un document officiel publié par le gouvernement du Canada et que la reproduction n'a pas été faite en association avec le gouvernement du Canada ni avec l'appui de celui-ci.

La reproduction et la distribution à des fins commerciales sont interdites sans l'autorisation écrite de l'administrateur des droits d'auteur de la Couronne du gouvernement du Canada, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (TPSGC). Pour de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec TPSGC au 613-996-6886 ou à l'adresse droitdauteur.copyright@tpsgc-pwgsc.gc.ca.

Photographies : © Environnement et Changement climatique Canada

© Sa Majesté la Reine du Chef du Canada,
représentée par la ministre de l'Environnement, 2016

English version also available.

Historique de révision du document

N° de la version	Date	Source	Description/justification des modifications
0	2012-12-17	CGO-H / NetOps / SCD	Version bêta
1	2016-04-14	National	Version 1 de l'information initialement présentée dans un chapitre des procédures précédemment publiées.

Table des matières

Terminologie.....	5
Avant-propos.....	6
1 Élaboration et gestion des courbes de tarage	7
1.1 Notions de base.....	7
1.1.1 Équation hydraulique simplifiée.....	7
1.1.2 Détection de conditions complexes.....	8
1.1.3 Contrôles de la relation hauteur-débit.....	9
1.1.3.1 Contrôle par section.....	9
1.1.3.2 Contrôle par chenal.....	10
1.1.3.3 Contrôle composé.....	10
1.1.3.4 Contrôle artificiel.....	10
1.1.3.5 Plaine inondable.....	11
1.1.4 Exposant de la relation.....	11
1.1.5 Décalage.....	12
1.1.6 Stabilité de la relation.....	12
1.2 Stratégie d'élaboration des courbes de tarage.....	13
1.2.1 Procédure générale d'élaboration.....	13
1.2.2 Énoncé des hypothèses du modèle.....	13
1.2.3 Choix et visualisation des mesures pertinentes.....	13
1.2.3.1 Choix des mesures.....	14
1.2.3.2 Taille de l'échantillon.....	14
1.2.3.3 Représentation graphique.....	15
1.2.4 Estimation des décalages.....	15
1.2.4.1 Essais et erreurs.....	15
1.2.4.2 Nivellement.....	16
1.2.5 Délimitation de chaque équation.....	16
1.2.6 Étalonnage des équations.....	17
1.2.6.1 Graphique des résidus.....	17
1.2.7 Étalonnage des transitions.....	18
1.2.8 Cotation des parties « estimées » de la courbe.....	19
1.3 Gestion.....	20
1.3.1 Détarage.....	20
1.3.1.1 Correction de détarage.....	20
1.3.1.2 Méthodes.....	21
1.3.1.2.1 Correction constante.....	21
1.3.1.2.2 Correction en section.....	21
1.3.1.2.3 Correction focalisée.....	22
1.3.1.2.4 Variabilité dans le temps.....	23
1.3.1.3 Procédure générale de correction.....	25
1.3.1.4 Détection.....	25
1.3.1.4.1 Écart par rapport à la courbe de tarage.....	25
1.3.1.4.2 Conditions observées lors de visites à la station.....	26
1.3.1.4.3 Hydrogrammes atypiques.....	26
1.3.1.4.4 Périodes d'instabilité antérieures.....	26
1.3.1.5 Conception.....	26
1.3.1.5.1 Hypothèse de détarage.....	26
1.3.1.5.2 Variation de la correction en fonction du niveau d'eau.....	27
1.3.1.5.3 Variation de la correction en fonction du temps.....	27
1.3.1.6 Application.....	28
1.3.2 Révisions.....	29
1.3.2.1 Extrapolation.....	29

1.3.2.1.1	Extrémité supérieure	29
1.3.2.1.2	Extrémité inférieure	30
1.3.2.2	Modification d'un segment	30
1.4	<i>Métadonnées sur la courbe de tarage</i>	31
1.4.1	Identification	31
1.4.2	Description	31
1.4.3	Mesures d'étalonnage	32
1.4.3.1	État du contrôle.....	32
1.4.4	Correction de détarage	33
1.5	<i>Mise en œuvre de la courbe de tarage</i>	34
1.5.1	Période d'application	34
1.5.2	Transition entre deux courbes de tarage	34
	<i>Références</i>	35

Terminologie

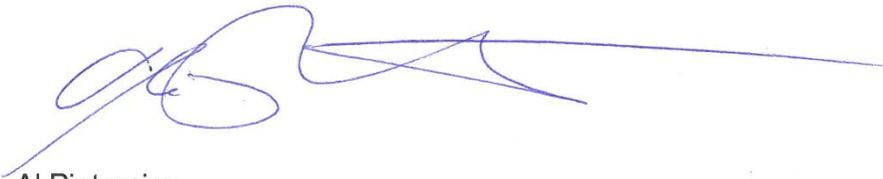
Analyse de station	Description des décisions prises durant lors du calcul des données, expliquant comment les données finales ont été produites.
Contrôle	Somme des caractéristiques hydrauliques en aval de la station de jaugeage qui influent sur l'écoulement et déterminent la relation hauteur-débit.
Cotation	Information associée de façon permanente aux données pour expliquer certaines de leurs caractéristiques.
Débitance	Débit d'eau maximum d'un chenal selon les caractéristiques physiques, telles que sa section transversale et sa rugosité.
Décalage	Nombre soustrait de toutes les valeurs du niveau d'eau afin que la relation hauteur-débit forme une ligne droite sur un graphique log-log.
Données approuvées	Meilleures données produites à partir de l'information disponible selon les normes et procédures établies. Synonyme : données finales.
Données en temps réel	Données préliminaires publiées sur Internet dès la réception des données par télémétrie et l'application automatique des corrections et des modèles. Elles représentent les meilleures données disponibles sur les conditions actuelles à la station.
Estimé	Cotation dénotant une incertitude plus élevée que la norme pour les données ainsi marquées.
Hydrogramme	Représentation graphique de la variation dans le temps du débit.
Hystérésis	Phénomène par lequel la relation hauteur-débit ne peut être définie sans tenir compte de paramètres supplémentaires comme la pente de la surface de l'eau ou le taux de variation du débit.
Jaugeage de vérification	Mesure de débit supplémentaire faite lors d'une visite de station afin de contrôler l'exactitude d'une mesure de débit qui s'écarte de la valeur attendue.
Limnigramme	Représentation graphique de la variation dans le temps de la hauteur d'eau.
Niveau de débordement	Niveau d'un cours d'eau à partir duquel les berges sont submergées.
Période d'approbation	Période au cours de laquelle les données pour une période donnée passent du statut provisoire au statut final.
Préliminaire	Statut de publication qui qualifie les données qui sont les meilleures disponibles, mais dont le traitement n'est pas terminé.
Production en continu	Procédure par laquelle les données sont améliorées le plus rapidement possible après la dernière visite à la station.
Publication	Tout moyen, temporaire ou permanent, par lequel des données sont mises à la disposition de clients et d'utilisateurs.
Refoulement	Accroissement de la hauteur d'eau dans une rivière possiblement sur une grande distance en amont et à cause d'une obstruction.
Responsable des calculs	Personne responsable de la production des informations hydrométriques pour une station donnée.
Segment	Région de la courbe hauteur-débit qui est régie par un seul type de contrôle, correspondant à une équation hydraulique précise.
Transition	Région de la courbe hauteur-débit qui est régie par plus d'un type de contrôle et qui ne correspond à aucune équation hydraulique précise. Synonyme : Contrôle hydraulique composé.
Validation	Procédure par laquelle un autre technologue examine des données hydrométriques pour assurer leur conformité aux normes et procédures établies.

Avant-propos

Relevés hydrologiques du Canada est l'organisme fédéral chargé de recueillir, d'interpréter et de diffuser les données et l'information hydrométriques au Canada. C'est un organisme respecté, fier de ses traditions et des réalisations qu'il a accomplies en plus de 100 années d'existence, mais aussi progressiste par ses positions. En tant qu'organisation certifiée ISO 9001, Relevés hydrologiques du Canada souscrit au principe d'amélioration continue.

L'adoption de pratiques normalisées pour l'élaboration et la gestion des courbes de tarage hauteur-débit est essentielle à la réalisation de notre mandat. S'appuyant sur les meilleures références disponibles, le présent document a été rédigé en consultation étroite avec des experts théoriciens et opérationnels des Relevés hydrologiques du Canada et d'ailleurs au monde. Ce document de pratiques normalisées décrit les techniques permettant à nos employés de toujours produire des données fiables fondées sur de solides connaissances scientifiques et notre réalité opérationnelle.

Bon nombre de nos employés et de nos collaborateurs au sein d'autres organismes, d'universités et d'entreprises privées ont contribué à l'élaboration du document. Nous les remercions tous, et nous sommes convaincus que le document nous aidera à maintenir notre réputation d'excellence durant les années à venir.



Al Pietroniro
Directeur, Services hydrologiques nationaux
Mars 2016

1 Élaboration et gestion des courbes de tarage

Les courbes de tarage sont des relations servant à modéliser le débit en fonction d'une ou de plusieurs variables. Le présent document a pour but de montrer au technologue comment élaborer et gérer des modèles hauteur-débit simples. Le document n'aborde pas les techniques requises pour élaborer des modèles de tarage complexes, mais il présente les critères permettant d'identifier les cas où ces techniques sont nécessaires.

1.1 Notions de base

Pour établir des courbes de tarage hauteur-débit, il est essentiel de connaître les notions de base concernant l'écoulement en chenal à surface libre. En effet, l'élaboration de ces courbes nécessite un jugement éclairé pour interpoler entre les mesures et extrapoler au-delà des valeurs mesurées.¹ Le *responsable des calculs* doit avoir une formation suffisante, ce qui signifie habituellement avoir suivi les leçons pertinentes dans le cadre du programme d'apprentissage ou de formation professionnelle.

1.1.1 Équation hydraulique simplifiée

Les procédures de Relevés hydrologiques du Canada (RHC) supposent que les courbes hauteur-débit peuvent être axées sur l'équation hydraulique simplifiée de Manning présentée plus bas. L'équation hydraulique simplifiée repose sur l'hypothèse d'un écoulement constant et uniforme à surface libre. Lorsqu'il est possible d'appliquer l'équation, elle produit des données de haut niveau de confiance parce qu'il y a peu de variation et d'interprétation dans la construction de la courbe. La relation est habituellement apparente et facile à modéliser. Les courbes de tarage simples peuvent comprendre plusieurs segments qui définissent généralement des zones de *contrôle*, correspondant à des niveaux d'eau bas, moyens et élevés (débordement), lesquelles sont reliées par de courtes *transitions*.²

Dans la plupart des cas, le choix judicieux d'un site de jaugeage permet de respecter l'hypothèse de l'équation hydraulique simplifiée, mais cela doit être régulièrement vérifié. Environ 75 % des stations de jaugeage des RHC présentent des conditions de modélisation simple.³ Les critères énumérés à la section 1.1.2 (Détection de conditions complexes) permettent de déterminer si l'hypothèse n'est pas respectée et si des ressources supplémentaires sont alors nécessaires pour utiliser un autre modèle.

L'équation hydraulique simplifiée peut être exprimée comme suit :

$$Q = C(H - h_o)^b \quad (1-1)$$

- Q est le débit.
- $H-h_o$ est la profondeur effective de l'eau (charge hydraulique), où H est la hauteur de l'eau à la jauge par rapport au plan de référence de la station, et h_o est la hauteur à la jauge d'un écoulement nul, également appelée *décalage*.
- C est le paramètre d'étalonnage qui dépend de la largeur, de la pente, de la rugosité du lit et d'autres caractéristiques du chenal.
- b est le paramètre d'étalonnage qui dépend de la géométrie de *contrôle* et qui est appelé l'exposant de la relation lorsque celle-ci est présentée sous forme logarithmique.

L'équation hydraulique simplifiée devient linéaire lorsqu'on lui applique une transformation logarithmique. Ainsi, sur un graphique log-log, l'exposant b est la pente, et $\log(C)$ est l'ordonnée à l'origine.

$$\log(Q) = \log(C) + b \log(H - h_o) \quad (1-2)$$

¹ WMO No. 1044, Volume 2, page 1.1

² Kennedy (1984)

³ Environment Canada (2015)

1.1.2 Détection de conditions complexes

Environ 25 % des stations de jaugeage des RHC présentent des conditions de tarage complexes.⁴ Les principales relations hauteur-débit complexes sont les suivantes :

- relations non linéaires (sur un graphique log-log), car elles ne peuvent être modélisées au moyen de l'équation hydraulique simplifiée de Manning;
- relations non univoques, c.-à-d. que différentes valeurs du débit sont possibles pour une hauteur donnée;
- relations très instables, c.-à-d. que la fréquence des visites à la station est insuffisante pour caractériser la relation qui évolue rapidement.

Les conditions à une station pourraient avoir changé depuis qu'une relation y a été établie, de sorte que la méthode simple ne fonctionnerait pas. Les mesures obtenues aux stations où les conditions sont complexes peuvent présenter des variations qui ne sont pas bien comprises ou dont il est difficile de tenir compte dans l'établissement de la relation. La figure 1 montre les effets de différentes conditions hydrauliques sur la relation.

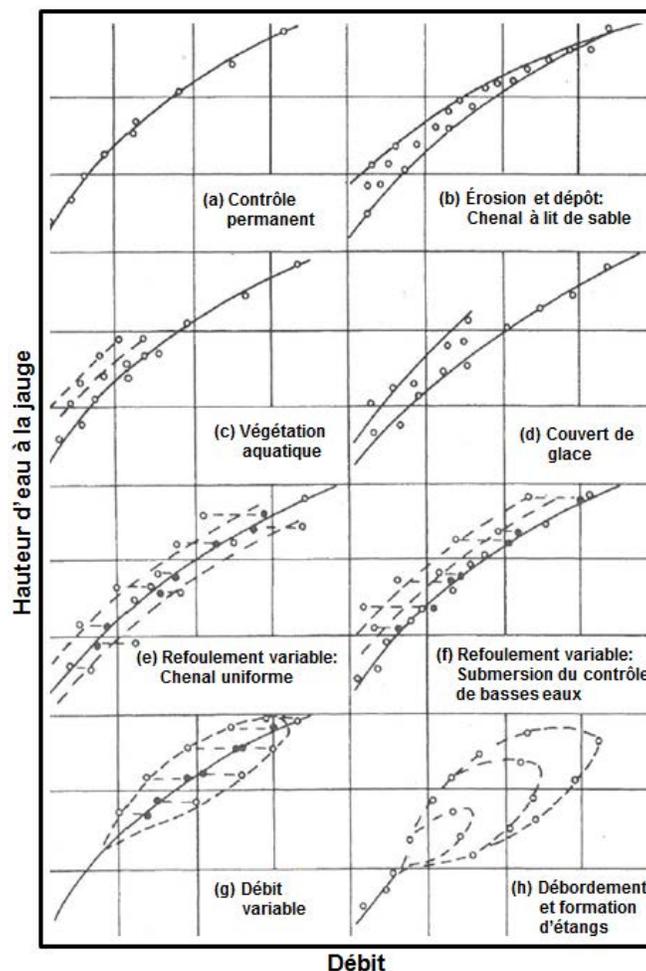


Figure 1. Effets de différentes conditions hydrauliques sur la relation hauteur-débit exprimée en coordonnées arithmétiques (graphique tiré de Herschy, 1995).

Les conditions complexes doivent être identifiées parce que l'établissement d'une relation complexe nécessite un niveau d'expertise plus grand que celui de la plupart des technologues ainsi qu'une méthode de modélisation différente de celle préconisée dans les procédures générales des RHC. Le *responsable des calculs* doit examiner les observations de terrain afin de déceler tout écart important par rapport aux

⁴ Environnement Canada (2015)

hypothèses pour une relation simple. Si la réponse à une des questions suivantes est affirmative, le *responsable des calculs* doit transmettre l'information à son supérieur pour déterminer s'il faut utiliser une autre méthode de modélisation :

1. Un *refoulement* variable influe-t-il sur le *contrôle*?
 - Un *refoulement* variable se produit lorsque l'écoulement est obstrué en aval, ce qui fait monter le niveau d'eau indépendamment du débit. Les causes de *refoulement* variable comprennent des réservoirs, des tributaires, la marée, des barrages en aval ou toute autre obstruction qui influe sur l'écoulement au point de *contrôle* de la station (figure 1-e et f). Les effets du *refoulement* variable diffèrent des effets saisonniers de la végétation ou de la glace (figure 1-c et d).
2. Les épisodes de montée ou de baisse rapide du niveau d'eau présentent-ils des signes d'*hystérésis*?
 - L'*hystérésis* (courbe en boucle) est le phénomène par lequel la relation hauteur-débit ne peut être définie sans tenir compte de paramètres supplémentaires comme la pente de la surface de l'eau ou le taux de variation du débit (figure 1-g). L'*hystérésis* peut se produire à tous les sites, mais elle est plus prononcée pour les rivières à faible pente. Lorsque le niveau d'eau change rapidement, la pente de la surface de l'eau n'est pas la même qu'en régime d'écoulement stable, ce qui se traduit par une accélération ou une décélération de l'écoulement et invalide les hypothèses dont dépend la relation simple.⁵
3. La rivière déborde-t-elle souvent?
 - L'écoulement de débordement dépend d'interactions complexes entre le chenal principal et la plaine inondable (débordement et formation d'étangs, figure 1-h). Il est difficile de représenter ces interactions par une équation simple.⁶ De plus, la partie supérieure de la courbe représente mal le débordement dans la plaine inondable parce qu'une petite variation de la hauteur crée alors une grande variation du débit.
4. Les mesures d'étalonnage s'écartent-elles régulièrement de plus de 5 % des valeurs prédites?
 - Dans ce cas, la relation n'offrirait qu'une faible capacité de prévision (voir la section 1.1.6 - Stabilité de la relation).⁷
5. Est-il difficile d'ajuster une équation aux observations de terrain?
 - Le graphique des résidus pourrait révéler des tendances ou des biais, ce qui suggérerait que d'autres variables influent sur la relation hauteur-débit (voir la section 1.2.6 - Étalonnage de l'équation).

1.1.3 Contrôles de la relation hauteur-débit

La relation hauteur-débit est régie par les caractéristiques fluviales influant sur l'écoulement qui se trouvent en aval de la station. On appelle *contrôle* l'ensemble de ces caractéristiques. Un *contrôle* peut être naturel ou consister en un ouvrage construit à des fins de surveillance hydrométrique ou autres.

Les faibles débits sont habituellement régis par un *contrôle par section*, et les forts débits, par un *contrôle par chenal*. Les débits moyens peuvent être soumis à une combinaison de différents contrôles, on parle alors de *contrôle composé*. Les forts débits suivent d'autres lois physiques que ce que l'équation hydraulique simplifiée décrit lorsqu'ils débordent dans la *plaine inondable*.

1.1.3.1 Contrôle par section

Un *contrôle par section* peut être exercé par une structure naturelle (p. ex. un seuil rocheux, un banc de sable, un étranglement du chenal ou une accumulation de débris) ou artificielle, tels un petit barrage, un canal, un

⁵ WMO 1044, Vol 2, p.1-3

⁶ ISO 1100-2, p.5

⁷ Pyle (1999), p. 29

déversoir ou un évacuateur de crues). On identifie une section de contrôle par la présence d'un rapide ou de toute baisse marquée de la surface de l'eau s'écoulant au-dessus d'une structure. Il arrive, lorsque le niveau d'eau augmente avec le débit, que ce type de contrôle devienne submergé au point de ne plus régir la relation.⁸

1.1.3.2 Contrôle par chenal

Un contrôle par chenal est défini par une combinaison de caractéristiques qui s'étendent sur l'ensemble du tronçon en aval de la station de jaugeage. Ces caractéristiques comprennent la taille, la sinuosité et la pente du chenal ainsi que la forme et la rugosité de son lit. La longueur d'un chenal de contrôle varie selon la pente du chenal et le débit. Toutefois, il n'est souvent pas possible ni utile de connaître sa longueur.⁹

1.1.3.3 Contrôle composé

La relation entre la hauteur et le débit est parfois régie par plus d'un type de contrôle. Cette situation, désignée *transition*, se produit habituellement sur un court intervalle de hauteur entre différents types de contrôle. Les *transitions* ne correspondent à aucune équation précise. Elles sont définies empiriquement.

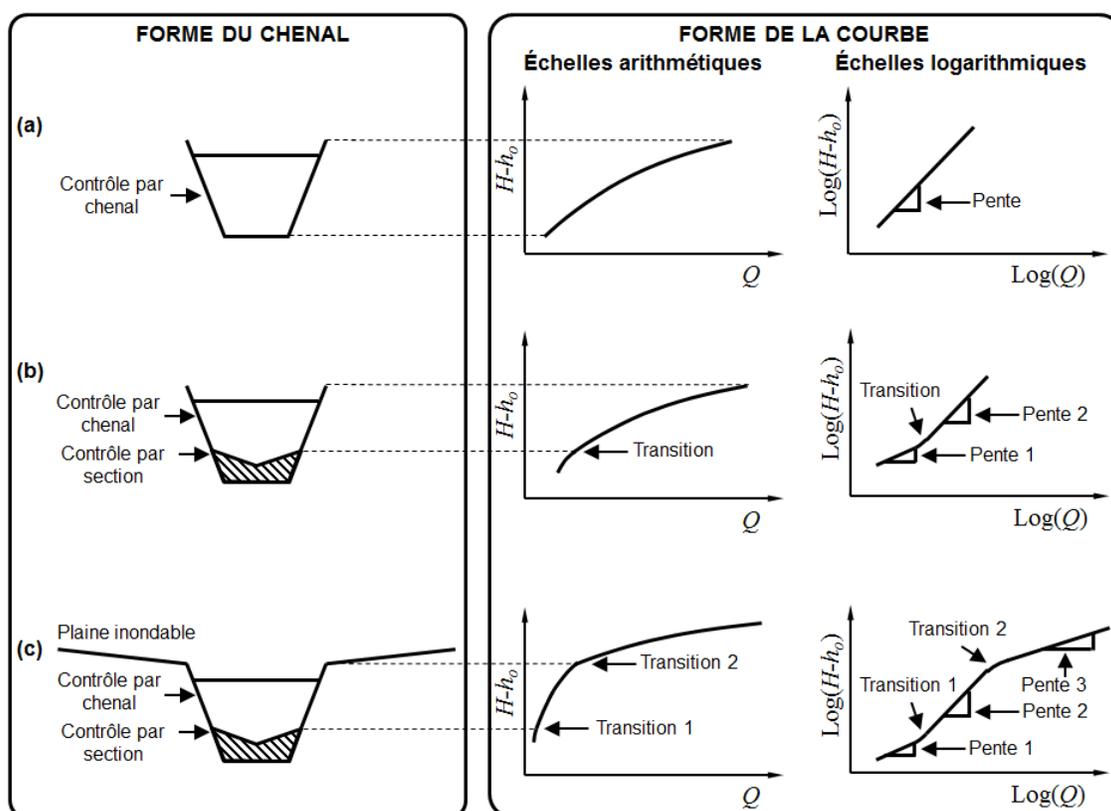


Figure 2. Relation entre les propriétés du contrôle et la forme de la courbe de tarage. (a) Contrôle par un chenal trapézoïdal sans plaine inondable : la courbe est constituée d'un seul segment sur toute l'étendue des hauteurs. (b) Contrôle par section et contrôle par un chenal trapézoïdal : la courbe change lorsque le niveau d'eau dépasse la hauteur de la section de contrôle. (c) Contrôle par section, contrôle par un chenal trapézoïdal et contrôle par la plaine inondable : la courbe est constituée de trois segments et de deux *transitions*. (Adapté de WMO No.1044, vol. 2)

1.1.3.4 Contrôle artificiel

Un contrôle par section ou par chenal peut être artificiel, c.-à-d. qu'il est exercé par un ouvrage d'origine humaine. Ce type de contrôle (p. ex. un déversoir) présente d'importants avantages pour l'élaboration des courbes de tarage parce que sa représentation mathématique peut être entrée directement dans le système

⁸ WMO 1044, Vol 2, p.1.2
⁹ WMO 1044, Vol 2, p.1.2

de calcul des données. En outre, la courbe de tarage peut être extrapolée de façon exacte et efficace en fonction des données de contrôle artificiel pourvu que l'eau s'écoule dans les limites de l'ouvrage.

1.1.3.5 Plaine inondable

Un contrôle par la plaine inondable dépend de caractéristiques semblables à celles d'un contrôle par chenal. Toutefois, les débordements de rivières sont susceptibles de modifier toutes les caractéristiques de contrôle sauf les plus durables. De plus, lors d'un débordement, le débit risque de ne plus dépendre seulement du niveau de l'eau puisqu'il peut y avoir stockage dans la plaine inondable et un effet accru de *refoulement* variable ou d'*hystérésis*. Une telle situation limite l'utilisation d'un modèle simple.^{10 11}

1.1.4 Exposant de la relation

L'exposant de la relation (b) dépend de la forme de la section transversale du chenal. L'exposant est important durant l'élaboration préliminaire d'une nouvelle courbe de tarage.¹² Sa valeur obtenue durant l'étalonnage devrait être plausible (voir le tableau 1).

Tableau 1. Valeurs de l'exposant de la relation (b) attendues pour une géométrie de contrôle donnée

Forme	Valeur de l'exposant b
Triangulaire	2,5 à 3,0
Parabolique	1,7 à 2,3
Rectangulaire	1,3 à 1,8

L'exposant associé à une section de contrôle dans une rivière étroite et profonde est habituellement supérieur à 2 et peut même dépasser 3.¹³ Pour les rivières relativement larges soumises à un contrôle par chenal, l'exposant de la relation varie généralement entre 1,3 et 1,8.

À mesure que le niveau d'eau augmente, certains contrôles sont submergés, et de nouveaux apparaissent successivement. Lorsqu'une rivière déborde, plusieurs nouveaux facteurs influent sur la relation. Le principal est la hausse rapide de la section transversale mouillée, ce qui signifie que, pour une même hausse du niveau d'eau, le débit augmente beaucoup plus que lorsque le niveau est bas. En général, cette situation se traduit par un exposant plus élevé pour les contrôles en hautes eaux que ceux en eaux basses et par un aplatissement de la courbe sur un graphique arithmétique.¹⁴

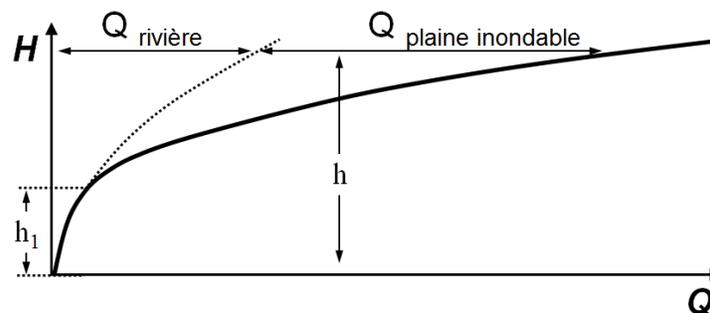


Figure 3. Courbe de tarage (valeurs arithmétiques) pour une rivière avec plaine inondable (tirée de Boiten, 2008)

Les valeurs étalonnées des exposants s'écartent souvent des valeurs théoriques du tableau 1. Puisqu'un chenal naturel est rarement régulier ou symétrique, il est difficile de déterminer quelle géométrie représenterait bien la situation sur le terrain. De plus, la vitesse ou la charge hydraulique au point de contrôle peut élever la valeur d'un exposant au-delà de ce qu'il serait s'il était calculé en fonction de la géométrie seulement.

¹⁰ Boiten (2008)

¹¹ Herschy (2009), p.159

¹² Herschy (2009), p.168

¹³ Herschy (2009), p.168

¹⁴ Herschy (2009), p.159

1.1.5 Décalage

Dans l'équation hydraulique simplifiée, la variable h_o désigne le *décalage*, soit la hauteur à laquelle l'eau cesse de couler à la section de contrôle. Pour un contrôle par chenal, le terme $H-h_o$ correspond au rayon hydraulique. On doit déterminer le *décalage* de façon à ce que toutes les mesures pour une équation donnée forment une ligne droite sur un diagramme logarithmique; pour chaque équation, il n'existe qu'une seule valeur de *décalage* qui permet d'aligner les données sur un segment.¹⁵ Notons que le *décalage* n'est pas nécessairement le même pour tous les segments d'une courbe de tarage.¹⁶

La valeur du *décalage* associé à un contrôle par section devrait correspondre au niveau le plus bas auquel on peut observer un écoulement. Pour les niveaux plus élevés, le *décalage* représente souvent une notion mathématique qui n'a aucun lien avec une propriété physique du contrôle, ce qui serait le cas pour un contrôle par chenal.

Les valeurs de *décalage* sont habituellement positives et augmentent lorsqu'on passe du segment de contrôle d'eau basse aux segments de hautes eaux, mais l'inverse n'est pas impossible. Un *décalage* négatif est anormal puisqu'il indique que la hauteur à la jauge d'un écoulement est inférieure au plan de référence de la station.¹⁷

1.1.6 Stabilité de la relation

Une relation hauteur-débit stable est une relation qui ne varie pas de façon définitive ou significative avec le temps. Une relation stable est associée à des structures stables de contrôle par chenal et section telles qu'un affleurement rocheux, un ouvrage artificiel comme un déversoir ou un petit barrage.¹⁸ Une complète stabilité est rare puisque tout chenal évolue constamment par érosion et dépôt de sédiments. À certains sites, les caractéristiques de contrôle comme la géométrie et les propriétés de friction varient constamment.¹⁹ Aux sites où la relation est très instable, il serait possible d'appliquer l'équation hydraulique simplifiée, mais elle ne permettrait alors qu'une estimation de la position temporaire de la courbe de tarage entre les mesures de débit disponibles.²⁰ Il est à noter qu'instable ne signifie pas nécessairement complexe. Une relation simple peut évoluer rapidement.

¹⁵ USGS 4044, p.40, Section 7.7.6.2

¹⁶ Braca (2008)

¹⁷ WMO 1044, Vol.2, p.6-25

¹⁸ Braca (2008), p.9

¹⁹ ISO 1100-2, p.11

²⁰ ISO 1100-2, p.11

1.2 Stratégie d'élaboration des courbes de tarage

L'élaboration d'une courbe de tarage est un processus continu. Il s'agit de faire des observations et mesures systématiques des caractéristiques de contrôle du site. Les données obtenues servent à formuler une hypothèse qui sera vérifiée, et modifiée le cas échéant, en fonction de futures observations et mesures. Le rôle du *responsable des calculs* est de définir un modèle qui s'ajuste bien aux données empiriques et aux hypothèses concernant les conditions hydrauliques du site.

1.2.1 Procédure générale d'élaboration

L'élaboration d'une nouvelle courbe de tarage ou la révision d'une courbe existante est un processus itératif et déductif qui ne suit pas un ordre séquentiel strict. Néanmoins, il est recommandé de suivre les sept étapes suivantes :

1. Énoncé des hypothèses du modèle.
2. Choix et visualisation des mesures pertinentes.
3. Estimation des *décalages*.
4. Délimitation de chaque équation.
5. Étalonnage des équations.
6. Étalonnage des *transitions*.
7. Détermination des parties « estimées » de la courbe.

À toutes ces étapes, il est essentiel de bien documenter toute décision prise et tous les détails. Voir la section 1.4 (Métadonnées sur la courbe de tarage).

1.2.2 Énoncé des hypothèses du modèle

Des hypothèses clairement énoncées aideront à élaborer efficacement un modèle de tarage robuste. Elles orienteront les futurs travaux de surveillance qui permettront d'affiner les hypothèses.

Le *responsable des calculs* doit d'abord chercher à établir le modèle le plus simple qui convient à toute l'information disponible sur le site. On peut utiliser plusieurs contrôles, mais il faut justifier une telle complexité du modèle. Si le modèle comporte trop de segments, le bruit inhérent aux mesures peut accroître l'incertitude des valeurs calculées par le modèle.²¹

Il faut passer en revue toutes les observations disponibles et principes hydrauliques qui s'appliquent au site afin de déterminer les aspects suivants :

- les contrôles qui influent sur l'écoulement
 - leur nombre;
 - leur type, avec une description de leurs effets probables sur l'écoulement;
 - les hauteurs d'eau auxquelles chaque contrôle s'applique;
- les hauteurs d'eau pour lesquelles les hypothèses sont ambiguës et qui devraient faire l'objet d'une étude approfondie.

Le *responsable des calculs* doit énoncer clairement les hypothèses et les documenter dans l'*analyse de station*. Voir les détails à la section 1.4 (Métadonnées sur la courbe de tarage).

1.2.3 Choix et visualisation des mesures pertinentes

Le *responsable des calculs* doit déterminer toutes les mesures à utiliser pour élaborer une courbe de tarage. Il doit documenter cette information pour la rendre disponible pour des vérifications futures.

²¹ NIST/SEMATECH (2012), section 4.4.2.2

1.2.3.1 Choix des mesures

Le *responsable des calculs* doit chercher à créer un échantillon de mesures d'étalonnage qui soit non biaisé et représentatif de conditions d'écoulement à surface libre constant et uniforme. Comme on dispose habituellement de relativement peu de mesures (souvent moins de 30), seul un écart considérable par rapport à une distribution normale est détectable.²² De l'interprétation est donc essentielle pour élaborer une courbe de tarage à partir d'un nombre limité de mesures choisies.

Pour choisir les mesures à utiliser, il faut soigneusement examiner l'information recueillie dans les notes de relevé hydrométrique, ainsi que les détails des mesures. Il faut choisir les mesures qui respectent les critères suivants :

- Les mesures ont été faites dans des conditions d'écoulement à surface libre constant et uniforme. Lors de ces mesures, aucun détarage ne devrait être observé. Un détarage peut être attribuable à l'accumulation de débris ou de sédiments, à des activités humaines ou animales, à de la végétation, à de l'érosion ou à de la glace.²³ Voir les détails à la section 1.4.3.1 - Conditions de contrôle).
- Les mesures ont été faites selon les procédures normalisées ou, si ce n'est pas le cas, les mesures ont été validées par un *jaugeage de vérification*, comme pour toute mesure faite dans des conditions atypiques ou qui s'écarte de plus de 5 % de la valeur prédite.²⁴ Les mesures qui s'écartent beaucoup des autres résultats ne peuvent être omises qu'avec une bonne justification rationnelle et, si possible, après consultation auprès des personnes qui ont fait ces mesures.²⁵

On peut également choisir des mesures historiques faites lors de conditions rarement observées (p. ex. hautes eaux).²⁶ Il faut s'assurer de les ramener au plan de référence verticale actuel avant de s'en servir dans les calculs. Elles ne doivent pas présenter de biais lié à des changements technologiques ou méthodologiques. La morphologie de la rivière ne doit pas non plus avoir été fortement modifiée au site (p. ex. par un nouveau pont ou un glissement de terrain) depuis l'obtention de ces mesures.²⁷

Toutes les mesures retenues doivent être identifiées dans les métadonnées de la courbe de tarage. Voir les détails à la section 1.4.

1.2.3.2 Taille de l'échantillon

Le niveau de complexité présumé pour toute courbe de tarage doit être justifiable. En règle générale, le nombre de mesures devrait être au moins le double du nombre de paramètres d'une courbe à étalonner :

- Pour chaque segment de la courbe, les paramètres C , b et h_o (voir la section 1.1.1 - Équation hydraulique simplifiée) devraient être calibrés à l'aide d'au moins six mesures.
- Toute *transition* entre deux segments correspond à un seul paramètre qui devrait être défini à l'aide d'au moins deux mesures.

Par exemple, une courbe qu'on croit n'être constituée que d'un seul segment nécessiterait six mesures d'étalonnage. Une courbe à deux segments nécessiterait 14 mesures (2 segments x 6 + 1 transition x 2), tandis qu'une courbe à trois segments en nécessiterait 22.

Il faut remarquer que le nombre de mesures n'est pas le seul facteur important dans l'étalonnage d'une courbe de tarage. La distribution des mesures et d'autres observations de terrain sont aussi importantes que le nombre de mesures. Les mesures devraient être réparties également sur toute l'étendue des niveaux d'eau de façon à ce que chaque segment et chaque *transition* soient définis par suffisamment de données représentatives.

²² Devore (2000), p.192

²³ Spehar (2013)

²⁴ Pour obtenir des détails sur les jaugeages de vérification, consulter le *Manuel pratique de levés hydrométriques – Jaugeage des cours d'eau*.

²⁵ NEMS Steering Group (2016), section 2.3.3.6

²⁶ Rantz 1982, p.344

²⁷ NEMS Steering Group (2016), section 1.3

1.2.3.3 Représentation graphique

La mise en graphique des mesures choisies constitue souvent la première étape pour identifier les caractéristiques essentielles de la relation hauteur-débit. Ce graphique aide à déterminer si l'équation hydraulique simple peut être ajustée aux mesures.²⁸ Aux Relevés hydrologiques du Canada, pour faciliter l'interprétation, la variable indépendante, soit la hauteur d'eau, est présentée sur l'axe des ordonnées (axe des y), et le débit sur l'axe des abscisses (axe des x), ce qui est l'inverse de la pratique courante en génie.²⁹

Une courbe de tarage peut être représentée sur des échelles logarithmiques ou arithmétiques. Les deux types de représentation présentent des avantages différents :

- Les échelles logarithmiques permettent de lier les attentes théoriques et les données empiriques.³⁰ Elles permettent de représenter les équations de tarage par des lignes droites, ce qui rend leur identification et leur étalonnage plus aisés et habituellement plus précis. Notons toutefois que les équations ne sont linéaires que si l'on applique le bon *décalage*. Voir les détails à la section 1.2.4 (Estimation des décalages).
- Les échelles arithmétiques se prêtent mieux à l'analyse de la relation à basses eaux, particulièrement parce qu'elles ne peuvent pas être appliquées à des valeurs nulles ou négatives. Les données présentées sur ces échelles sont également plus faciles à lire et à relier à leur contexte de terrain. Par contre, pour effectuer une analyse hydraulique détaillée, les échelles arithmétiques présentent peu ou pas d'avantage par rapport aux échelles logarithmiques, parce qu'une relation présentée sur des échelles linéaires (arithmétiques) est presque toujours une ligne courbe, concave vers le bas, qui peut être difficile à bien tracer si l'on ne dispose que de quelques mesures.³¹

1.2.4 Estimation des décalages

Comme il a été mentionné plus haut, le *décalage* (h_o) doit être bien ajusté de façon à ce que les mesures liées à une équation de tarage forment une ligne droite sur un graphique log-log. Une fois qu'on a établi le meilleur *décalage*, on peut étalonner les autres paramètres du segment concerné. Les deux méthodes suivantes sont recommandées pour définir h_o .

1.2.4.1 Essais et erreurs

Pour la plupart des contrôles, on peut obtenir une bonne approximation du *décalage* par essais et erreurs. Il s'agit de déterminer la valeur du *décalage* à laquelle les mesures d'étalonnage forment une ligne droite sur un graphique log-log. Cette méthode nécessite un échantillon de mesures qui représente bien un contrôle à définir. Toutes les mesures utilisées doivent appartenir au même segment. On augmente ou on diminue le *décalage*, qui est soustrait de la hauteur d'eau associée à chaque mesure, jusqu'à ce que les données d'un segment forment une ligne droite.³² Si h_o est trop bas, la courbe de $H-h_o$ en fonction de Q présente une forme concave vers le haut (figure 4 (a)). Si h_o est trop élevé, la courbe de $H-h_o$ en fonction de Q est concave vers le bas (figure 4 (b)).

²⁸ NIST/SEMATECH 2012

²⁹ Sauer (2002), p.48

³⁰ Le Coz (2014)

³¹ Sauer (2002), p.49

³² Hydrology Project (1999), p.10

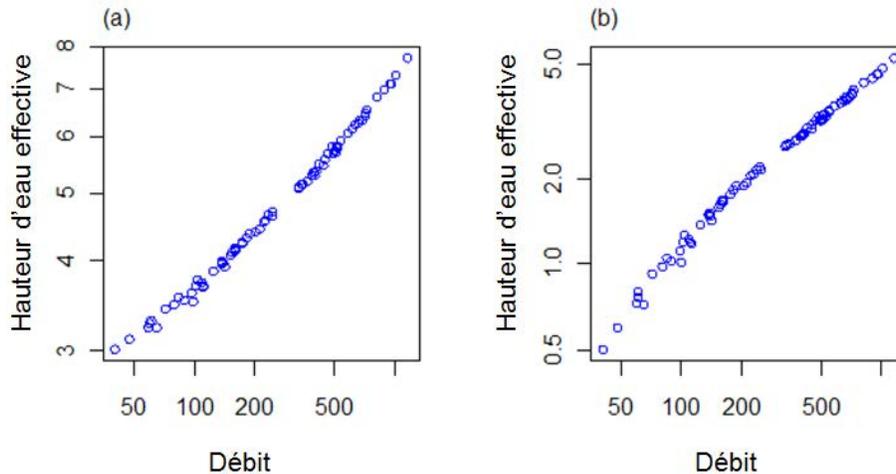


Figure 4. Ajustement de la hauteur d'eau à la jauge d'un écoulement nul : (a) h_o est trop bas; (b) h_o est trop élevé.

Note opérationnelle : Pour déterminer le meilleur décalage, on choisit Offset 1 dans l'Offset Manager du Rating Development Toolbox (RDT). On modifie itérativement la valeur du décalage au moyen du bouton de défilement jusqu'à ce que les mesures forment une ligne droite. Pour une plus grande précision, on peut régler la valeur de l'incrément (Offset Step) à 0,001.

Note opérationnelle : Chaque segment auquel un décalage différent s'applique doit être séparé d'un autre segment par un point pivot. Cela permet au Rating Development Toolbox de représenter de façon unique et continue chaque segment tout en utilisant différents décalages. Le logiciel AQUARIUS ne permet pas d'utiliser plus de trois décalages indépendants. Lorsqu'on entre un deuxième décalage, le logiciel crée automatiquement un point pivot, dont la position est assignée par défaut à la limite inférieure du segment suivant. Les points de tarage identifiés comme points pivots sont grisés dans la Rating Table et ne peuvent plus être déplacés. Le point pivot 1 est associé au décalage 2, et le point pivot 2 est associé au décalage 3.

1.2.4.2 Nivellement

L'autre méthode d'estimation du *décalage* consiste à le mesurer par nivellement. Pour un contrôle par section, la hauteur à la jauge d'un écoulement nul peut parfois être mesurée directement. Le *décalage* ainsi mesuré devrait correspondre au point le plus bas du contrôle par section, mesuré par rapport au plan de référence local.³³

Pour un contrôle par chenal, on ne peut estimer le *décalage* qu'en mesurant la profondeur de l'eau au point le plus profond d'une section transversale représentative du chenal de contrôle et en soustrayant cette profondeur de la hauteur d'eau mesurée à la jauge de la station hydrométrique.³⁴

1.2.5 Délimitation de chaque équation

Le nombre d'équations (segments) utilisées pour une courbe de tarage et la plage sur laquelle chaque équation s'applique sont définis de façon itérative. Toutes les mesures qui appartiennent à un même segment doivent former une ligne droite sur un graphique log-log. Il faut donc inspecter le graphique des mesures choisies (voir la section 1.2.3.3 - Représentation graphique) pour déterminer où la relation change.³⁵ Un changement dans la relation devrait correspondre à un changement dans les caractéristiques physiques du contrôle. L'examen d'un relevé sur la section transversale du contrôle hydraulique peut ainsi aider à délimiter chaque segment.

L'incapacité d'aligner les mesures sur une ligne droite offre souvent une bonne indication qu'il faille modifier le nombre de segments ou leurs limites, ou que le *décalage* n'ait pas été bien défini. Il peut cependant être difficile de définir les limites dans lesquelles un seul contrôle domine lorsqu'on ne dispose que d'un nombre limité de mesures irrégulièrement réparties.

³³ NEMS Steering Group (2016), section 2.2.4

³⁴ NEMS Steering Group (2016), section 2.2.4

³⁵ Hydrology Project (1999), p.11

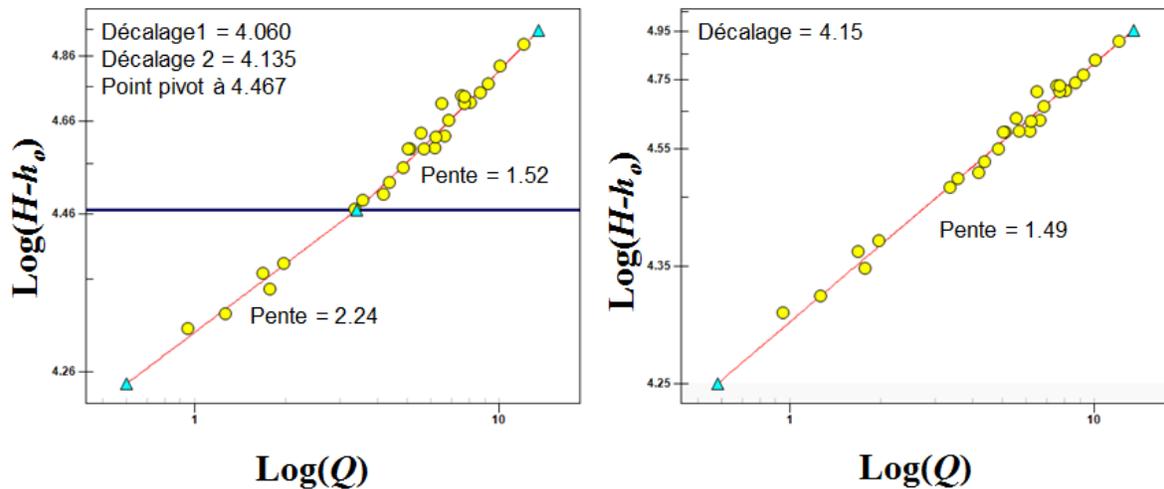


Figure 5. Exemple d'une courbe de tarage (rivière Horseshoe en amont du lac Lois) initialement divisée en deux segments (à gauche), alors qu'un seul segment permet un bon ajustement aux données (à droite). Un relevé du point d'écoulement zéro sur le terrain aidera à définir la meilleure option.

1.2.6 Étalonnage des équations

Une fois qu'on a défini les limites et le *décalage* (h_0) de chaque segment, il faut étalonner son exposant b et son coefficient C . Le *responsable des calculs* doit déterminer, sur un graphique log-log, les coordonnées des deux points qui marquent les limites inférieure et supérieure de chaque segment de façon à ce que les critères suivants soient respectés :

- La ligne qui relie les deux points est bien ajustée à l'échantillon des mesures choisies. Une ligne est jugée bien ajustée à l'échantillon si les écarts des mesures par rapport à cette ligne semblent non corrélés entre eux et aléatoirement distribués. On peut vérifier si c'est bien le cas en examinant un graphique des résidus de la relation (voir la section 1.2.6.1 – Graphique des résidus). Notons que, si la taille de l'échantillon est trop petite, un écart par rapport à la distribution normale souhaitée ne sera probablement pas détectable.
- Les paramètres de l'équation de tarage respectent les contraintes hydrauliques connues. La valeur du paramètre b (l'exposant) doit s'approcher des valeurs correspondant à la géométrie du contrôle (voir la section 1.1.4 - Exposant de la relation). Ce paramètre varie entre deux segments consécutifs, c'est-à-dire lorsqu'il y a un changement notable dans le type de contrôle qui régit la relation de tarage. Voir l'exemple à la figure 2.

Note opérationnelle : Le Rating Development Toolbox du logiciel AQUARIUS crée automatiquement une ligne entre les deux points extrêmes d'un segment. On ajuste ensuite la pente (b) et l'ordonnée à l'origine ($\log(C)$) de la ligne en déplaçant ces points jusqu'à ce que la ligne s'ajuste de façon acceptable aux données.

1.2.6.1 Graphique des résidus

Le graphique des résidus est utile pour juger de la qualité de l'ajustement d'un modèle de tarage. Un résidu de régression (e_i) est défini comme la différence entre la $i^{\text{ème}}$ valeur de débit observé (Q_i) et la valeur correspondante du débit prédit (q_i) par la relation (régression).³⁶

$$e_i = Q_i - q_i \quad (1-3)$$

Les graphiques des résidus aident à illustrer des aspects complexes de la relation entre une courbe de tarage potentielle et les mesures choisies. On peut déterminer les facteurs qui contribuent à l'incertitude des paramètres calibrés en inspectant les résidus.³⁷ Les résidus devraient être indépendants les uns des autres,

³⁶ NIST/SEMATECH (2012)

³⁷ Devore (2000), p.548

répartis également, et ne présenter aucune structure ou tendance en fonction de la hauteur d'eau ou du temps. Un modèle s'ajuste bien aux données si la plupart des résidus sont petits.³⁸

La figure 6 présente des exemples types de graphiques des résidus qu'on doit garder à l'esprit lorsqu'on élabore une courbe de tarage.³⁹

- À la figure 6-a, l'ajustement de la courbe semble adéquat parce que les mesures sont aléatoirement distribuées de part et d'autre de la courbe.
- À la figure 6-b, l'écart des débits par rapport à la courbe n'est pas constant, mais dépend de la hauteur d'eau : l'incertitude est plus grande lorsque les niveaux d'eau sont bas.
- À la figure 6-c, la courbe semble être bien ajustée aux données sauf pour une valeur aberrante. Dans certains cas (voir la figure 6-d), les valeurs aberrantes peuvent avoir un effet important sur l'étalonnage des paramètres.
- Le graphique des résidus présenté à la figure 6-e peut correspondre à un des trois scénarios suivants :
 - Le nombre et la délimitation des segments de la courbe de tarage sont inexacts ou ont changé.
 - D'autres variables indépendantes (y compris le temps) influent sur la relation hauteur-débit.
 - La relation hauteur-débit est non linéaire.

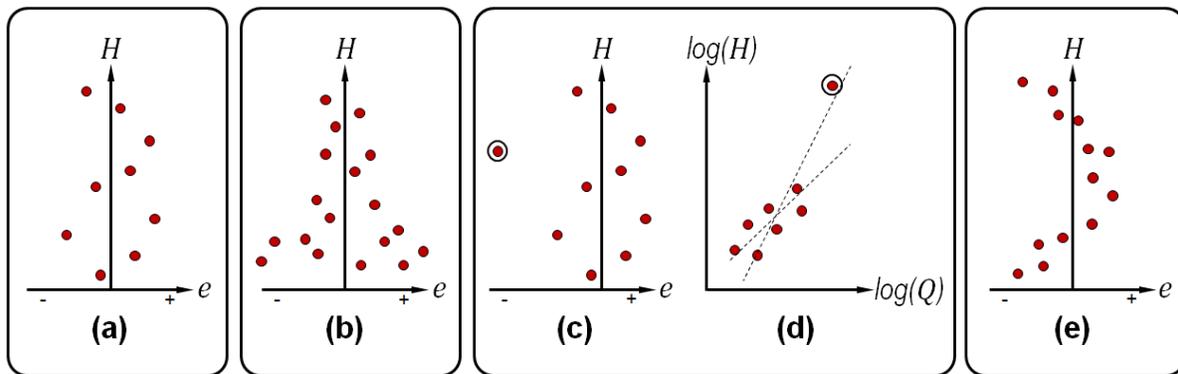


Figure 6. Exemples de graphiques des résidus de relations hauteur-débit. (Adapté de Devore [2000])

Le responsable des calculs doit informer son superviseur si une étude approfondie est souhaitable pour déterminer la capacité d'une courbe de tarage à bien prédire le débit. Au besoin, on peut également tracer un graphique des résidus du débit en fonction du débit observé, de la date de mesure ou même du jour de l'année. Le graphique ainsi obtenu pourrait permettre de déterminer par exemple si les tendances des résidus sont attribuables à un changement dans la méthode d'échantillonnage (p. ex. une technique de mesure différente) plutôt qu'à une caractéristique du contrôle.

Note opérationnelle : Dans AQUARIUS, le Shift Diagram présente la hauteur d'eau sur l'axe vertical comme les graphiques des résidus présentés à la figure 6. Cette façon de faire aide à interpréter la relation hauteur-débit. Notons qu'AQUARIUS présente les résidus calculés comme la différence entre les hauteurs d'eau observées et prédites.

1.2.7 Étalonnage des transitions

Lorsqu'une courbe de tarage nécessite plus d'une équation, chaque segment doit être séparé d'un autre par une *transition*. Idéalement, chaque *transition* devrait correspondre à un changement physique dans le contrôle. Les *transitions* entre un contrôle par section et un contrôle par chenal sont souvent évidentes, tandis que les *transitions* entre deux contrôles par chenal ne le sont souvent pas. Les changements physiques dans un chenal sont souvent peu notables. Aucune équation hydraulique simplifiée ne définit une *transition*.⁴⁰

Les *transitions* ne doivent être étalonnées qu'une fois que les segments ont été définis. Dans bien des cas, un seul point commun suffit pour indiquer la fin d'un segment et le début d'un autre. Lorsqu'une transition plus

³⁸ Devore (2000), p.498

³⁹ NIST/SEMATECH (2012)

⁴⁰ Sauer (2002), p.40

définie est nécessaire, on peut ajouter des points de tarage pour élargir la zone de transition. Idéalement, on interpole les grandes *transitions* en utilisant des points de tarage supplémentaires pour ajuster la transition aux mesures disponibles. Les points de tarage inférieur et supérieur délimitent alors la zone de *transition* et les segments adjacents. Peu importe la stratégie utilisée pour définir une *transition*, il faut éviter, dans la mesure du possible, de modifier les paramètres étalonnés de ces deux segments.

Si l'on dispose de peu d'information empirique, il est préférable de définir une *transition* qui relie les segments consécutifs sans à-coup. Pour ce faire, la zone de *transition* devrait être suffisamment grande. Des points de tarage supplémentaires ajoutés dans la zone de *transition* offrent la possibilité d'établir une *transition* graduelle sans modifier un segment étalonné. Toutefois, un changement abrupt entre deux contrôles bien définis est parfois justifié. L'information et l'interprétation à l'appui d'une telle conclusion doivent être soigneusement documentées avec l'hypothèse du modèle dans l'*analyse de station*. Voir les détails à la section 1.4 (Métadonnées sur la courbe de tarage).

Note opérationnelle : *Un point pivot doit marquer le milieu de toute zone de transition reliant deux segments différents. Les valeurs de décalage des segments au-dessus et en dessous de ce point de pivot sont différentes.*

1.2.8 Cotation des parties « estimées » de la courbe

Il n'y a pas de règle stricte qui précise quand on doit qualifier une partie de la courbe d'« estimée ». Ici encore, l'interprétation est essentielle. La décision à savoir si une partie de la courbe est « estimée » se base sur l'évaluation de la qualité et distribution des mesures disponibles ainsi que sur l'information décrivant les conditions d'écoulement, notamment les courbes de tarage antérieures, la stabilité du contrôle ou tout autre détail historique. La décision est prise par le superviseur selon les recommandations du *responsable des calculs*.

En général, on devrait qualifier une partie de la courbe ou la courbe entière d'« estimée » lorsqu'un des cas suivants s'applique :

- la courbe n'a pu être étalonnée à l'aide d'un nombre suffisant de mesures adéquatement distribuées (voir la section 1.2.3.2 – Taille de l'échantillon);
- la courbe a été établie à l'aide de mesures approximatives ou non conformes aux normes (p. ex. mesure de débit par mi-section fondée sur moins de 20 panneaux);
- la courbe est utilisée pour produire des données alors qu'elle n'a pas encore été *approuvée*;
- une partie de la courbe se trouve au-delà du double de la mesure valide la plus élevée. Voir la section 1.3.2.1 - Extrapolation;
- une partie de la courbe se trouve en deçà de la moitié de la mesure valide la moins élevée. Voir la section 1.3.2.1 - Extrapolation.

1.3 Gestion

Le *responsable des calculs* doit régulièrement vérifier les courbes de tarage existantes en fonction de nouvelles observations. La même stratégie que pour l'élaboration d'une nouvelle courbe s'applique à cette fin (voir la section 1.2), avec des variations mineures visant à valider les décisions antérieures ou déterminer les corrections nécessaires. La procédure de gestion d'une courbe comporte cinq étapes :

1. Examiner les hypothèses posées lors de l'élaboration de la courbe pour déterminer si elles sont encore respectées.
2. Réviser le choix des mesures applicables aux conditions actuelles et les représenter graphiquement.
3. Déterminer si les observations suivent encore une ligne droite (sur un graphique log-log) en fonction des *décalages* et segments définis antérieurement.
4. Évaluer la précision de l'ajustement de la courbe.
5. Décider s'il faut corriger, modifier ou extrapoler la courbe.

Dans toutes ces étapes, il faut bien documenter et justifier chaque décision dans l'*analyse de station*. Voir les détails à la section 1.4 (Métadonnées sur la courbe de tarage).

Note opérationnelle : Dans AQUARIUS, il est recommandé de copier (fonction clone) une courbe avant d'effectuer un travail de vérification sur elle. Comme le Rating Development Toolbox ne comporte aucun mécanisme de verrouillage, on évitera ainsi d'altérer le travail déjà fait sur la courbe.

1.3.1 Détarage

Les contrôles stables subissent régulièrement de petites fluctuations aléatoires.⁴¹ Un contrôle peut varier graduellement ou abruptement en raison de changements dans ses caractéristiques physiques.⁴² De telles fluctuations, qu'on appelle détarage, sont occasionnellement détectées lors des mesures de débit à une station hydrométrique. On applique une correction de détarage lorsqu'on présume que le changement de la relation hauteur-débit est temporaire et qu'on prévoit que les conditions d'écoulement reviendront plus tard à la normale.

1.3.1.1 Correction de détarage

Une correction de détarage est une correction qu'on applique à la courbe de tarage existante plutôt que d'établir une nouvelle courbe. On applique une correction de détarage lors de changements temporaires dans les conditions d'écoulement ou dans l'attente de l'obtention de suffisamment de mesures supplémentaires pour établir une nouvelle courbe. Une correction peut être appliquée de façon graduelle pour correspondre à l'évolution de changements tels que la croissance de la végétation aquatique.⁴³

L'ampleur d'un détarage est exprimée en pourcentage d'écart du débit ou de la hauteur d'eau. Un détarage exprimé en pourcentage d'écart du débit est le rapport de l'écart entre le débit mesuré ($Q_{\text{mesuré}}$) et le débit prédit ($Q_{\text{prédit}}$) sur le débit prédit :

$$\% \text{ d'écart par rapport à la courbe de tarage} = \frac{Q_{\text{mesuré}} - Q_{\text{prédit}}}{Q_{\text{prédit}}} \times 100 \quad (1-4)$$

Un détarage exprimé en pourcentage d'écart de hauteur d'eau est la différence entre la hauteur d'eau moyenne correspondant au débit prédit ($H_{\text{prédit}}$) et la hauteur d'eau moyenne mesurée ($H_{\text{mesurée}}$). Cette valeur représente la correction qu'il faudrait apporter au niveau d'eau pour faire correspondre les conditions observées aux prévisions du modèle.

$$\text{Détarage} = H_{\text{prédite}} - H_{\text{mesurée}} \quad (1-5)$$

⁴¹ WMO 1044 Vol.1, p.II.1-19

⁴² WMO 1044 Vol.1, p.II.1-19

⁴³ Spehar (2013)

Note opérationnelle : Dans AQUARIUS, le détarage exprimé en écart de hauteur d'eau correspond à la valeur appelée Shift (m), tandis que le détarage exprimé en pourcentage est désigné Rating Error (%), soit l'erreur de tarage.

1.3.1.2 Méthodes

Une correction de détarage peut varier selon la hauteur d'eau, le temps ou une combinaison des deux. Il existe trois méthodes acceptées pour appliquer une correction de détarage en fonction de la hauteur d'eau : la correction constante, la correction en section et la correction focalisée. Toute méthode de correction peut être appliquée pour varier de façon abrupte ou graduelle dans le temps. La présente section décrit les méthodes de correction recommandées.

1.3.1.2.1 Correction constante

Une correction constante est appliquée lorsqu'on présume que l'écart par rapport à la courbe de tarage de base reste le même à tous les niveaux d'eau. Une telle correction est souvent appliquée pour un changement de la hauteur d'eau d'écoulement nul (p. ex. à la suite d'un épisode d'érosion du lit). Une courbe de tarage à laquelle on a appliqué une correction constante est parallèle à la courbe initiale sur un graphique arithmétique. Sur un graphique logarithmique, une courbe ainsi corrigée est concave vers le haut et au-dessus de la courbe initiale s'il y a eu accumulation de sédiments ou concave vers le bas et en dessous de la courbe initiale s'il y a eu érosion du lit.⁴⁴ Une correction constante nécessite un seul intrant correspondant à l'écart du débit mesuré par rapport à la courbe initiale, écart qui reste le même, peu importe le niveau d'eau.

Note opérationnelle : Pour faciliter l'analyse et l'approbation des résultats, il est utile d'associer la valeur de correction constante avec le niveau d'eau et le moment du jaugeage à laquelle elle correspond.

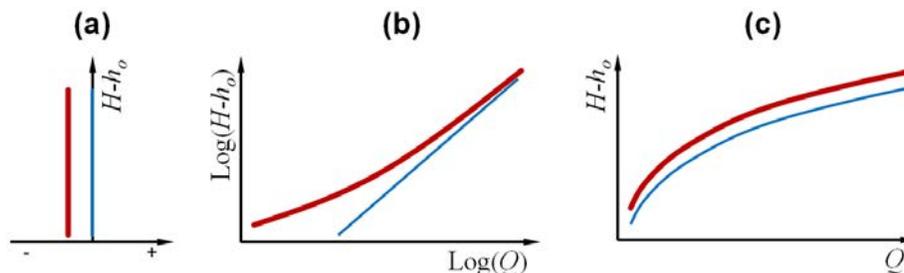


Figure 7. Exemple d'une correction constante (un seul intrant) : (a) graphique des résidus, (b) graphique logarithmique et (c) graphique arithmétique. La correction est en rouge, et la courbe initiale en bleu.

1.3.1.2.2 Correction en section

On applique une correction en section pour un détarage qui varie selon le niveau d'eau. Ce type de correction sert habituellement à corriger le segment inférieur d'une courbe de tarage, lequel correspond au contrôle par section, tandis que la partie supérieure de la courbe reste inchangée. Cette correction ne devrait être appliquée à un contrôle par chenal que dans des cas exceptionnels. La correction en section est avantageuse lorsque le niveau d'eau varie beaucoup au cours d'une période où la courbe doit être corrigée puisqu'elle s'adapte automatiquement aux conditions actuelles à la station. Cette méthode se prête donc bien à la *production en continu* lors de conditions variables.

Une correction en section nécessite deux intrants :

- Le point supérieur, désigné *point d'ancrage*, correspond à la hauteur d'eau au-dessus de laquelle on juge que la courbe reste inchangée. Ce point correspond habituellement à la *transition* entre un contrôle par section et un contrôle par chenal.
- Le point inférieur, appelé point d'inflexion, correspond à la hauteur d'eau sous laquelle il y a un détarage constant.

Si l'on juge que les détarages à une station sont produits par une cause récurrente, il est possible d'établir des points d'ancrage et d'inflexion à hauteur d'eau constante pour de nombreux épisodes de détarage (voir la

⁴⁴ ISO 1100-2, p.13

figure 9). Certains effets saisonniers peuvent régulièrement influencer sur la relation hauteur-débit de façon semblable chaque année. Si c'est le cas, la hauteur du point d'inflexion peut être établie d'après des données historiques. Ainsi, l'ampleur du détarage varie selon les résultats de visites de station, tandis que la hauteur du point d'inflexion est constante d'un détarage à l'autre. Le point d'ancrage est alors défini par les caractéristiques du contrôle. Comme les détarages influent sur le même contrôle par section (p. ex. un seuil), ils peuvent présenter des similitudes dans leur transition de retour à la courbe de base même si les mesures utilisées pour les définir ont été faites à différentes hauteurs d'eau.⁴⁵ Cette approche crée une famille de corrections cohérente. Notons que les conditions peuvent changer et que les corrections devraient alors être adaptées aux nouvelles observations.

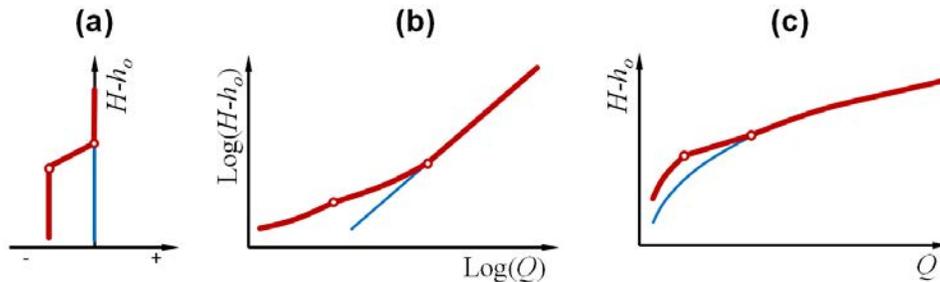


Figure 8. Exemple d'une correction en section : (a) graphique des résidus, (b) graphique logarithmique et (c) graphique arithmétique. La correction est en rouge, et la courbe initiale en bleu.

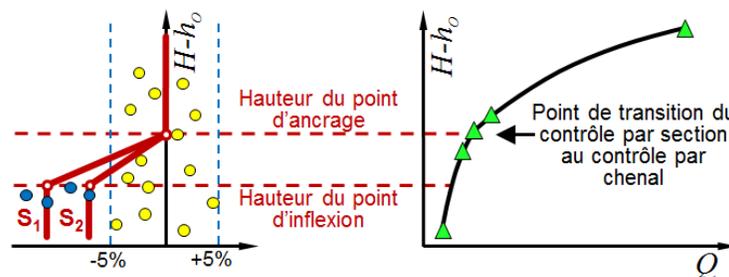


Figure 9. Exemple de deux corrections en section (C_1 et C_2) définies selon la notion de famille de détarages.

1.3.1.2.3 Correction focalisée

On applique une correction focalisée aux détarages qui varient selon le niveau d'eau, mais au-dessus et en dessous desquels la courbe de tarage revient à la normale. Ce type de correction présente des avantages semblables à ceux d'une correction en section. Il est appliqué par exemple dans le cas d'un arbre tombé en travers du chenal ou de l'affaissement d'une berge. Les corrections focalisées sont habituellement appliquées à la zone de transition entre un contrôle par section et un contrôle par chenal.

Une correction focalisée nécessite trois intrants :

- Le point inférieur correspond à la hauteur d'eau sous laquelle on présume que la courbe de tarage reste inchangée.
- Le point intermédiaire correspond à l'ampleur maximale du détarage. La correction diminue au-dessus et en dessous de la hauteur d'eau de ce point. Le point intermédiaire d'une correction focalisée est habituellement établi à la hauteur d'eau moyenne à laquelle se produit le détarage.
- Le point supérieur correspond à la hauteur d'eau au-dessus de laquelle on présume que la courbe de tarage reste inchangée.

⁴⁵ Kenny (2013)

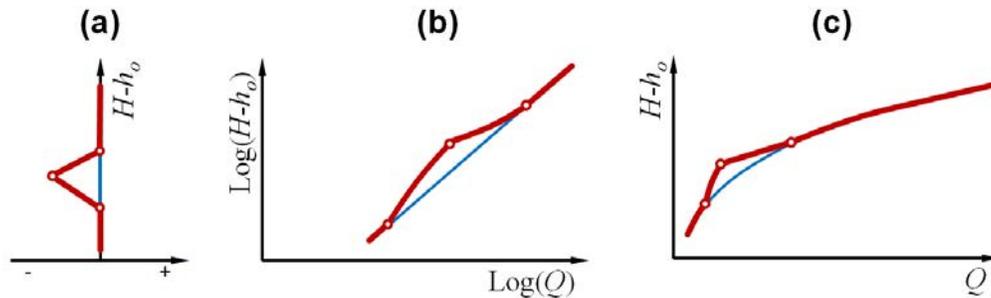


Figure 10. Exemple d'une correction focalisée : (a) graphique des résidus, (b) graphique logarithmique et (c) graphique arithmétique. La correction est en rouge, et la courbe initiale en bleu.

1.3.1.2.4 Variabilité dans le temps

L'ampleur d'une correction de détarage peut varier avec le temps. Il est donc nécessaire d'établir quand la correction débute et se termine. Il faut également déterminer comment l'ampleur de la correction devrait évoluer durant cette période. Il faut garder à l'esprit que, puisque le début et la fin d'un détarage peuvent être déclenchés par des phénomènes différents, ces deux transitions peuvent se comporter différemment.

L'ampleur d'une correction de détarage peut changer abruptement ou graduellement. Dans le cas d'un changement graduel, l'ampleur de la correction varie proportionnellement entre deux points, c'est-à-dire de façon linéaire entre deux valeurs de correction prédéfinies. Elle pourrait par exemple passer progressivement de zéro à l'écart observé lors d'une visite de station. Dans le cas d'un changement abrupt, le changement d'ampleur de la correction se produit à un point précis dans le temps, c'est-à-dire que la correction n'est pas graduelle, mais qu'elle est présumée apparaître et disparaître quasi instantanément.

Note opérationnelle : Le passage d'une correction de détarage à une autre est déterminé par la date de fin établie de la première correction. Si aucune date de fin n'est entrée dans AQUARIUS, la correction passe graduellement de son ampleur maximale jusqu'à la valeur définie par la correction suivante ou la courbe initiale. En entrant une date de fin, on indique que la correction ne varie pas dans le temps, que les conditions sont stables durant toute la période de détarage. Ainsi, AQUARIUS appliquera la même ampleur de correction jusqu'à la fin de la période précisée.

Un détarage graduel est habituellement dû à la croissance ou à la sénescence de la végétation aquatique ou à un épisode constant d'envasement ou d'érosion du lit. Ce genre de transition se produit souvent sur des semaines ou des mois. Si l'on dispose de nombreuses mesures de débit faites durant la période de transition, on peut établir une courbe de progression du détarage de ces mesures. Cette technique ne s'applique toutefois que si aucune forte crue n'a dégagé le chenal entre ces mesures.⁴⁶

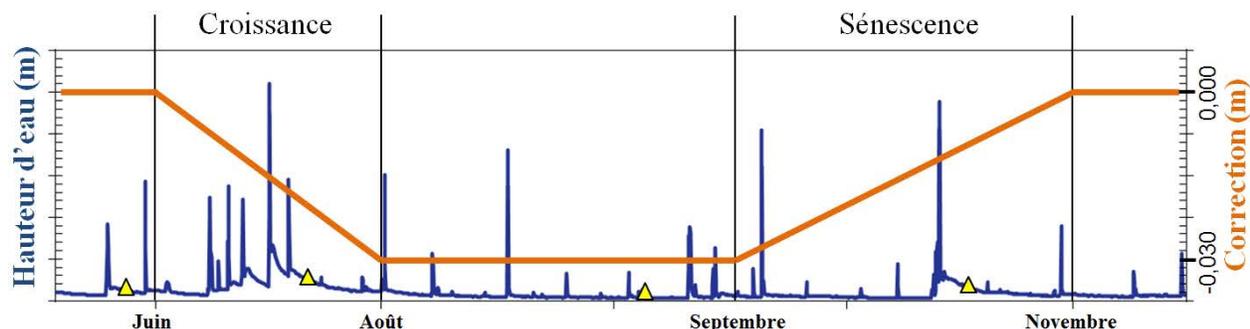


Figure 11. Représentation d'un détarage graduel qu'on soupçonne être dû à la végétation aquatique (croissance et sénescence) au contrôle d'une station. La ligne orange indique le détarage en fonction du temps. Le détarage commence à zéro et atteint -0,030 m à la fin de la saison de croissance. L'interprétation est fondée sur quatre mesures. La ligne bleue est la hauteur d'eau à la station. Les triangles jaunes représentent les mesures. Une telle situation ne se produit normalement que lorsque les niveaux d'eau sont moyens ou bas

⁴⁶ NEMS Steering Group (2016), p.25

Un détarage causé par le transport de sédiments durant une crue est graduel, mais sa progression est relativement rapide, ne durant habituellement que quelques jours. Un détarage de ce genre commence lorsque la vitesse du courant augmente suffisamment pour mobiliser des matériaux du lit ou des berges (normalement lorsque l'*hydrogramme* monte le plus rapidement) et cesse lorsque la vitesse diminue au point où les sédiments charriés se déposent (habituellement près du point d'inflexion de la courbe de décrue de l'*hydrogramme*, voir la figure 12). Si une crue présente plusieurs pointes semblables, il est acceptable de présumer que la transition s'est déroulée durant tout l'épisode. Par contre, si une des pointes est notablement plus grande que les autres, il est acceptable de la choisir pour marquer le moment de la transition.⁴⁷

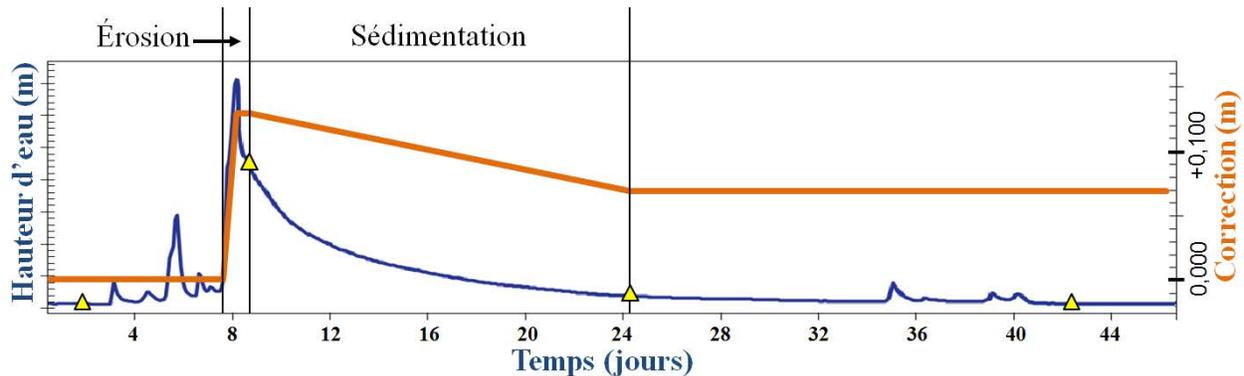


Figure 12. Progression d'un détarage présumé durant un épisode de crue causant de l'érosion et de la sédimentation. La ligne orange indique le détarage en fonction du temps. La ligne bleue est la hauteur d'eau à la station. Les triangles jaunes représentent les mesures. D'après les observations, on considère que l'érosion aurait commencé à la montée rapide de l'*hydrogramme* et atteint son maximum à la pointe de l'*hydrogramme*. Après cette pointe, on présume que le détarage aurait diminué à la mesure obtenue durant la décrue. La dernière mesure, qui semble montrer un détarage stable, pourrait indiquer qu'une nouvelle courbe de tarage est souhaitable.

Les détarages abrupts correspondent habituellement à des discontinuités qu'on observe sur le limnigramme ou à des phénomènes importants qui influent sur les données d'une station. Un détarage abrupt est souvent causé par une activité humaine ou des castors (p. ex. enlèvement de débris sur le contrôle) ou par un phénomène catastrophique comme une inondation majeure ou la chute d'un objet sur le contrôle (voir la figure 13).

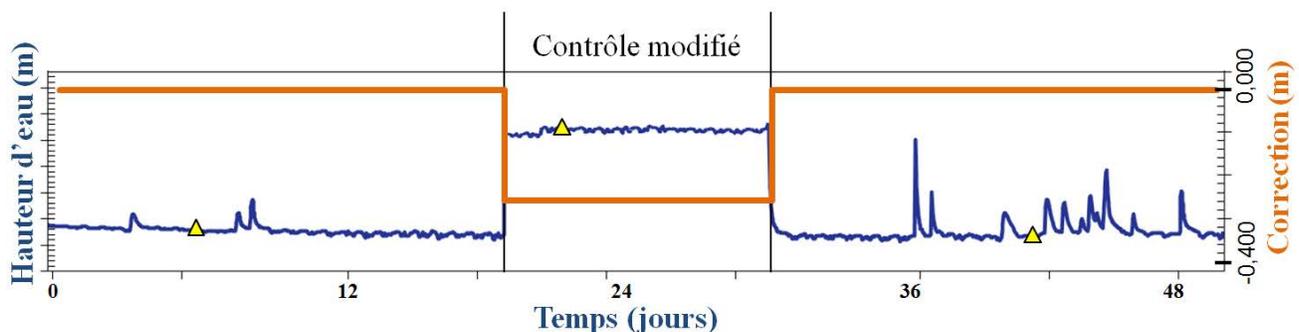


Figure 13. Détarage abrupt causé par des sacs de sable empilés sur le contrôle par une équipe de voirie. La ligne orange indique le détarage en fonction du temps. La ligne bleue est la hauteur d'eau à la station. Les triangles jaunes représentent les mesures.

⁴⁷ NEMS Steering Group 2016, p.25

1.3.1.3 Procédure générale de correction

Pour effectuer une correction de détarage, il faut qu'une courbe de tarage stable ait été préalablement établie à la station.⁴⁸

Dans un premier temps, le *responsable des calculs* doit recueillir l'information suivante pour la période à l'étude ainsi que pour des périodes d'écoulement récentes et semblables :

- notes de relevé hydrométrique, y compris les détails des mesures de débit;
- limnigramme;
- données météorologiques;
- hydrogrammes de stations comparables;
- corrections de détarage appliquées auparavant.

D'après l'information recueillie, le *responsable des calculs* doit alors déterminer s'il y a détarage, puis concevoir et appliquer la correction à apporter, selon les étapes suivantes :

- 1) Détection
- 2) Conception
- 3) Documentation et application

1.3.1.4 Détection

Comme les données de terrain sont essentielles pour la détection des périodes de détarage, on recommande d'accroître la fréquence des visites de station durant les périodes d'instabilité.⁴⁹

Pour détecter un détarage et le besoin d'une correction, le *responsable des calculs* doit d'abord déterminer si les prévisions basées sur la courbe de tarage diffèrent des observations de terrain. Si les mesures se situent hors de la plage des valeurs tolérées, il faut effectuer une étude approfondie pour confirmer le détarage et concevoir la correction requise.

1.3.1.4.1 Écart par rapport à la courbe de tarage

L'écart entre une mesure de débit et la valeur prédite selon la courbe de tarage sert à déterminer s'il faut apporter une correction. Cet écart est calculé selon l'équation présentée à la section 1.3.1.1 – Correction de détarage.

Notez qu'une mesure qui s'écarte de la courbe de tarage, mais qui n'a pas été vérifiée, est jugée moins exacte que la valeur prédite selon la courbe. Par contre, si cette mesure est corroborée par un *jaugeage de vérification*, elle est considérée plus exacte que la valeur prédite selon la courbe.⁵⁰ Dans l'*analyse de station*, il faudra justifier l'application de toute correction de détarage basée sur une seule mesure non vérifiée.

On soupçonne un détarage quand les jaugeages ne concordent pas avec les prédictions. On devrait apporter une correction si :

- un jaugeage s'écarte de plus de 5 % du débit prédit selon la courbe de tarage et que le niveau d'eau correspondant au jaugeage s'écarte de plus de 0,003 m de la hauteur d'eau prédite. La mesure devrait avoir été confirmée par un jaugeage de vérification. Aucune correction ne devrait être appliquée si les écarts du débit et le niveau d'eau par rapport à la prédiction ne dépassent pas ces valeurs.

Lorsqu'une mesure et ses *jaugeages de vérification* ne concordent pas, le *responsable des calculs* doit examiner les conditions et la qualité des jaugeages afin de décider si l'écart est attribuable à une instabilité hydraulique, à une erreur de mesure ou à une erreur de modèle. Il doit ensuite décider s'il faut appliquer ou non une correction. Le cas échéant, il doit la baser sur une mesure unique ou sur la moyenne de plusieurs mesures. Il faut garder à l'esprit que les mesures comportent habituellement des erreurs systématiques et

⁴⁸ WMO 1044, p.II.1-19

⁴⁹ NEMS Steering Group (2016), p.23

⁵⁰ WMO 1044, p.II.1-19

aléatoires. Une importante dispersion des mesures par rapport au modèle n'indique pas nécessairement le besoin d'appliquer une correction, mais pourrait indiquer un niveau de complexité qui ne peut pas être traité par un modèle simple de courbe de tarage.⁵¹

Si l'on soupçonne qu'il y a détarage, il faut prendre en considération les conditions observées lors des visites à la station, les signes observés dans l'*hydrogramme* de la station et les corrections de détarage appliquées par le passé pour confirmer le détarage et déterminer la correction requise.

1.3.1.4.2 Conditions observées lors de visites à la station

On examine les notes de relevé hydrométrique pour déterminer tout effet hydrologique, géologique ou biologique qui aurait pu modifier les conditions du contrôle. Les conditions observées lors des visites de station peuvent donner des indices sur la nécessité d'appliquer une correction et sur la cause probable de toute modification présumée du contrôle. Voir la section 1.4.3.1 – Conditions de contrôle. Ces indices pourraient par exemple être un changement de géométrie dû à l'accumulation de débris ou un changement de débitance dû à la croissance de végétation.

1.3.1.4.3 Hydrogrammes atypiques

Il faut examiner l'*hydrogramme* d'une station pour détecter d'éventuelles périodes d'instabilité de la courbe de tarage. On devrait concevoir une correction en tenant compte de récents facteurs hydrologiques ou climatologiques régionaux qui auraient influé sur la relation hauteur-débit. On peut parfois observer des formes inhabituelles sur un *hydrogramme* lorsqu'on examine les données récentes par rapport aux tendances attendues. Il est recommandé de toujours recouper les anomalies observées avec les données météorologiques correspondantes. Une forme inhabituelle dans l'*hydrogramme* pourrait être reliée à un épisode d'écoulement insolite, comme une hausse de la hauteur d'eau lors d'une décrue en l'absence de pluie, ou un changement abrupt associé au mouvement de débris sur le contrôle. Ces détails ne définissent pas l'ampleur d'un détarage, mais ils peuvent indiquer le début ou la fin d'une période d'instabilité.

1.3.1.4.4 Périodes d'instabilité antérieures

Les périodes d'instabilité de la courbe de tarage devraient être évaluées dans un contexte plus grand que celui d'une seule visite de station. En effet, il est important de déterminer si un détarage antérieur s'applique encore et de tirer des leçons des conditions et décisions historiques.

Il faut concevoir une correction de détarage en tenant compte des conditions hydrologiques historiques et climatologiques historiques et des décisions précédentes concernant les détarages. On devrait examiner de près les méthodes de correction utilisées par le passé afin d'assurer la continuité des données ou de remettre en question les méthodes et les améliorer. Des détarages antérieurs pourraient également s'appliquer à la période actuellement à l'étude. Des mesures consécutives qui sont toutes soit inférieures, soit supérieures à la courbe de tarage peuvent indiquer que la courbe n'est pas bien définie et qu'elle doit être améliorée.

1.3.1.5 Conception

Pour concevoir une correction de détarage, le responsable des calculs doit formuler l'hypothèse qui définit la variation du détarage selon la hauteur d'eau et le temps.

1.3.1.5.1 Hypothèse de détarage

Pour chaque correction de détarage appliquée, il faut fournir une justification s'appuyant sur les principes hydrauliques présentés au tableau 2. Il est important d'indiquer clairement la cause et l'effet d'un détarage, pour que sa correction puisse être validée et approuvée facilement. Une correction pour détarage est elle-même une courbe de tarage. L'hypothèse qui la justifie devrait donc relier les changements observés ou présumés dans les facteurs hydrauliques aux modifications suggérées des paramètres de l'équation. Le tableau 2 présente une description générique des facteurs hydrauliques dont il faut tenir compte, en précisant comment ceux-ci influent sur les paramètres de la relation. Ce tableau aidera le *responsable des calculs* à

⁵¹ NEMS Steering Group (2016), p.23

formuler une hypothèse de cause et d'effet pour toute correction de détarage appliquée. L'hypothèse doit être documentée dans l'*analyse de station*. Voir les détails à la section 1.4 - Métadonnées sur la courbe de tarage.

Tableau 2. Effet des variations du facteur hydraulique de contrôle sur les paramètres de l'équation de tarage⁵²

Facteur hydraulique		Paramètre touché	Effet	Exemple
		Coefficient	Hausse de la pente = hausse du coefficient	Une grande accumulation de sédiments en amont de la jauge pourrait causer une hausse de la pente locale du chenal.
			Baisse de la pente = baisse du coefficient	
		Coefficient	Hausse de la rugosité = baisse du coefficient	À mesure qu'elles croissent, les plantes aquatiques peuvent réduire la débitance d'un chenal en modifiant la résistance frictionnelle du lit.
			Baisse de la rugosité = hausse du coefficient	
		Décalage	Hausse du niveau = hausse du décalage	L'accumulation de sédiments sur le lit d'une rivière entraînerait une hausse du niveau d'eau pour un débit donné.
			Baisse du niveau = baisse du décalage	
		Exposant de la courbe	Forme plus triangulaire = hausse de l'exposant	L'accumulation de débris sur un contrôle changerait la forme de sa section transversale.
			Forme plus rectangulaire = baisse de l'exposant	

1.3.1.5.2 Variation de la correction en fonction du niveau d'eau

Le *responsable des calculs* doit choisir une méthode de correction qui correspond aux variations observées du débit par rapport à la hauteur d'eau (déduites à partir des mesures disponibles) et qui cadre bien avec la cause et l'effet présumés du détarage (hypothèse de détarage). Il s'agit de déterminer, à partir des mesures récemment obtenues, l'ampleur du détarage (écart par rapport à la courbe de base) à différentes hauteurs d'eau. Bien que tout détarage devrait être temporaire par définition, un détarage est parfois suffisamment stable pour être observé à plusieurs niveaux d'eau.⁵³ On peut alors déterminer si le détarage est constant ou varie selon le niveau d'eau. Voir les détails sur les différentes méthodes de correction à la section 1.3.1.2 - Méthodes.

Dans les cas où l'on soupçonne une récurrence dans les caractéristiques d'un détarage, le *responsable des calculs* doit examiner les corrections historiques pour établir les valeurs des intrants pour les points d'ancrage et d'inflexion.

Il faut toujours inspecter la forme générale d'un détarage par rapport à la courbe initiale. Il faut garder à l'esprit que la correction de détarage appliquée à une courbe de tarage doit respecter les caractéristiques connues du contrôle et leur effet sur la relation hauteur-débit.

1.3.1.5.3 Variation de la correction en fonction du temps

L'application d'une correction de détarage est définie en fonction de sa progression entre ses dates présumées de début et de fin. Il est important de comprendre les caractéristiques d'évolution du détarage à une station afin de choisir le moment et la manière d'appliquer la correction.⁵⁴

Il faut d'abord déterminer si le détarage est susceptible d'apparaître ou de disparaître de façon graduelle ou abrupte. Pour ce faire, on examine les conditions observées lors des visites de station, les *hydrogrammes*

⁵² Hamilton (2015), p.6

⁵³ Kenny (2013)

⁵⁴ Kenny (2013)

atypiques et les périodes antérieures d'instabilité de la courbe (voir la section 1.3.1.4 - Détection). S'il n'est pas possible de déterminer l'évolution d'un détarage, on présume que la correction progresse de façon linéaire.

On doit faire correspondre la progression d'une correction avec les causes présumées ou établies du détarage. Son début et sa fin ne doivent pas nécessairement coïncider avec les dates de jaugeages. On peut aussi définir le début et la fin d'une correction d'après les périodes d'instabilité visibles sur l'*hydrogramme*.

Voici alors les étapes suggérées :

1. Noter les dates des instabilités présumées visibles sur l'*hydrogramme*.
2. Noter les dates des phénomènes météorologiques qui influent sur l'écoulement, tels que les précipitations, les sécheresses et les fluctuations de température.
3. Déterminer si les instabilités présumées visibles sur l'*hydrogramme* pourraient s'expliquer par les phénomènes météorologiques relevés.
4. S'il existe un *hydrogramme* pour une station comparable, déterminer s'il présente des instabilités semblables, qui ne seraient donc pas attribuables à l'instabilité locale de la relation hauteur-débit.
5. Enfin, éliminer les dates de début et de fin les moins probables.

Cette analyse pourrait donner plusieurs options pour expliquer quand et comment la correction devrait s'appliquer. Le *responsable des calculs* doit indiquer les options les plus probables et indiquer celle retenue et recommandée. Cette information doit être inscrite dans l'*analyse de station*. Voir la section 1.4 - Métadonnées sur la courbe de tarage.

1.3.1.6 Application

D'après l'information obtenue lors de la détection d'un détarage et de la conception de sa correction, on devrait avoir bien défini et documenté sa variation en fonction du temps et de la hauteur d'eau. Ces caractéristiques servent ensuite à appliquer la correction.

Voici les recommandations pour appliquer une correction de détarage :

- 1) Il faut régulièrement prendre des mesures pour déterminer si la correction s'applique encore. Dans le cas d'un détarage sur plusieurs saisons, une nouvelle courbe de tarage devrait être envisagée.
- 2) Une correction de détarage doit être la plus simple possible et ne pas décrire plus que ce que les données disponibles permettent.
 - Une correction constante n'est pas toujours appropriée pour une courbe de tarage à plusieurs segments. Toutefois, lorsque les visites de station sont suffisamment fréquentes et que les fluctuations du niveau d'eau sont petites, ce type de correction peut être aussi efficace qu'une correction plus complexe tout en étant plus facile à justifier et à valider.
 - Il ne faut jamais établir une correction de détarage en se fondant uniquement sur les résidus, sans référence à la courbe de tarage.⁵⁵ Il faut toujours examiner la forme d'une correction recommandée par rapport à la courbe de tarage et à ses caractéristiques de contrôle afin de s'assurer que la correction respecte les principes hydrauliques de base qu'elle décrit.
- 3) Aucune correction ne devrait être appliquée si une mesure de débit est à moins de 5 % du débit prédit selon la courbe de tarage ou que sa hauteur d'eau correspondante est à moins de 0,003 m de la hauteur d'eau prédite.
 - RHC présume une incertitude de 5 % pour toute mesure de débit effectuée selon les normes. Les mesures qui s'écartent de moins de 5 % de la valeur prédite par la courbe de tarage indiquent qu'une correction de détarage n'est pas nécessaire à cette hauteur d'eau.
 - RHC présume une incertitude de 0,003 m pour toute mesure de niveau d'eau. Les mesures dont la hauteur d'eau moyenne (corrigée) se situe à moins de 0,003 m de la hauteur d'eau prédite par la courbe de tarage indiquent qu'une correction de détarage n'est pas nécessaire à cette hauteur d'eau. Les mesures de débit d'étiage sont très sensibles au bruit et aux fluctuations. Elles devraient donc être utilisées seulement pour préciser la forme générale de la courbe de tarage, au sein d'un échantillon statistique plus grand.

⁵⁵ Kenny (2013)

- Si l'on décide d'appliquer une correction de détarage même si les conditions susmentionnées ne sont pas respectées, il faut le justifier dans l'*analyse de station*. Voir les détails à la section 1.4 - Métadonnées sur la courbe de tarage.
- 4) On ne devrait pas appliquer une correction qui s'appuie sur une seule mesure et qui n'est pas corroborée par une autre observation ou des données historiques.⁵⁶
- Toute mesure qui s'écarte de façon notable du résultat attendu doit être validée par un *jaugeage de vérification*.
 - Une observation des conditions de contrôle et un historique d'instabilité bien documenté peuvent justifier une correction de détarage fondée sur une seule mesure non vérifiée. Une telle décision doit cependant être documentée dans l'*analyse de station*. Voir les détails à la section 1.4 - Métadonnées sur la courbe de tarage.
- 5) Si l'on présume que les conditions d'écoulement resteront stables, une correction peut être appliquée de façon constante sur une certaine période future.
- Il est difficile d'établir une correction de détarage en *temps réel* lorsque les instabilités de la courbe de tarage évoluent encore. Une correction doit être revue et, le cas échéant, modifiée dès que l'on dispose de nouvelles informations. Il faut soigneusement surveiller les conditions d'écoulement entre les visites de station pour s'assurer qu'un changement dans ces conditions ne passe pas inaperçu, ce qui pourrait causer une discontinuité indésirable dans les données.

Note opérationnelle : Dans *AQUARIUS*, la Field Visit Table du Rating Development Toolbox présente le « R Error % », soit le pourcentage d'écart entre la mesure et la courbe de tarage actuelle non corrigée, et le « S Error % », soit le pourcentage d'écart entre la mesure et la courbe de tarage actuelle corrigée. Le « T Differ » est le pourcentage d'écart entre la mesure et la courbe de tarage actuelle corrigée de façon exacte en fonction de la date. Ces données devraient servir à orienter l'interprétation et l'application des corrections de détarage.

1.3.2 Révisions

Puisque les relations hauteur-débit évoluent, les courbes de tarage doivent être régulièrement examinées et éventuellement être modifiées lorsqu'on détecte des changements permanents. Il peut également être nécessaire d'extrapoler ces courbes au-delà des valeurs qu'elles couvraient au départ ou de modifier leur forme générale.

1.3.2.1 Extrapolation

L'étendue des valeurs de hauteur d'eau et de débit couverte par une courbe de tarage devrait correspondre à l'étendue des valeurs observées à la station. Toutefois, s'il faut calculer le débit à des hauteurs d'eau autres que celles observées ou attendues, on devrait extrapoler la courbe.

Pour des extrapolations complexes, le *responsable des calculs* devrait consulter la description des meilleures pratiques dans le manuel intitulé *Extension of Rating Curves at Gauging Stations* (Ramsbottom et Whitlow, 2003), qui est disponible à la bibliothèque de RHC.

L'utilisation d'une courbe de tarage hors de sa zone d'étalonnage présente une incertitude élevée. C'est pourquoi il faut toujours valider l'extrapolation d'une courbe de tarage par d'autres sources d'information. Une telle extrapolation doit être identifiée comme une partie « estimée » de la courbe, le cas échéant.

1.3.2.1.1 Extrémité supérieure

Une extrapolation à l'extrémité supérieure d'une courbe de tarage ne devrait pas s'étendre au-delà du double du jaugeage valide le plus élevé, ni empiéter sur un nouveau contrôle, p. ex. plaine inondable. Une extrapolation ne peut se définir comme une projection en ligne droite du segment supérieur de la courbe que si l'on présume que la géométrie et la résistance à l'écoulement du contrôle restent constantes à ces hauteurs d'eau élevées.

⁵⁶ NEMS Steering Group (2016), p.24

Il est bon d'envisager l'utilisation de mesures indirectes pour définir et valider une extrapolation à l'extrémité supérieure. Le *Manual on Stream Gauging, Volume II – Computation of Discharge* de l'Organisation météorologique mondiale (Section 1.11, WMO-No. 1044, disponible à la bibliothèque de RHC) décrit en détail les techniques de ce genre. Voici quelques-unes de ces méthodes :

- méthode débitance-pente (*conveyance-slope method*);
- comparaison de bassins versants (*areal comparison of peak runoff rates*);
- calcul de propagation des crues (*flood routing*);
- calcul séquentiel vers l'amont (*step backwater method*).

1.3.2.1.2 Extrémité inférieure

Une extrapolation à l'extrémité inférieure d'une courbe de tarage ne devrait pas s'étendre sous la moitié de la mesure valide la plus basse. Si le contrôle par section semble s'appliquer jusqu'à ce que l'écoulement cesse, il est parfois acceptable d'extrapoler le segment inférieur de la courbe vers cette valeur. Toutefois, en situation d'étiage, la relation hauteur-débit est souvent soumise à plusieurs facteurs de contrôle, de sorte qu'elle ne peut être représentée par une équation. La fiabilité de la partie inférieure d'une courbe de tarage peut également être limitée par la précision de l'instrument de mesure, ce qui accroît l'incertitude d'étalonnage. Voir la section 1.3.1.6 - Application.

La partie inférieure d'une courbe devrait être traitée comme une zone de *transition* si aucune équation ne s'y applique. On devrait alors tracer une ligne passant par la moyenne des mesures en situation d'étiage jusqu'au point estimé de débit nul, plutôt que de tenter d'extrapoler le segment inférieur.

Lorsque la hauteur d'eau est sous le point où l'écoulement cesse, la valeur du débit doit être nulle dans les données publiées. Dans ces cas, la valeur de hauteur d'eau ne doit pas être publiée pour éviter toute confusion chez l'utilisateur des données. Le *responsable des calculs* a toujours accès aux données brutes de hauteur au besoin, par exemple pour confirmer la connexion du puits de jaugeage avec la rivière.

Note opérationnelle : Dans le Data Correction Toolbox, on doit appliquer une suppression automatique (aucune date de fin précisée) à la série chronologique de la hauteur d'eau pour éliminer les données égale ou inférieure au niveau où l'écoulement cesse.

1.3.2.2 Modification d'un segment

La validité de la courbe de tarage utilisée à une station de jaugeage doit être confirmée à chaque *période d'approbation*. La procédure pour décider d'une modification de toute partie d'une courbe (segment) et l'appliquer est la même que celle décrite à la section 1.2 - Stratégie d'élaboration des courbes de tarage.

Lorsqu'on élabore une nouvelle courbe de tarage pour en remplacer une autre, il faut les comparer pour vérifier que toute différence notable entre les deux est justifiée et raisonnable.⁵⁷

⁵⁷ Spehar (2013)

1.4 Métadonnées sur la courbe de tarage

Une description doit être associée à toute courbe de tarage. Cette description comprend des détails sur son élaboration, sa validation et, le cas échéant, sa correction. Les personnes qui utilisent ou vérifient la courbe ont besoin de cette information pour comprendre les limitations du modèle et ses possibilités d'amélioration.

Les métadonnées sur la courbe de tarage doivent être entrées dans l'*analyse de station* pour la période durant laquelle le travail a été effectué, soit le début de la période d'application de la courbe. Selon la longueur et la complexité d'une correction de détarage, il peut être nécessaire de la décrire dans plus d'une *analyse de station* afin de bien caractériser l'effet de son début et de sa fin sur les données.

1.4.1 Identification

L'identification des courbes de tarage suit les règles suivantes :

- On attribue à chaque nouvelle courbe de tarage un numéro d'identification qui augmente de 1 par rapport à celui de la courbe précédente. Par exemple, la courbe de tarage 12.00 aurait été établie après la courbe 11.00.
- Une courbe garde son numéro d'identification d'origine tant qu'elle n'a pas été modifiée. Une courbe est modifiée lorsqu'on change un de ses paramètres (C , b ou h_o) ou une de ses *transitions*.
- Le numéro d'identification initialement attribué à une courbe de tarage ne doit jamais changer.
- La séquence de numérotation ne doit pas être interrompue.
- Le même numéro d'identification ne doit pas être utilisé pour différentes courbes à une station donnée.
- On ne doit pas donner un nouveau numéro d'identification à une courbe simplement parce qu'on a attribué à celle-ci une nouvelle période d'application, même si cette période est non contiguë.

L'identification des extrapolations d'une courbe de tarage suit une règle spéciale :

- Une courbe qu'on a extrapolée porte le même numéro d'identification que la courbe d'origine, mais on lui ajoute une valeur décimale qui augmente de 0.01 par rapport à l'extrapolation précédente. Par exemple, une courbe 11.01 serait la première extrapolation de la courbe 11.00. On considère les diverses extrapolations d'une courbe comme faisant partie d'une famille de courbes caractérisées par des équations et *transitions* semblables. Cette numérotation spéciale facilite l'identification et la vérification des extrapolations d'une courbe. Elle s'applique si la courbe a été extrapolée à son extrémité supérieure, à son extrémité inférieure ou aux deux à la fois.

Note opérationnelle : Dans AQUARIUS 3.6, un changement de qualification de toute partie d'une courbe de tarage modifierait les données antérieurement produites au moyen de cette courbe. Il faut donc identifier les courbes de tarage modifiées par un changement de qualification en suivant la même règle pour les courbes extrapolées.

1.4.2 Description

Les métadonnées sur la courbe de tarage doivent comprendre les renseignements suivants, qui décrivent comment et pourquoi la courbe a été établie, ainsi que les enjeux à aborder durant sa validation :

- Application
 - Première date de début de l'application de la courbe.
- Justification
 - Objet et justification du travail effectué sur une courbe, p. ex. pour une station nouvellement établie, un changement dans le contrôle ou une extrapolation.
- Complexité
 - Évaluation à savoir si une équation hydraulique simplifiée semble convenir à toutes les conditions attendues à la station.
- Structure
 - Description des segments et des *transitions* qui devraient représenter les propriétés de la section transversale de la rivière (géométrie, géologie ou végétation) et les types de contrôle (par section, par chenal, par la plaine inondable), y compris une description du point où l'écoulement cesse et du *niveau de débordement*.

- Stabilité
 - Description des facteurs locaux qui peuvent occasionnellement ou régulièrement modifier la relation hauteur-débit.
- Parties « estimées » de la courbe
 - Description de la raison pour laquelle certaines parties de la courbe sont considérées comme mal définies et donc « estimées ».

1.4.3 Mesures d'étalonnage

Pour chacun des jaugeages qui ont influé sur l'élaboration d'une courbe de tarage, les renseignements suivants (soit l'information minimale à laquelle les utilisateurs de la courbe doivent avoir accès) doivent être inscrits dans les métadonnées sur la courbe : ⁵⁸

- Date et heure
- Débit total
- Hauteur d'eau moyenne corrigée
- Ampleur et sens de la variation de la hauteur d'eau (variation positive pour une hauteur croissante et négative pour une hauteur décroissante)
- Conditions de contrôle
- Commentaires

Note opérationnelle : La sélection des mesures visualisées durant l'élaboration d'une courbe de tarage ne peut être sauvegardée dans le logiciel AQUARIUS. Le responsable des calculs doit donc sauvegarder manuellement l'information sur les mesures utilisées pour élaborer ou valider une courbe de tarage. Dans AQUARIUS, on peut exporter cette information sous forme d'un fichier de données séparées par des virgules (Rating Development Toolbox, Field Visit Table, fonction Export as .csv). L'information peut ensuite être résumée et incluse dans les métadonnées sur la courbe de tarage et éventuellement dans l'analyse de station.

Note opérationnelle : AQUARIUS peut afficher l'ampleur et le sens de la variation de la hauteur d'eau qui s'est produite durant une mesure dans la fenêtre Time Series View du Rating Development Toolbox.

1.4.3.1 État du contrôle

De bonnes notes sur les conditions de contrôle observées lors d'une visite de station (non déduites par la suite) sont essentielles pour l'analyse des courbes de tarage ou leur correction. Ces notes, qui peuvent comprendre des images, aideront à déterminer si la modification d'une courbe est permanente ou temporaire.⁵⁹ Les notes doivent également préciser dans quelle mesure les conditions observées ont influé sur le contrôle. Une description de l'état du contrôle doit donc accompagner chaque mesure et comprendre ce qui suit :

- une description générale de l'état du contrôle choisi parmi les catégories normalisées de RHC (voir plus bas);
- des remarques justifiant ce choix de l'état du contrôle et indiquant comment et dans quelle mesure il influe sur l'écoulement.

Les catégories normalisées de l'état du contrôle de RHC doivent être utilisées pour indiquer le principal facteur qui influe sur un contrôle. Notez que les effets de certaines des catégories ne diffèrent que par la façon dont ils varient dans le temps.

Voici les catégories normalisées de l'état du contrôle :

- Pas d'observation
 - Aucune information recueillie sur le contrôle.
- Pas d'écoulement
 - Aucun écoulement au contrôle (bien que le bassin de jaugeage n'était pas nécessairement à sec).

⁵⁸ WMO 1044 p.II.1-3

⁵⁹ Spehar 2013

- Libre
 - Rien ne semble entraver l'écoulement au contrôle.
- Débris
 - Des débris épars ont dérivé ou se sont accumulés sur le contrôle.
- Modifié
 - Le contrôle a été modifié par des activités humaines ou animales.
- Végétation
 - Présence de végétation dans le tronçon de contrôle.
- Sédimentation
 - Hausse du niveau du contrôle causée par l'accumulation observée de sédiments.
- Érosion
 - Baisse du niveau du contrôle causée par l'érosion observée de sédiments.
- Glace
 - Présence de glace entravant l'écoulement dans le tronçon de contrôle.

1.4.4 Correction de détarage

Toute correction de détarage appliqué à une courbe doit être décrite comme suit dans les métadonnées sur la courbe de tarage :

- Période d'application de la correction
 - Dates et heures de début et, le cas échéant, de fin de la période durant laquelle la correction est appliquée.
- Hypothèse de détarage
 - Description de la cause et de l'effet présumés du détarage.
- Ampleur de la correction en fonction de la hauteur d'eau
 - Énoncé justifiant le choix de la méthode (p. ex. correction en section) utilisée pour définir la correction en fonction de la hauteur d'eau.
- Ampleur de la correction en fonction du temps
 - Énoncé justifiant le choix de la variation de la correction dans le temps.

1.5 Mise en œuvre de la courbe de tarage

Lorsqu'on met en œuvre une courbe de tarage, il faut tenir compte des attentes des clients et des exigences opérationnelles pour déterminer comment et quand produire et publier la courbe et ses données de débit. Selon les objectifs de la station, il pourrait être préférable d'attendre que la courbe soit plus fiable ou de publier les données sous forme préliminaire ou « estimée » dès que possible.

Conformément à la règle de RHC sur les chiffres significatifs et les décimales, aucune donnée ne doit être exprimée plus précisément que 0,001 m³/s pour le débit ou 0,001 m pour la hauteur d'eau.

1.5.1 Période d'application

La période d'application est l'intervalle de temps durant lequel une courbe de tarage est jugée stable et peut servir à produire des données. Une courbe peut avoir plusieurs périodes d'application, contiguës ou non. L'attribution d'une nouvelle période d'application ne constituant pas une modification de la courbe, elle ne nécessite pas de changement de numéro d'identification. Il faut documenter toutes les périodes d'application d'une courbe dans ses métadonnées (voir la section 1.4 - Métadonnées sur la courbe de tarage).

Une courbe de tarage peut être mise hors service ou remise en service autant de fois que les conditions le justifient. Il faut toutefois expliquer pourquoi une vieille courbe a été réutilisée dans l'*analyse de station*. Voir les détails à la section 1.4 - Métadonnées sur la courbe de tarage.

Note opérationnelle : Dans AQUARIUS, une courbe de tarage produit des données dès qu'on lui attribue une période d'application.

1.5.2 Transition entre deux courbes de tarage

Avant toute mise en service d'une courbe de tarage, la date du début de sa période d'application doit avoir été recommandée par le *responsable des calculs* et *approuvée* par son superviseur. Cette date doit permettre une transition en douceur entre l'ancienne et la nouvelle courbe. Si l'on ne peut éviter une discontinuité dans l'hydrogramme lors d'une transition, cette discontinuité ne doit pas dépasser 5 %. Si la transition doit être lissée manuellement entre deux courbes, il faut le faire en appliquant une correction de détarage de part et d'autre du point de transition.

Si l'on décide de réviser une courbe de tarage en raison de corrections qui s'y appliquaient sur une longue période, la courbe initialement corrigée doit être comparable à la nouvelle courbe au point de transition. Dans cette situation, la transition entre la courbe corrigée et la nouvelle courbe devrait coïncider avec une visite de station afin d'éviter toute discontinuité dans les données produites. Une correction supplémentaire ne sera alors probablement pas nécessaire pour lisser la transition.

L'application d'une correction dans l'hydrogramme de la courbe pour éliminer toute discontinuité n'est pas une solution recommandée. En effet, une telle correction ne s'adapterait pas à un éventuel changement dans le modèle ou ses intrants et pourrait alors causer des erreurs difficiles à repérer et à corriger.

Note opérationnelle : *L'intégration (blending) de deux courbes de tarage est une technique utilisée par certains organismes d'hydrométrie pour atténuer les différences entre les résultats de courbes consécutives. Cette technique est une alternative aux corrections de détarage lorsque les conditions alternent de façon cyclique entre deux courbes de tarage. Cette technique d'intégration ne doit pas être utilisée à RHC. AQUARIUS intègre deux courbes là où leurs périodes se chevauchent. Puisque la version 3.6 d'AQUARIUS permet à l'utilisateur de modifier une période d'application approuvée, il faut faire preuve de prudence, car on pourrait ainsi intégrer deux courbes par inadvertance et modifier des données approuvées.*

Références

- Boiten, W. (2008). *Hydrometry*, IHE Delft Lecture Note Series, 3rd Edition, CRC Press, UK.
- Braca, G. (2008). *Stage–Discharge Relationships in Open Channels: Practices and Problems*. FORALPS Technical Report, 11. Università degli Studi di Trento, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Trento, Italy.
- Devore, J.L. (2000). *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 5th edition, Duxbury Press, USA.
- Environnement Canada (1982). qSOP-NA009-05-1982 Calcul et publication des données hydrométriques, Direction générale des eaux intérieures, Direction des ressources en eau, Ottawa, Canada.
- Environnement Canada (1982). qSOP-NA007-01-1982 Manuel pratique de levés hydrométriques – Jaugeage des cours d'eau, Direction générale des eaux intérieures, Direction des ressources en eau, Ottawa, Canada.
- Environnement Canada (1984). qSOP-NA013-01-1984 Méthodes d'estimation des données hydrométriques, première édition, Direction générale des eaux intérieures, Direction des ressources en eau, Ottawa, Canada.
- Environment Canada (2006). qTEC-NA004-03-2006 Yearly Station Summary Users Guide, Water Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- Environment Canada (2011a). qFOR-NA008-01-2011 Computation Checklist, Water Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- Environment Canada (2011b). *Hydrometric Workstation Study Book, Software Application Training, Classroom Training – Week 1 and 2*, Water Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- Environment Canada (2012). qSOP-NA037-00-2012 *Hydrometric Manual, Data Computations (Beta Version)*, Water Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- Environment Canada (2014a). qFOR-MS003-01-2014 Station Analysis Template, Water Survey of Canada, Regina.
- Environment Canada (2014b). qSOP-NA017-06-2014 File Naming Conventions, Water Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- Environment Canada (2015). *Assessment of the Complexity of Water Survey Canada Discharge Rating Curves*, Internal report by Megan Kondakow, Water Survey of Canada, Ottawa, Canada.
- Goree, B. B., et Loving, B. L. (2005). *Records Management System, User Manual*, U.S. Geological Survey, USA.
- Hamilton, S. (2010). *Recommendations for the Water Survey of Canada Hydrometric Data Production Process Standards*, Aquatic Informatics, Vancouver, Canada.
- Hamilton, S. (2015). "Shifting the Paradigm by Blending Best Practices", *Hydrology and Water Resources Symposium*, Australia.
- Hersch, R. W. (2009). *Streamflow Measurement*, Kindle Edition, 3rd Edition, New York, USA.
- Hydrology Project (1999). *Training Module SWDP 29, How to establish a stage discharge rating curve*, DHV Consultants BV & DELFT HYDRAULICS, World Bank & Government of the Netherlands funded, New Delhi, India.
- International Standards Organization (1996). *ISO 1100-1 Measurement of liquid flow in open channels, Part 1: Establishment and operation of a gauging station*, Geneva, Switzerland.
- International Standards Organization (1998). *ISO 1100-2 Measurement of liquid flow in open channels, Part 2: Determination of the stage-discharge relation*, Geneva, Switzerland.
- Kennedy, E.J. (1984). *Discharge ratings at gaging stations: U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, book 3, chapter A10, Washington, USA.

Kenny, T. (2013). "Surface-Water Records", Surface-Water Procedures and Policies Training, USGS Training Course SW1660, U.S. Geological Survey, USA. (<http://training.usgs.gov/TEL/Nolan/SWProcedures/Index.html>)

Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., et Le Boursicaud, R. (2014). "Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: a Bayesian approach." Journal of Hydrology, Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 573-587.

NEMS Steering Group (2016). National Environmental Monitoring Standards, Rating Curves, Construction of stage-discharge and velocity-index ratings, Version 1.0, New Zealand. (<http://www.lawa.org.nz/media/2632366/NEMS-Ratings-Feb-2016.pdf>)

NIST/SEMATECH (2012). "e-Handbook of Statistical Methods", USA. (<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>)

Organisation météorologique mondiale (2008). Guide des pratiques hydrologiques, volume 1, Hydrologie – De la mesure à l'information hydrologique, OMM n° 168, 6^e édition, Genève, Suisse.

Organisation météorologique mondiale (2009). Guide des pratiques hydrologiques, volume 2, Gestion des ressources en eau et application des pratiques hydrologiques, OMM n° 168, 6^e édition, Genève, Suisse. **Le vol. 2 date de 2009; voir http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=16313#.Vyud8k8UU_w**

Pyle, D. (1999). Data Preparation for Data Mining, Morgan Kaufmann Publishers Inc., USA.

Ramsbottom, D.M., et Whitlow, C.D. (2003). Extension of Rating Curves at Gauging Stations, Best Practice Guidance Manual, R&D Manual W6-061/M, Environment Agency, UK.

Rantz, S. E., et collaborateurs (1982). Measurement and Computation of Streamflow, Volume 2, Computation of Discharge. Water Supply Paper 2175, U.S. Geological Survey, USA.

Sauer, V.B. (2002). Standards for the Analysis and Processing of Surface-Water Data and Information Using Electronic Methods, Water-Resources Investigations Report 01–4044, U.S. Geological Survey, USA.

Spehar, T. (2013). "Stage-Discharge Relations", Surface-Water Procedures and Policies Training, USGS Training Course SW1660, U.S. Geological Survey, USA. (<http://training.usgs.gov/TEL/Nolan/SWProcedures/Index.html>)

USGS (2008). "Continuous Records Processing Implementation Plan", Prepared by the Continuous Records Processing Implementation Committee, U.S. Geological Survey, USA.

World Meteorological Organization (2010a). Manual on Stream Gauging, Vol. I: Fieldwork, WMO No. 1044, Geneva, Switzerland.

World Meteorological Organization (2010b). Manual on Stream Gauging, Vol. II: Computation of Discharge, WMO No. 1044, Geneva, Switzerland.



Gouvernement
du Canada

Government
of Canada

