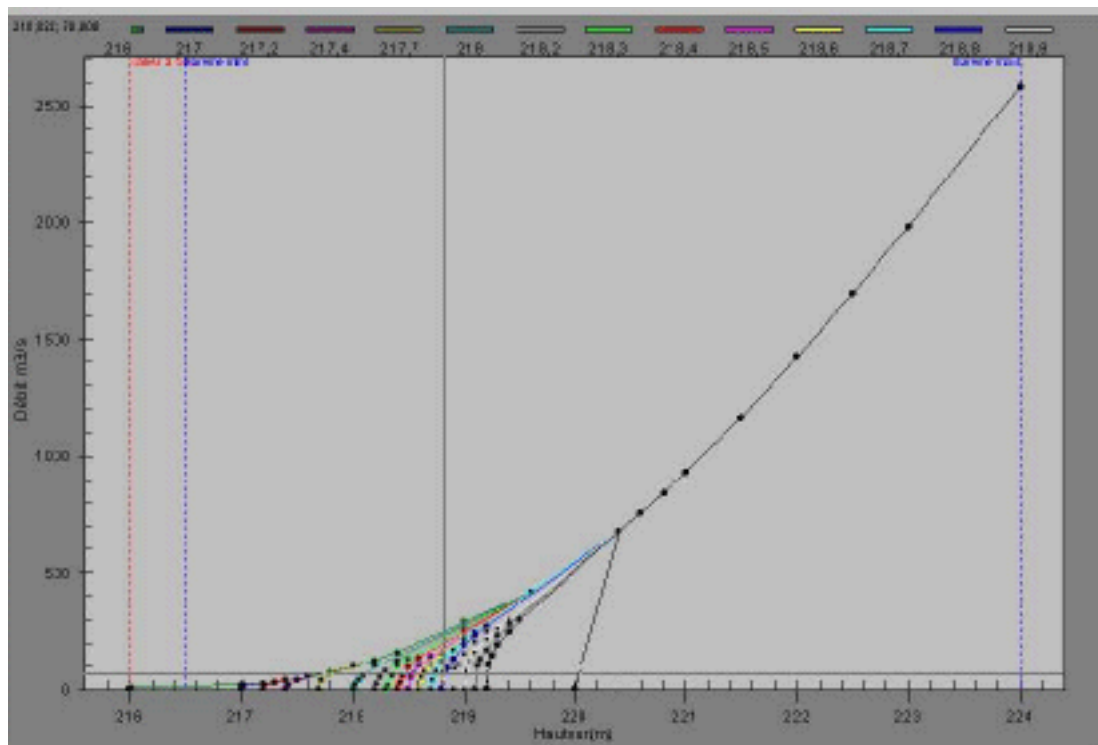




PROJET VOLTA-HYCOS



SEMINAIRE DE FORMATION SUR LES COURBES DE TARAGE

Accra – 23– 27 Avril 2007

Introduction

Dans le tarage d'une station hydrométrique, on recherche la relation qui existe entre les hauteurs relevées sur une échelle limnimétrique et les débits qui leur correspondent. La série des hauteurs - que nous désignerons par *chronique limnimétrique* - est caractérisée par sa période de *validité* et son *intervalle* de variation, limité par les hauteurs minimale et maximale observées.

Il est évident que la relation existe dans tous les cas. Mais en pratique, il peut être impossible de la déterminer même d'une manière approximative, soit parce que les données sont insuffisantes, soit parce que le bief hydrométrique concerné présente une grande instabilité géométrique et/ou hydraulique, soit pour les deux raisons.

Pour définir cette relation, l'hydrologue dispose d'un ensemble d'informations sur le bief et la station hydrométrique, de la chronique limnimétrique et de jaugeages en nombre et qualité variables. C'est à partir de ces données que la relation entre la hauteur d'eau et le débit - que nous désignerons par *relation $Q(h)$* - est progressivement définie par un travail méthodique, qui peut être divisé en huit étapes successives, qui sont les suivantes :

- 1- examen du dossier de la station,
- 2- inventaire de la chronique limnimétrique et des jaugeages existants,
- 3- critique systématique des jaugeages,
- 4- analyse de la répartition des jaugeages sur le graphique de tarage,
- 5- tracé de la courbe de tarage,
- 6- extrapolation,
- 7- barème de tarage,
- 8- rapport final.

Cette séquence peut paraître un peu théorique. Il nous paraît néanmoins essentiel qu'elle soit scrupuleusement suivie : la définition du tarage d'une station hydrométrique est toujours la phase délicate du processus de calcul des débits et d'innombrables erreurs ont été faites parce qu'une ou plusieurs de ces étapes a été négligée.

1. EXAMEN DU DOSSIER DE LA STATION

Le dossier d'une station hydrométrique bien exploitée devrait contenir toutes les informations sur :

- la localisation de la station et en particulier la position des sections de l'échelle, du limnigraphe, de contrôle si elle existe, dans le bief hydrométrique ;
- les caractéristiques géométriques du bief et des différentes sections : profils transversaux et longitudinaux, nature du fond et des berges, situation et extension des zones de débordement, singularités du tracé et présence d'obstacles naturels ou artificiels (pont, radier,...) ;
- les équipements hydrométriques : échelle, limnigraphe, passerelle ou téléphérique de jaugeage,... ;
- l'historique de la station : date de mise en service, destructions et réparations, événements rares (crues, arrêts de l'écoulement,...) ;
- l'historique de la gestion, en particulier les changements d'observateurs et les rapports de visite des hydrométristes.

L'examen du dossier doit conduire à une bonne connaissance de la station : on doit par exemple avoir une idée précise de la stabilité du lit, de la présence d'un contrôle hydraulique, des changements survenus dans l'équipement ou la gestion, de la technique utilisée pour les jaugeages.

Si le dossier est incomplet ou n'existe pas - cas assez rare - une visite des lieux est nécessaire. Cette visite ne doit pas être contemplative. Elle doit se faire avec du matériel de topographie et un carnet de notes : même si la station est fermée depuis un certain temps, il est toujours possible de recueillir sur place des informations de la plus grande importance (pour le moins un bon profil transversal de la section de l'échelle, indispensable pour l'extrapolation de la courbe).

2. INVENTAIRE DES DONNÉES

Les données inventoriées sont la chronique limnimétrique et tous les jaugeages disponibles.

2.1 La chronique limnimétrique

Les hauteurs d'eau - ou cotes limnimétriques - sont lues sur une échelle par un observateur, dont les bulletins mensuels ont été vérifiés et les données ont été transférées sur un support magnétique. Les échelles limnimétriques sont normalement graduées en centimètres mais elles ne sont pas toujours verticales. On évitera donc de considérer qu'un accroissement de la cote de 100 cm par exemple correspond à une augmentation de la profondeur de 1 mètre. C'est très généralement le cas mais ce n'est pas obligatoire.

Les séries de hauteurs proviennent aussi des enregistrements graphiques obtenus avec des limnigraphes. Ces diagrammes fournissent des données qui viennent compléter la séquence des hauteurs lues sur l'échelle.

Aujourd'hui les séries limnimétriques sont de plus en plus fréquemment enregistrées sur les cartouches magnétiques de limnigraphes électroniques.

La *chronique limnimétrique* ainsi obtenue, et disponible sur un support informatique, est caractérisée par :

- sa durée : dates/heures de début et de fin des observations ;
- son amplitude : hauteurs minimale et maximale observées ;
- sa continuité : absence de lacunes d'observation ;
- sa fidélité : observations bien réparties dans le temps permettant une exacte reconstitution du limnigramme ;
- son homogénéité : toutes les observations ont été faites dans la même section et sur la même échelle, dont l'altitude n'a jamais varié.

L'examen graphique des hauteurs et une bonne connaissance du dossier permet souvent de diviser la chronique limnimétrique en *sous-chroniques* homogènes.

A chacune de ces sous-chroniques correspond une relation $Q(h)$.

2.2 Les jaugeages

Un jaugeage est défini par un débit et la cote qui lui est associée.

La cote associée h_a est celle qui a été lue sur l'échelle si la hauteur est restée stable pendant toute la durée de la mesure. Si ce n'est pas le cas, on utilise :

- soit la moyenne arithmétique des hauteurs observées au début et à la fin du jaugeage, si la variation est faible ;
- soit la moyenne pondérée par les débits unitaires mesurés sur chaque verticale, si la variation est forte :

$$ha = \frac{\sum h_i q_i}{\sum q_i}$$

h_i et q_i sont respectivement la cote et le débit unitaire correspondant à chacune des verticales. Tous les couples (h_a , Q) doivent être répertoriés, y compris les jaugeages aux flotteurs, les estimations de débit basées sur des formules hydrauliques et les constats d'un arrêt de l'écoulement (qui ne correspondent pas à une cote nulle le plus souvent).

3. CRITIQUE DES JAUGEAGES

Une critique des jaugeages, préalable à tout report sur le graphique de tarage, est INDISPENSABLE.

Il n'est pas nécessaire pour cela de disposer des originaux de terrain : l'examen critique d'éléments tels que la durée du jaugeage, le nombre de verticales, la technique et le matériel utilisés, la section choisie, les valeurs de la section mouillée, de la vitesse moyenne et de la largeur, est souvent suffisant pour estimer le crédit que l'on peut accorder à chaque mesurage. On ne doit jamais se satisfaire d'une simple liste des couples (h_a , Q) sans aucune donnée complémentaire.

La précision d'un jaugeage dépend de celle de chacun de ces deux termes :

- la hauteur associée est généralement déterminée avec une précision inférieure à 1 % (1 cm pour 1 m) ;
- le débit est par contre rarement mesuré avec une précision inférieure à 5 % ; l'imprécision dépasse 10 % pour les jaugeages de très basses ou hautes eaux et peut atteindre 25, voire 50 % pour des mesurages partiels ou des estimations.

Lors de l'examen critique des jaugeages, deux listes sont établies :

- la première, *chronologique*, permet d'apprécier la répartition des mesurages dans la période de la sous-chronique limnimétrique homogène ;
- la seconde, *classée* suivant les *hauteurs croissantes*, montre la répartition des mesurages dans l'intervalle des hauteurs extrêmes ; elle permet aussi de rapprocher les jaugeages effectués à des hauteurs identiques ou voisines et de juger rapidement de la stabilité de la relation $Q(h)$.

Il est important de porter sur ces listes un maximum d'informations : date, cote associée, débit, section mouillée, vitesse moyenne, largeur, profondeur moyenne, mode opératoire, marque et numéro du moulinet utilisé, durée de la mesure, etc. On y ajoutera une appréciation de la qualité, critère certes subjectif mais d'une grande importance lors de la phase d'analyse de la répartition des points sur le graphique de tarage.

Généralement cette critique est négligée. Ceci revient à considérer que tous les jaugeages ont *a priori* la même précision et donc le même poids sur le graphique de tarage, ce qui est inexact.

4. ANALYSE DE LA RÉPARTITION DES POINTS

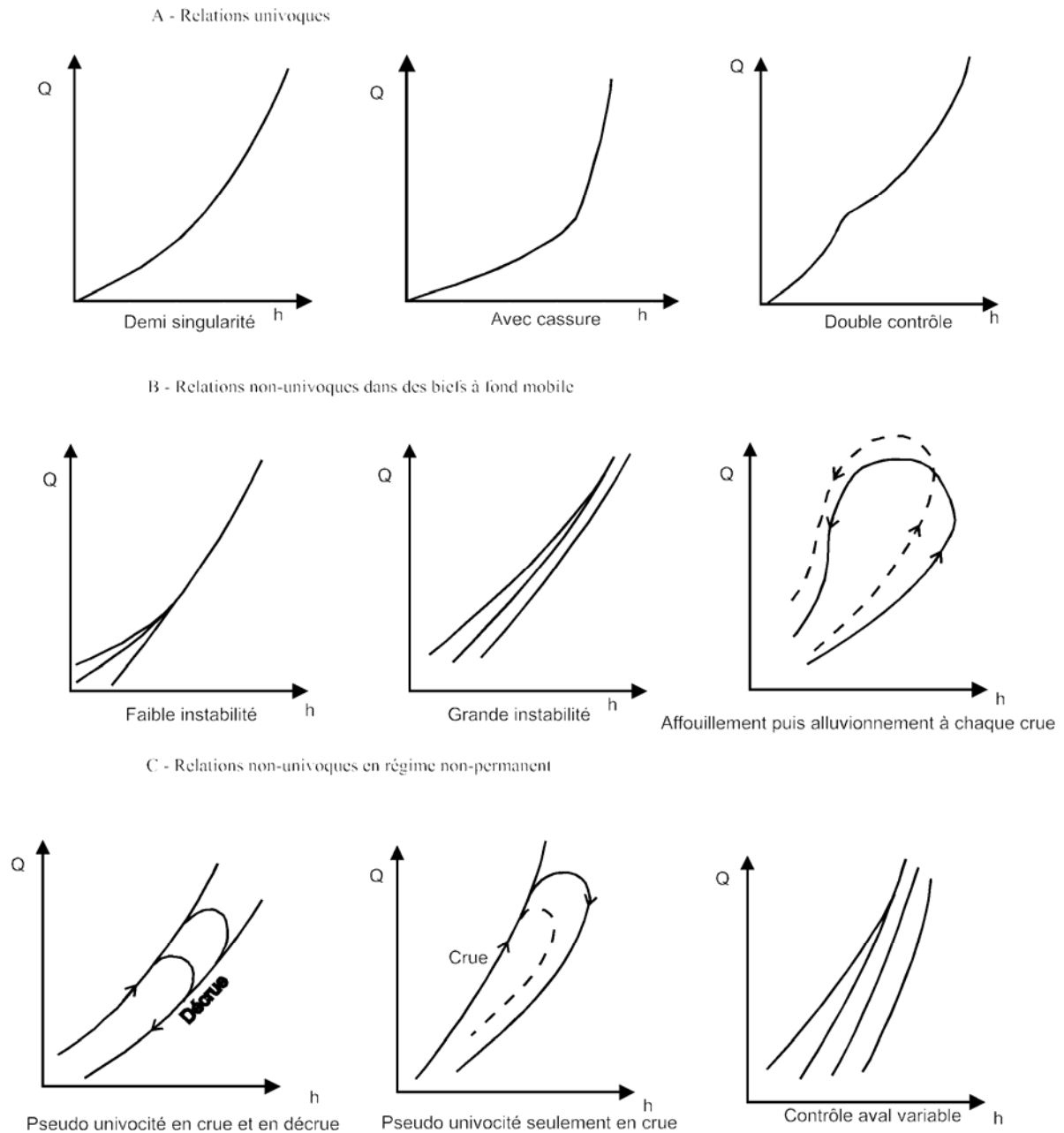
Les courbes de tarage des stations hydrométriques se rapprochent de l'un des schémas théoriques représentés sur la figure 1.

On distingue trois grandes catégories de tarages :

- les tarages univoques des stations à géométrie stable et à contrôle hydraulique permanent ;
- les tarages non univoques des stations situées dans des biefs à géométrie plus ou moins rapidement variables ;
- les tarages non-univoques des stations situées dans des biefs à régime hydraulique non permanent.

L'analyse de la répartition des points sur le graphique de tarage permet d'associer la relation étudiée à l'un de ces schémas théoriques.

Figure 1- TYPE DE COURBES DE TARAGE



4.1. Le graphique de tarage

Pour y parvenir, on établit, à la main ou par un procédé automatique, le *graphique de tarage*, en respectant les consignes suivantes :

- coordonnées arithmétiques ;
- report de TOUS les points de jaugeage ;
- utilisation de symboles graphiques ou de couleurs différentes pour identifier facilement les jaugeages appartenant à une même série chronologique (année par exemple) ou à toute autre caractéristique susceptible de guider l'analyse (crue/décru, même section de jaugeage, même moulinet).

Il est essentiel que le format de papier utilisé permette une vision globale, sans aucune déformation, de la répartition des points. A ce stade de l'étude on ne doit pas utiliser plusieurs graphiques. Le report graphique des points est recommandé, surtout pour les tarages non-univoques : bien que longue et fastidieuse, cette opération permet à l'opérateur de voir apparaître les tendances, les particularités et les anomalies de la répartition des points. Peu importe que ce travail soit fait à petite échelle (format A4 par exemple) puisque le tracé définitif de la courbe de tarage sera réalisé lors de l'étape suivante, au cours de laquelle on pourra utiliser plusieurs graphiques, avec plusieurs échelles arithmétiques ou logarithmiques.

4.2 Examen de la répartition des points

Après report de tous les jaugeages, la phase d'analyse commence réellement. Toute dispersion doit être expliquée.

On recherche d'abord la raison des tendances *systématiques*, c'est-à-dire celles qui concernent plusieurs jaugeages. Les points isolés sont analysés dans une seconde phase. Ils ne doivent jamais être éliminés, *a priori*, pour cause de mauvaise qualité : un point isolé peut être le seul indice de non-univocité (cas assez fréquent pour les stations contrôlant des petits bassins versants parce que 90 % des jaugeages y sont réalisés lors des décrues).

Une déviation systématique, durant une période bien définie, peut être due au matériel utilisé (moulinet détaré), au mode opératoire, à la méthode de calcul du jaugeage ou encore à une hétérogénéité dans la chronique limnimétrique.

La figure 2 montre, par exemple, une anomalie systématique due, pour 4 jaugeages de l'année 1977, à l'utilisation d'une équation de moulinet qui ne correspondait pas à l'hélice utilisée.

La figure 3 montre une forte dispersion des points qui ne présente aucun caractère systématique apparent. Elle traduit soit une imprécision des mesurages, soit une non-univocité de la relation $Q(h)$.

La *non-univocité* a pour cause l'instabilité géométrique du bief ou la non-permanence du régime hydraulique ou encore les deux ensemble.

Instabilité géométrique

L'instabilité géométrique du bief hydrométrique est progressive (figure 4), lorsque pour une même cote les débits augmentent ou diminuent avec la section mouillée : le cas le plus fréquent est celui d'un bief envahi par des herbes.

Les crues fortes entraînent souvent une modification rapide du profil transversal. C'est aussi le cas des interventions humaines (prélèvement de graviers, construction de ponts...) la figure 5 en illustre les conséquences sur la répartition des jaugeages. Dans ce cas la date exacte du changement de tarage doit être déterminée avec précision, soit à partir de la chronique limnimétrique, soit avec les informations du dossier de la station. On remarquera que le phénomène est totalement indépendant du calendrier et qu'il a très peu de chances de se produire le dernier jour d'un mois à 24 h ou le 31 décembre, comme

on le trouve souvent dans les Annuaire Hydrologiques. La mauvaise habitude de tracer une courbe de tarage chaque année conduit souvent à des discontinuités dans les chroniques de débit.

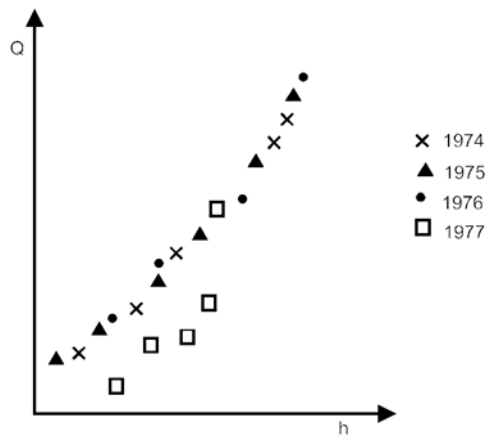


Fig.2 - Anomalie systématique

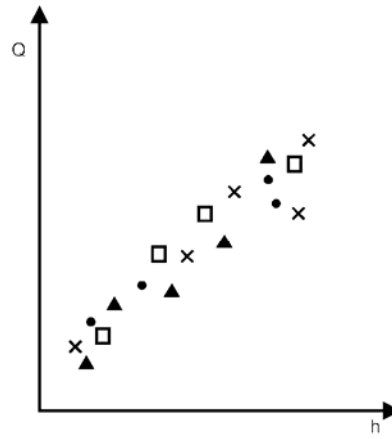


Fig.3 - Anomalie non-systématique

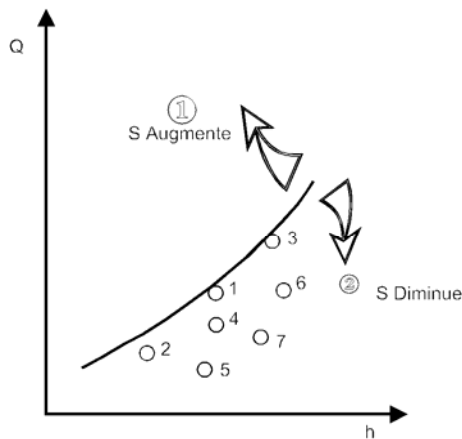


Fig.4 - Variation progressive de la section mouillée

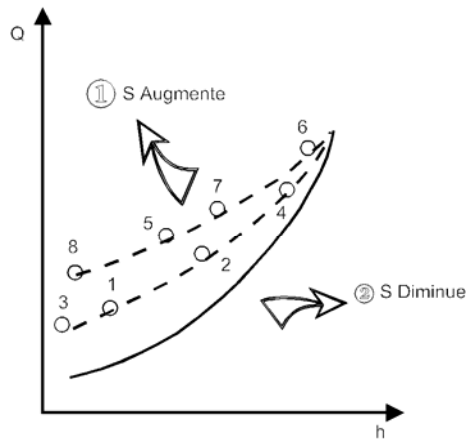


Fig.5 - Variation rapide de la section mouillée

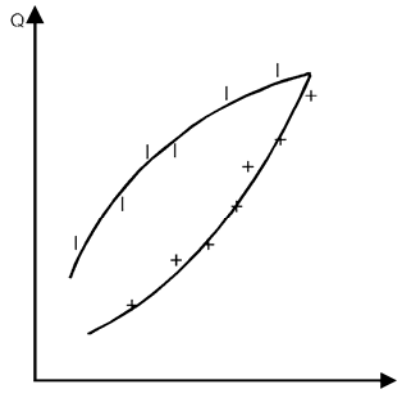
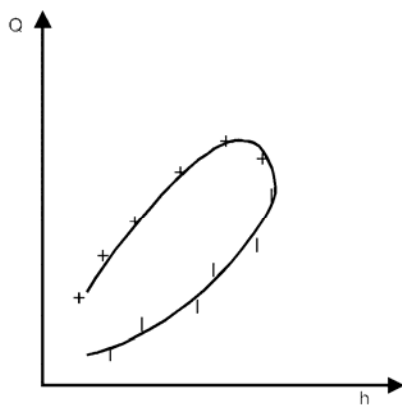


Fig.6 - Organisations cycliques

Instabilité hydraulique

Lorsque la pente superficielle n'est pas la même en crue qu'en décrue pour une cote donnée, une organisation cyclique des points, en forme de « raquette », apparaît généralement de manière assez nette (figure 6). L'identification d'un seul cycle, même s'il est incomplètement dessiné peut être considéré comme un indice certain de non-univocité (sauf erreur systématique de mesurage).

L'organisation cyclique peut passer inaperçue :

- si la tendance non-univoque est peu marquée (écart entre les courbes de crue et de décrue très faible) ;
- si les jaugeages exécutés dans un même cycle sont peu nombreux ou mal répartis entre les phases ascendantes et descendantes du plan d'eau ;
- si une organisation chronologique ou des erreurs de mesurage augmentent la dispersion.

Les deux méthodes les plus utilisées pour définir le tarage d'une station hydrométrique sont la dénivelée normale et le *gradient limnimétrique*.

Ces deux méthodes consistent à rechercher la relation $Q_0(h)$ en régime supposé permanent et la correction qui doit être appliquée au débit fictif Q_0 pour obtenir le débit réel Q .

Dans la méthode de la dénivelée normale, la correction est proportionnelle au rapport entre la dénivelée réelle et une valeur de référence, dite dénivelée normale, qui serait celle existante si le régime était permanent. La dénivelée est la différence entre la cote à l'échelle de la station et la cote à une échelle secondaire située à l'amont ou à l'aval, ce qui implique donc l'existence d'une chronique limnimétrique secondaire complète sur toute la période. Cette méthode est précise mais la disponibilité d'une chronique secondaire est limitative.

Le gradient limnimétrique est la valeur, positive durant la crue et négative durant la décrue, de la tangente au limnigramme. On le calcule par simple différence entre la cote du jour considéré et la cote observée 2 ou 3 jours avant. La correction appliquée au débit Q_0 est proportionnelle au gradient. L'avantage de cette méthode, moins précise et moins efficace que la précédente, est de faire appel à la seule chronique des hauteurs de la station étudiée.

La mise en oeuvre de ces deux méthodes est assez laborieuse (cf. Manuel d'Hydrométrie 3ème chapitre). Elle est néanmoins nécessaire, car la différence entre les débits de crue et de décrue peut atteindre 50 % dans des biefs hydrométriques à très faible pente naturelle.

4.3 Conclusion

A notre avis, la phase d'analyse de la répartition des points de jaugeage sur le graphique de tarage est la plus importante. Si l'interprétation est exacte, c'est-à-dire si le type de tarage a été correctement identifié, les étapes suivantes - tracé de la courbe, extrapolation et barème de tarage - ne présenteront plus aucune difficulté : les procédures à suivre sont bien définies et peuvent être appliquées sans erreur par des adjoints techniques. Ceci n'est pas le cas de l'étape d'analyse pour laquelle une bonne connaissance des lois de l'hydraulique est indispensable.

5. TRACE DE LA COURBE DE TARAGE

Le tracé de la courbe de tarage est fait sur un graphique à grande échelle, en coordonnées arithmétiques. Certains préfèrent utiliser un seul papier de grand format, d'autres plusieurs feuilles A4, d'autre des papiers spéciaux en échelles logarithmiques. Peu importe, si le tracé de la courbe est :

- *exact*, c'est à dire s'il respecte les conclusions de l'analyse effectuée antérieurement ;
- *précis*, c'est à dire s'il permettra de lire les débits avec une marge d'erreur minimale.

Figure 7 - Égale répartition des points

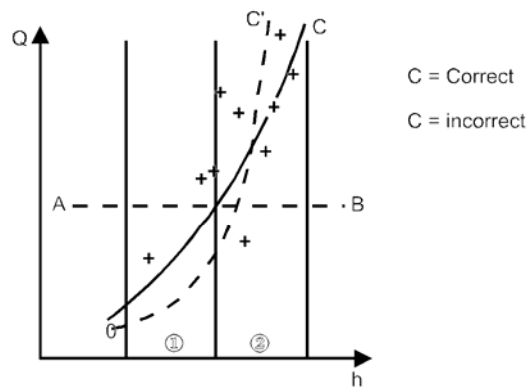
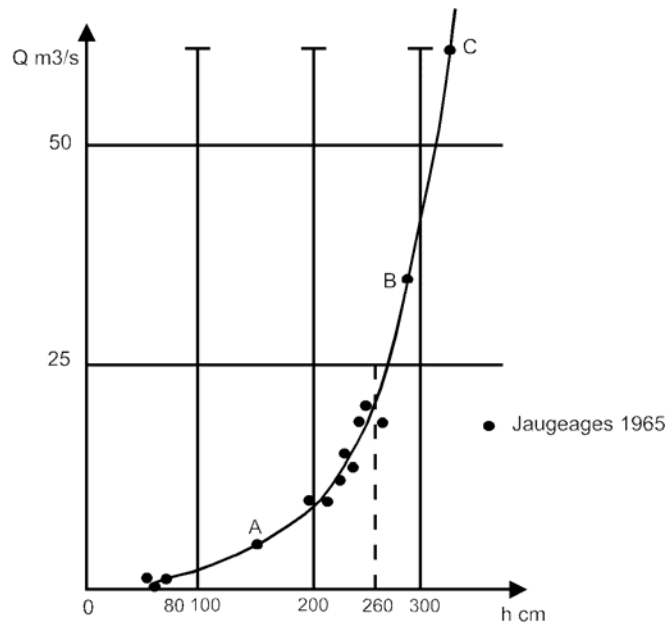


Figure 8 - Précision du tracé
(Oued NIORDE en Mauritanie)



Deux règles doivent être respectées lors du tracé de la courbe :

- *l'égalité répartition* des points, de part et d'autre de la courbe ; cette règle est appliquée par tronçons successifs aussi limités que la densité des points le permet, de telle manière que toutes les irrégularités du tracé soient prises en compte (figure 7) ;
- *la minimisation des écarts* à la courbe ; les écarts sont pris dans le sens vertical, c'est à dire suivant les débits (rappelons que les hauteurs sont connues avec une précision très supérieure à celle des débits).

Le tracé est effectué par tronçons, en commençant par ceux où les points sont les plus nombreux. Il ne faut pas s'illusionner sur la précision d'un tracé basé sur quelques points isolés. Dans l'exemple de la figure 8, le tracé dans l'intervalle [200,260] est beaucoup plus précis qu'à l'extérieur de cet intervalle.

Dernière recommandation : le tracé doit être fait à main levée. L'utilisation de tout instrument de dessin, de type « perroquet », est exclue : une courbe de tarage n'est pas une parabole ou une exponentielle, du moins dans sa totalité. En dehors du fait que ces instruments masquent les petites anomalies du tracé, ils conduisent souvent à des interpolations ou extrapolations injustifiées.

6- EXTRAPOLATION DE LA COURBE DE TARAGE

La relation Q/h doit être définie dans la totalité de l'intervalle de variation des hauteurs d'une chronique limnimétrique homogène. Cet intervalle, limité par les hauteurs minimale et maximale lues sur l'échelle, est désigné par intervalle de définition du tarage.

En général, le nombre de jaugeages est insuffisant, ou bien la répartition est mauvaise, et la courbe de tarage est incomplète : elle doit donc être extrapolée à ses extrémités.

Les méthodes d'extrapolation diffèrent suivant que le tracé de la courbe doit être prolongé «vers le haut» (moyennes et hautes eaux) ou «vers le bas» (basses eaux).

L'extrapolation vers le haut, qui implique une bonne connaissance du fonctionnement hydraulique de la station en très hautes eaux, peut conduire à modifier le tracé de la courbe : il est recommandé de la faire avant l'extrapolation vers le bas.

6.1- Remarques préalables

6.1.1 Section de référence

Dans un cours d'eau naturel, la relation Q/h n'est pas spécifique de tout un bief mais seulement d'une section unique de ce bief : celle de l'échelle limnimétrique où sont observées les hauteurs. En conséquence, tous les paramètres géométriques et dynamiques utilisés ci-après pour l'extrapolation de la courbe de tarage se rapportent à la section de l'échelle, à l'exclusion de toute autre section.

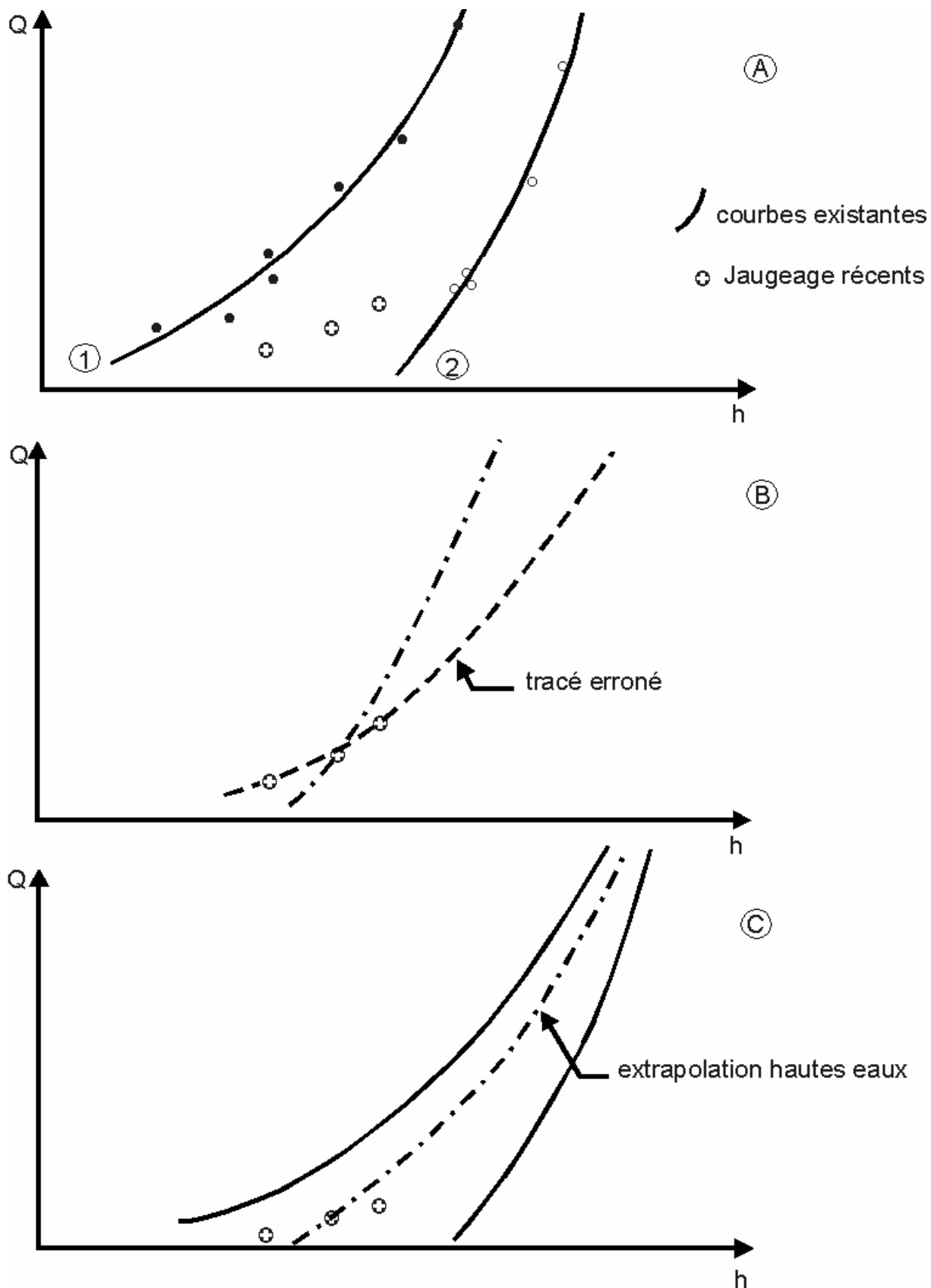
6.1.2- Tracé et extrapolation

Dans certaines stations à forte instabilité, le nombre de jaugeages permet seulement de définir quelques tronçons isolés de chacune des courbes. Il est essentiel dans ce cas, tant pour le tracé que pour l'extrapolation, de s'appuyer sur l'allure générale de toutes les courbes, la seule prise en compte des jaugeages réalisés dans la période de validité, pouvant conduire à une erreur de tracé (fig. 9).

6.2- Moyennes et hautes eaux

On considère souvent, par erreur, que pour extrapoler une courbe, il suffit de la prolonger sans introduire de discontinuité dans sa courbure : d'où l'utilisation abusive de certains instruments de dessin, appelés « perroquets ou pistolets », dont l'usage doit être strictement réservé au dessinateur.

Figure 9
 Tarage de l'Oued Massa (Maroc)
 (d'après B. BILLON)



Extrapoler une courbe, c'est d'abord s'interroger sur la continuité des conditions d'écoulement : comment varient la surface mouillée, la vitesse moyenne ou la pente superficielle lorsque le niveau s'élève au-dessus de la hauteur maximale jaugée ?

Les méthodes d'extrapolation les plus usuelles sont décrites ci-après, suivant un ordre tel que les premières sont les plus faciles à mettre en oeuvre, mais également les plus rarement applicables, compte tenu de leurs contraintes d'utilisation.

Après l'exposé du principe théorique, un exemple d'application de la méthode aux données de l'oued KADIEL est présenté avec tous les détails du calcul.

Les méthodes d'extrapolation ne s'appliquent qu'aux stations à profil transversal stable, du moins dans la période de validité du tarage.

6.2.1- Extrapolation logarithmique

Méthode universellement utilisée en raison de sa simplicité, elle n'est applicable que dans les sections de profil transversal très régulier.

Principe de la méthode

Si la courbe de tarage, du moins dans sa partie supérieure, est de type exponentiel, elle admet pour expression mathématique la formule :

$$Q = a (h - h_0)^n \text{ avec}$$

h = hauteur à l'échelle pour le débit Q ;

h_0 = hauteur à l'échelle pour le débit Q_0 ;

a et n sont des constantes si le lit est très stable et le profil en travers régulier.

Le procédé le plus simple, pour vérifier qu'il en est ainsi dans la section considérée, consiste à reporter les jaugeages sur un papier à échelles logarithmiques et à constater l'alignement des points (après détermination par essais successifs de la valeur de h_0 si nécessaire).

En général, on observe une cassure entre les jaugeages de basses et moyennes eaux : ceci signifie que h_0 doit avoir une valeur assez élevée, qui correspond, au moins, à un recouvrement total du fond du lit mineur. Plus rarement apparaît une seconde cassure, si la station est à double contrôle aval.

Si l'alignement des points vers le haut est correct, on peut prolonger la droite jusqu'à la cote maximale observée.

Contraintes d'utilisation

La méthode d'extrapolation logarithmique n'est applicable que dans certaines conditions très restrictives qui sont les suivantes :

- 1 relation Q/h univoque, de type exponentiel, caractérisée par un bon alignement des jaugeages sur un papier log-log ;
- 2 jaugeages existants jusqu'à une cote suffisamment élevée pour que la direction de la droite soit bien définie ;
- 3 profil en travers sans discontinuité de forme dans la tranche des hauteurs extrapolées ;
- 4 contrôle aval permanent entre moyennes et hautes eaux.

6.2.2 Méthode de STEVENS

Cette méthode utilise la formule de CHEZY et n'est donc applicable qu'aux écoulements pseudo-uniformes.

Principe de la méthode

STEVENS écrit la formule de CHEZY sous la forme $Q/SR^{1/2} = CJ^{1/2}$, après séparation des quantités $SR^{1/2}$ et $CJ^{1/2}$, appelées respectivement facteur géométrique et facteur de pente.

Dans les limites d'application de la formule de CHEZY, les deux termes de l'équation ci-dessus varient très peu.

$Q/SR^{1/2} = \text{constante}$ signifie que la fonction $Q = f(SR^{1/2})$ est représentée, dans un système d'axes rectangulaires, par une droite qui passe par l'origine. Cette droite, tracée à partir des jaugeages disponibles, peut être prolongée jusqu'à la valeur du facteur géométrique correspondant à la cote maximale observée.

Contraintes d'utilisation

Outre la stricte limitation liée à la nécessaire pseudo-uniformité de l'écoulement, la méthode de STEVENS n'est applicable que :

- si le profil est stable : $SR^{1/2}$ ne doit pas varier entre crue et décrue ;
- si l'on dispose d'un nombre suffisant de jaugeages correctement alignés.

Remarque : la formule de CHEZY peut être remplacée par la formule de STRICKLER. On écrit :

$$Q/SR^{2/3} = KJ^{1/2} = \text{constante et on utilise } SR^{2/3} \text{ comme facteur géométrique.}$$

6.3- Extrapolation par surface mouillée et vitesse moyenne

Cette méthode, au contraire des deux précédentes, est applicable aux sections de forme irrégulière.

Principe de la méthode

L'extrapolation de la courbe $Q(h)$ est faite en considérant séparément les deux composantes du débit :

- la surface mouillée S , de dimension L^2 (longueur au carré), est connue avec une bonne précision, si l'on dispose d'un profil transversal jusqu'à la cote maximale ;
- la vitesse moyenne d'écoulement U , de dimension LT^{-1} , dont la croissance avec la hauteur, en moyennes et hautes eaux, est beaucoup moins rapide que celle du débit.

L'extrapolation de la courbe se résume donc, dans cette méthode, à celle de la courbe $U(h)$. La section transversale considérée est la section de l'échelle.

Mise en pratique

Les anomalies du profil transversal étant déjà prises en compte par la relation $S(h)$, la méthode est applicable aux sections de forme irrégulière, quand les conditions d'écoulement sont homogènes. C'est le cas, par exemple, dans un lit moyen, à une certaine distance des singularités.

Mais les conditions d'écoulement sont souvent hétérogènes dans une section transversale complexe : une partie du débit transite à forte vitesse dans le lit moyen et le reste s'écoule dans un lit majeur, encombré de végétation ou partiellement barré par un remblais routier, par exemple.

Pour de tels profils, il est absolument nécessaire de décomposer la section transversale en sous-sections, homogènes quant aux conditions d'écoulement. Pour chacune d'elles sont tracées une courbe $S(h)$ et une courbe $U(h)$. La figure 10 montre comment doit être faite la décomposition d'une section transversale complexe, en trois sous-sections homogènes qui sont :

- le lit moyen (1) dont la courbe $S(h)$ est calculée jusqu'à la cote maximale, après prolongement fictif des berges, tout en conservant leur pente naturelle ;
- le lit majeur de rive gauche (2) assez profond et libre de toute végétation ;
- le lit majeur de rive droite (3) peu profond et encombré de végétation dense.

A chaque courbe $S(h)$ est associée une courbe $U(h)$ tracée à partir de tous les jaugeages ou estimations de débit. Si nécessaire, chaque jaugeage est décomposé pour le calcul de la vitesse moyenne dans chaque sous-section.

L'extrapolation de la courbe $U(h)$ peut être facilitée par l'application de la formule de STRICKLER :

- soit en calculant la vitesse moyenne pour toute valeur de la pente superficielle mesurée sur le terrain, la rugosité K étant estimée à partir des jaugeages ;
- soit en considérant que la vitesse U varie comme la quantité $R^{2/3}$ (c'est-à-dire $U/R^{2/3} = \text{constante}$), si toutefois des observations de terrain ont permis de vérifier la stabilité de la pente superficielle en hautes eaux.

Les courbes $U(h)$ des sous-sections du lit majeur ne peuvent être construites que si les vitesses d'écoulement ont été mesurées sur le terrain. Dans ce cas, la courbe est ajustée au mieux sur les points disponibles et extrapolée linéairement. De fait, l'écoulement dans un lit majeur est d'une telle complexité qu'il est inutile de rechercher une précision illusoire.

En l'absence totale de mesures de vitesses dans le lit majeur, la seule ressource est une estimation directe tenant compte de la pente générale de la rivière, du tirant d'eau à la cote maximale et de la nature de la végétation. L'imprécision d'une telle estimation est grande mais l'erreur commise sur la totalité du débit est acceptable.

D'ailleurs l'erreur provient souvent davantage de l'approximation avec laquelle la surface mouillée réelle est connue. Cette surface réelle peut être de 20 à 50 % inférieure à la surface théorique calculée sur le profil, compte tenu de la végétation, des zones d'eau morte, des contre-courants et des pertes de charges ou variations latérales du niveau.

Ces remarques montrent combien il est important, lorsqu'une crue exceptionnelle déborde largement le lit mineur, de faire des mesures en priorité dans le lit majeur : si le débit maximal du seul lit moyen peut être calculé avec une bonne précision à partir des seuls jaugeages effectués avant débordement, il n'en est pas du tout de même du débit d'un lit majeur duquel on ne sait rien.

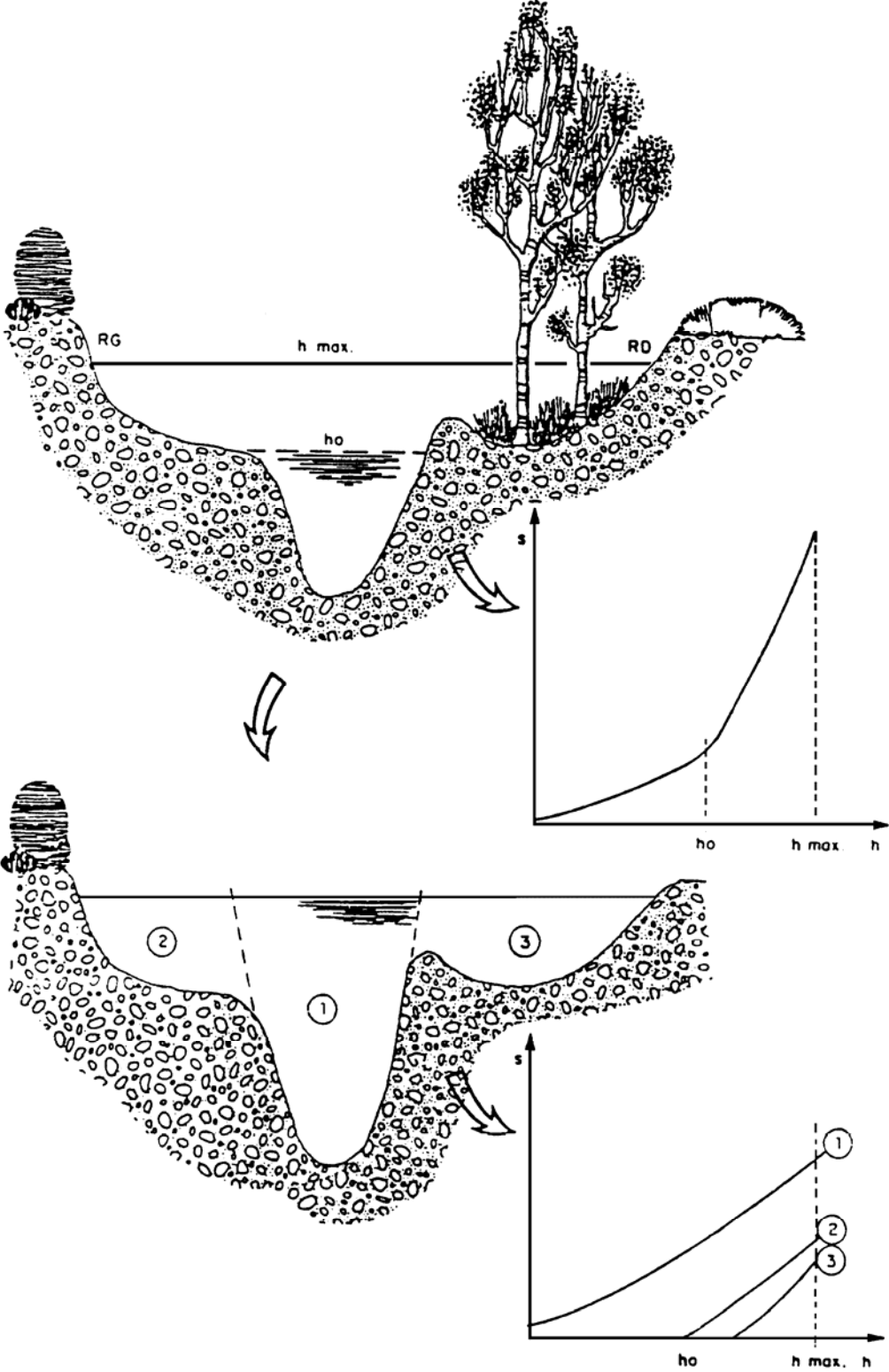
Contraintes d'utilisation

La méthode d'extrapolation par section mouillée et vitesse moyenne n'est pas applicable aux sections transversales à forte instabilité (creusement/remblaiement du lit à chaque crue).

Sa mise en oeuvre dépend de l'existence d'un profil en travers de la section de l'échelle, jusqu'à la cote maximale observée et de jaugeages jusqu'à une hauteur suffisante pour que la courbe $U(h)$ puisse être correctement définie.

On soulignera, comme pour les deux méthodes précédentes, la très grande importance qu'il y a de vérifier le comportement de la pente hydraulique ou du produit $K J^{1/2}$ lorsque le débit augmente.

Figure 10 - Décomposition d'une section transversale complexe



6.2.3- Utilisation des formules d'écoulement

L'hydraulique fournit de très nombreuses formules, à l'aide desquelles il est possible de compléter la liste des jaugeages pour les tranches de hauteurs non jaugeées. Ces jaugeages « calculés » constituent une méthode indirecte d'extrapolation de la courbe de tarage car ils viennent compléter la liste des jaugeages et permettent un tracé continu et complet dans l'intervalle de variation des hauteurs.

Les formules utilisées appartiennent à deux catégories :

- les premières se rapportent aux écoulements uniformes ou peu variés en régime permanent (CHEZY, MANNING, STRICKLER). Ces formules donnent des résultats corrects, quand la pente superficielle a pu être mesurée sur le terrain ;
- les secondes permettent de calculer le débit à partir de la courbe de remous ou de la perte de charge, créées par une singularité naturelle ou artificielle (seuil, pont). Ces formules ont une forme plus complexe que les précédentes. Les plus utilisées sont du type de la formule d'AUBUISSON, applicable aux rétrécissements de section. Cette formule s'écrit :

$$Q = C S (2gy + aU^2 \Delta h)^{1/2}$$

dans laquelle :

C est un coefficient sans dimension, fourni par une table et qui varie de 0,5 à 1 ;

S est la section mouillée au droit du rétrécissement ;

y est l'abaissement de la ligne d'eau ;

a est un coefficient relatif à la répartition des vitesses dans la section ;

Δh est la perte de charge par frottement entre la section contractée et la section amont.

Il est certain qu'une telle formule, appliquée *a priori* à une singularité, ne donne qu'une estimation imprécise du débit. Mais si l'on a pris soin de mesurer sur le terrain les variables y et h pour différents débits jaugeés au moulinet, la valeur du paramètre C peut être calculée avec une meilleure précision et la fourchette d'erreur sur le débit s'en trouve largement diminuée. Cette méthode peut être utilisée dans de nombreuses stations, en particulier celle situées à l'amont de ponts routiers..

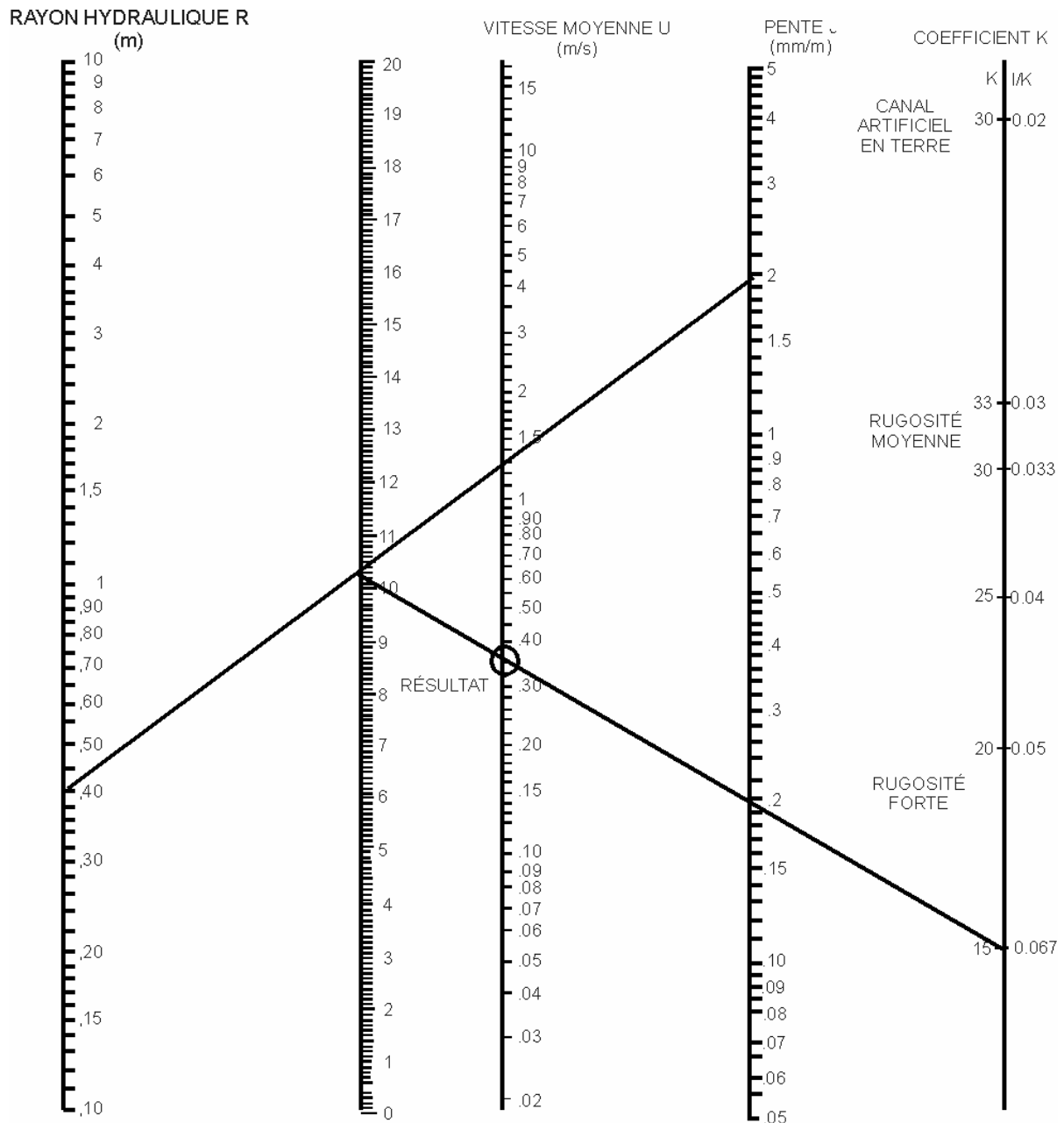
En résumé :

- l'extrapolation du tarage « vers le haut » a pour objet de compléter la courbe jusqu'à la cote maximale observée ;
- les trois méthodes usuelles d'extrapolation, précédemment décrites ne sont applicables qu'aux sections à profil transversal stable ou à faible instabilité ;

de plus :

- * la méthode logarithmique exige un profil transversal régulier,
- * la méthode de STEVENS demande la stabilisation de la valeur de la pente hydraulique ;
- la méthode par section mouillée et vitesse moyenne est la seule applicable aux sections de forme complexe, après décomposition du profil ;
- en pratique, l'extrapolation de la courbe doit être faite en utilisant les trois méthodes, si les conditions d'écoulement le permettent, et en comparant les résultats obtenus.

Abaque pour le calcul de la vitesse moyenne
 Formule de Manning-Strickler : $U = KR^{2/3} J^{1/2}$



Exemple : $R = 0.4 \text{ m}$ $J = 2 \text{ mm/m}$ $K = 15 \Rightarrow U = 0.36 \text{ m/s}$

6.4- Basses eaux

L'extrapolation de la courbe de tarage « vers le bas », c'est à dire jusqu'à la hauteur minimale observée est une opération toujours difficile, dans les sections en lit naturel, c'est à dire non équipées d'un seuil, pour deux raisons, qui sont les suivantes :

- la très mauvaise sensibilité des sections naturelles quand les niveaux sont faibles ;
- la très grande instabilité des tarages de basses eaux, influencés par toute variation du profil, aussi minime soit elle.

Ces deux causes font que certaines stations hydrométriques, d'excellente qualité pour le mesurage des débits supérieurs à quelques m^3/s , sont totalement inadaptées au contrôle des basses eaux par la limnimétrie. Seule, l'exécution de jaugeages périodiques permet de reconstituer correctement la courbe de tarissement.

A ces deux inconvénients, s'ajoute le plus souvent une nette insuffisance des jaugeages :

- en quantité, parce que le mesurage des faibles débits est considéré par les hydrométristes comme un travail routinier et peu important, voire inutile ;
- en qualité, parce qu'en fait les conditions de jaugeage sont très mauvaises : sections mouillées importantes à géométrie irrégulière, vitesses d'écoulements très faibles.

6.4.1- Cas des cours d'eau non pérennes

Le débit s'annule au moins une fois dans la période de validité du tarage.

La hauteur h_0 au moment de l'arrêt de l'écoulement, associée au débit nul, est l'abscisse du point-origine de la courbe de tarage.

Dans de nombreuses stations la hauteur h_0 est différente de zéro, soit parce que l'élément inférieur de l'échelle se situe dans une mouille, soit parce que l'échelle comprend un élément « négatif ».

La hauteur h_0 doit être recherchée :

- soit dans les bulletins limnimétriques originaux, si l'arrêt d'écoulement est signalé par l'observateur (il devrait toujours l'être) ;
- soit dans le limnigramme, où le passage du tarissement à un palier horizontal (à très faible inclinaison due à l'évaporation, si la prise d'eau se trouve dans une mouille), se traduit par une rupture de pente ;
- soit par le nivellement du point le plus bas du seuil de contrôle, situé à l'aval immédiat de l'échelle ;
- soit enfin par la date d'arrêt de l'écoulement, estimé à partir d'une autre station proche.

Connaissant le point d'aboutissement de la courbe de tarage sur l'axe des hauteurs, l'extrapolation au-dessous du jaugeage le plus faible est généralement facile : elle est faite vers le bas en respectant la courbure, pour ne pas introduire de discontinuité.

A chaque arrêt d'écoulement est associé une hauteur h_0 . Si celle-ci ne varie pas d'un arrêt au suivant, il est peu probable qu'un détarage ait eu lieu. Au contraire, une variation de plusieurs centimètres est un signe certain de détarage et pour chaque valeur de h_0 une courbe de basses eaux doit être tracée.

6.4.2- Cas des rivières pérennes

Lorsque l'écoulement ne cesse pas dans la période de validité, il n'existe pas de règle pratique pour guider l'extrapolation de la courbe de tarage « vers le bas ».

Si la cote minimale observée est peu inférieure à la cote minimale jaugée, l'extrapolation est faite « en respectant la courbure ». Si la cote minimale est nettement inférieure, le débit le plus faible est estimé à partir du débit minimal jaugé, en tenant compte de la réduction de la section mouillée (mesurée sur le profil en travers) et de la vitesse moyenne (estimée). Cette méthode n'est applicable que si la réduction de S est sensible (S pas trop important) et si U conserve une valeur significative (quelques centimètres par seconde).

Si la station se trouve sous le contrôle d'un seuil naturel rocheux ou artificiel stable, l'extrapolation de la courbe vers le bas peut-être faite par un procédé logarithmique, la valeur h_0 correspondant au point le plus bas du seuil.

En résumé :

- l'extrapolation du tarage « vers le bas » a pour objet de compléter la courbe jusqu'à la cote minimale observée ;
- dans le cas des rivières non-pérennes, la hauteur pour laquelle le débit s'annule, constitue un repère essentiel pour le tracé de la courbe ;
- dans le cas des rivières pérennes, l'extrapolation peut s'appuyer sur une méthode logarithmique, s'il existe un contrôle aval stable ; sinon, des jaugeages de basses eaux sont indispensables.