

Chapitre 3. Etude des débits des cours d'eau

3.1. La mesure des débits

Pour mesurer le débit d'un écoulement naturel (cours d'eau, canal, dérivation...), il existe quatre grandes catégories de méthodes.

- Les méthodes "**volumétriques**" (ou jaugeage capacitif) permettent de déterminer le débit directement à partir du temps nécessaire pour remplir d'eau un récipient d'une contenance déterminée. Compte tenu des aspects pratiques inhérents à la méthode de mesure (taille du récipient nécessaire, incertitude sur la mesure du temps, aménagement spécifique éventuel), cette méthode n'est généralement pratiquée que pour des débits très faibles, quelques l/s au plus.
- Les méthodes "**d'exploration du champ de vitesse**" consistent à déterminer la vitesse de l'écoulement en différents points de la section, tout en mesurant la surface de la section mouillée. Ces techniques nécessitent un matériel spécifique (moulinet, perche, saumon, courantomètre...) et un personnel formé à son utilisation. Parmi les nombreuses méthodes d'exploration du champ de vitesse, les jaugeages au moulinet et au flotteur sont présentés ci-dessous, ainsi que le principe de fonctionnement des capteurs électromagnétiques.
- Les méthodes "**hydrauliques**" tiennent compte des forces qui régissent l'écoulement (pesanteur, inertie, viscosité...). Ces méthodes obéissent aux lois de l'hydraulique.
- Les méthodes "**physico-chimiques**" prennent en compte les variations, lors de l'écoulement, de certaines propriétés physiques du liquide (concentration en certains éléments dissous). Ces méthodes consistent généralement à injecter dans le cours d'eau un corps en solution, et à suivre l'évolution de sa concentration au cours du temps. Ce sont les méthodes dites «par **dilution**» ou encore «**chimique**».

Toutes ces méthodes de mesures des débits nécessitent généralement un régime d'écoulement en régime fluvial, sauf les jaugeages chimiques, qui sont appropriés en cas d'écoulement torrentiel.

3.1.1. Le jaugeage par exploration du champ de vitesse

Rappelons que la vitesse d'écoulement n'est jamais uniforme dans la section transversale d'un cours d'eau. Le principe de cette méthode consiste donc à calculer le

débit à partir du champ de vitesse déterminé dans une section transversale du cours d'eau (en un certain nombre de points, situés le long de verticales judicieusement réparties sur la largeur du cours d'eau). Parallèlement à cette exploration du champ de vitesse, on relève le profil en travers du cours d'eau en mesurant sa largeur et en effectuant des mesures de profondeur.

Le débit Q [m^3/s] s'écoulant dans une section d'écoulement S [m^2] d'une rivière peut être défini à partir de la vitesse moyenne V [m/s] perpendiculaire à cette section par la relation :

$$Q = V \cdot S.$$

La section d'écoulement peut être évaluée en relevant la profondeur d'eau en diverses verticales réparties régulièrement sur toute la largeur. Plusieurs méthodes permettent de déterminer la vitesse moyenne de l'eau.

1. Le jaugeage au moulinet

Le moulinet hydrométrique (Fig. 3.2) permet de mesurer la vitesse ponctuelle de l'écoulement. Le nombre de mesures sur une verticale est choisi de façon à obtenir une bonne description de la répartition des vitesses sur cette verticale. De manière générale, on fera entre 1, 3 ou 5 mesures suivant la profondeur du lit.

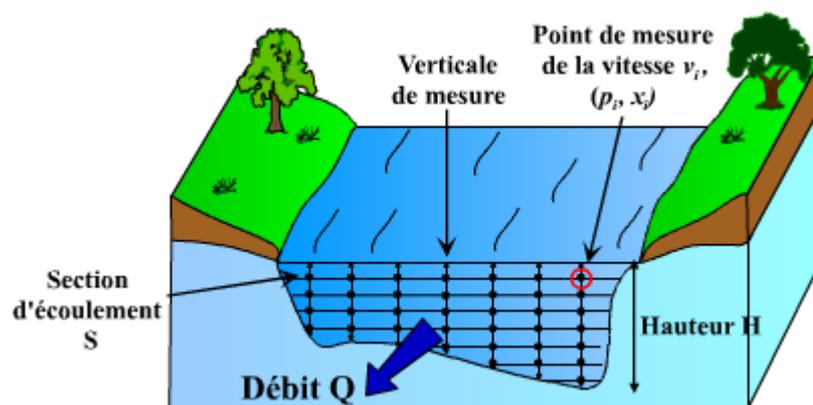


Fig. 3. 2 - Débit et champ des vitesses à travers une section.

La vitesse d'écoulement est mesurée en chacun des points à partir de la vitesse de rotation de l'hélice située à l'avant du moulinet (nombre de tours n par unité de temps). La fonction $v = f(n)$ est établie par une opération d'étalonnage (courbe de tarage du moulinet). Suivant le mode opératoire adopté pour le jaugeage, le moulinet peut être monté sur une perche rigide ou sur un lest profilé appelé "saumon" (Fig. 3.4).

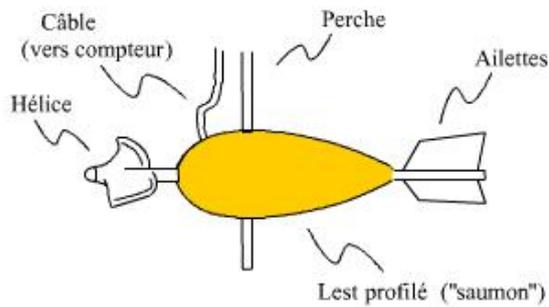


Fig. 3.4 - Adaptation du moulinet aux différents modes opératoires.

Dans le cas du montage sur perche, le moulinet peut être manœuvré de deux manières :

- directement par l'opérateur placé dans l'écoulement (jaugeage à gué), la perche reposant sur le fond du lit du cours d'eau. Cette méthode est utilisable dans des sections de profondeur inférieure à 1 mètre et avec des vitesses d'écoulement inférieures à 1 m/s.
- à partir d'une passerelle, la perche étant suspendue à un support permettant les déplacements verticaux.

Les différents modes opératoires du jaugeage au moulinet monté sur un lest sont présentés dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1. – Méthodes et limites des différents modes opératoires du jaugeage au moulinet monté sur un lest.

Modes opératoires	Limites de la méthode
<ul style="list-style-type: none"> • Mesures à partir d'un pont 	Profondeur < 10 m et vitesse < 2 m/s
<ul style="list-style-type: none"> • Mesure à l'aide d'un canot (Fig. 7.14) 	Profondeur < 10 m et vitesse < 2 m/s
<ul style="list-style-type: none"> • Mesures à partir de stations téléphériques 	Lorsque les vitesses à mesurer dépassent 3 m/s.
<ul style="list-style-type: none"> • Mesures à partir d'un bateau mobile 	Lorsque la rivière est large (> 200 m), uniforme et sans présence de hauts-fonds afin d'y manœuvrer facilement.

Finalement, le calcul de la vitesse moyenne de l'écoulement sur l'ensemble de la section S de longueur L se fait par intégration des vitesses v_i définies en chacun des points de la section de profondeur p_i (variant pour chaque verticale de 0 à une profondeur maximale P) et d'abscisse x_i (variant pour chaque verticale de 0 à L) :

$$Q = \int_S \int V \cdot dS = \int_0^L \int_0^P v_i \cdot dp \cdot dx \quad (3.1)$$

L'énorme avantage de la méthode du moulinet est d'être une technique éprouvée quel que soit son mode opératoire. Le moulinet reste l'appareil le plus utilisé pour la mesure des débits en rivière par exploration du champ des vitesses. Cependant cette méthode nécessite un matériel lourd ainsi qu'un personnel nombreux et de qualité.



Fig. 3.5 - Jaugeage au moulinet à l'aide d'un bateau.

3.1.2. Le jaugeage au flotteur

Lorsque le jaugeage au moulinet ne peut pas être effectué en raison de vitesses et de profondeurs excessives ou au contraire trop faibles, ou de la présence de matériaux en suspension, il est possible de mesurer la vitesse d'écoulement au moyen de flotteurs. Il s'agit dans cette méthode de mesurer uniquement des vitesses de surface, ou plus exactement les vitesses dans la tranche superficielle de l'écoulement (les 20 premiers centimètres environ).

Les flotteurs peuvent être soit artificiels (bouteilles en plastiques) soit naturels (arbres, grosses branches, etc.). Le déplacement horizontal d'un flotteur de surface durant un temps t permet de déterminer la vitesse de l'écoulement de surface. Plusieurs mesures de vitesse du flotteur doivent être réalisées. La moyenne de ces mesures est ensuite multipliée par un coefficient approprié pour obtenir la vitesse moyenne de l'élément de section. En général, la vitesse moyenne dans la section est de l'ordre de 0,4 à 0,9 fois la vitesse de surface.

Cette méthode donne de bonnes approximations du débit, parfois suffisantes pour les études envisagées.

3.1.3. Les sondes électromagnétiques

Différents principes de mesure peuvent être mis en œuvre basés sur le développement récent des instruments utilisant des sondes électromagnétiques. On peut citer :

- Les mesures au **capteur électromagnétique**, basés sur l'application de la loi d'induction de Faraday selon laquelle un conducteur électrique traversant perpendiculairement un champ magnétique induit une tension. En débitmétrie, cette tension est proportionnelle à la vitesse de passage du liquide considéré et est indépendante des caractéristiques du liquide à mesurer telles que densité, viscosité, conductivité électrique, mais non des caractéristiques de sa charge particulaire.
- Les capteurs à **ultrason Doppler**, fixés sur un côté de l'écoulement, émettent un signal ultrasonique dans le flux du liquide. Lorsque ce signal est réfléchi par les particules solides ou les bulles d'air, sa fréquence se modifie proportionnellement à la vitesse du fluide. On peut signaler ici l'existence d'un « profileur » de courant à effet Doppler, l'ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) qui permet de mesurer des profils verticaux de la vitesse de l'eau, en utilisant l'énergie acoustique.
- Les mesures au **capteur à ultrason de transfert**, basés sur la vitesse de transfert en fonction du courant.

Ce domaine de la débitmétrie est caractérisé par la diversité des facteurs à prendre en compte et par les multiples principes de mesures susceptibles d'être mis en œuvre. Le choix d'un appareil suppose que, préalablement toutes les conditions d'utilisation soient identifiées avec rigueur.

3.1.4. La détermination du débit à l'aide d'ouvrages calibrés

La construction d'un déversoir ou d'un canal calibré (Fig. 3.6) pour la détermination des débits d'un cours d'eau a pour but l'obtention d'une relation entre le niveau de l'eau H et le débit Q aussi stable que possible, et en principe sans jaugeage sur le terrain. Le débit est alors obtenu par des formules hydrauliques et par étalonnage sur modèles. Les canaux jaugeurs et les déversoirs calibrés sont notamment utilisés dans le cas de petits cours d'eau aux lits étroits, instables, encombrés de blocs et à faible tirant d'eau, pour lesquels l'installation de stations à échelles limnimétriques et l'exécution de jaugeages au moulinet ne sont pas recommandés. Leur fonctionnement obéit aux lois de l'hydraulique classique.



Fig. 3.6 - Déversoir triangulaire en minc34 paroi et canal de Venturi.

3.1.5. Les jaugeages par dilution

Cette méthode de jaugeages par dilution s'applique à des torrents ou des rivières en forte pente où l'écoulement est turbulent ou pour lesquels on ne trouve pas de section se prêtant à des jaugeages au moulinet.

Le principe général consiste à injecter dans la rivière une solution concentrée d'un traceur (sel, colorant,...) et à rechercher dans quelle proportion cette solution a été diluée par la rivière, par prélèvements d'échantillons d'eau à l'aval du point d'injection (Fig. 7.16). Cette dilution est notamment fonction du débit, supposé constant le long du tronçon, concerné pendant la durée de la mesure. On a la relation suivante dans laquelle le rapport C_1 / C_2 représente la dilution :

$$Q = k \times \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (3.2)$$

Où :

Q : débit du cours d'eau [l/s] ;

C_1 : concentration de la solution injectée dans le cours d'eau [g/l] ;

C_2 : concentration de la solution restante dans des échantillons prélevés à l'aval du point d'injection dans le cours d'eau [g/l] ;

k : coefficient caractéristique du procédé et du matériel utilisé.

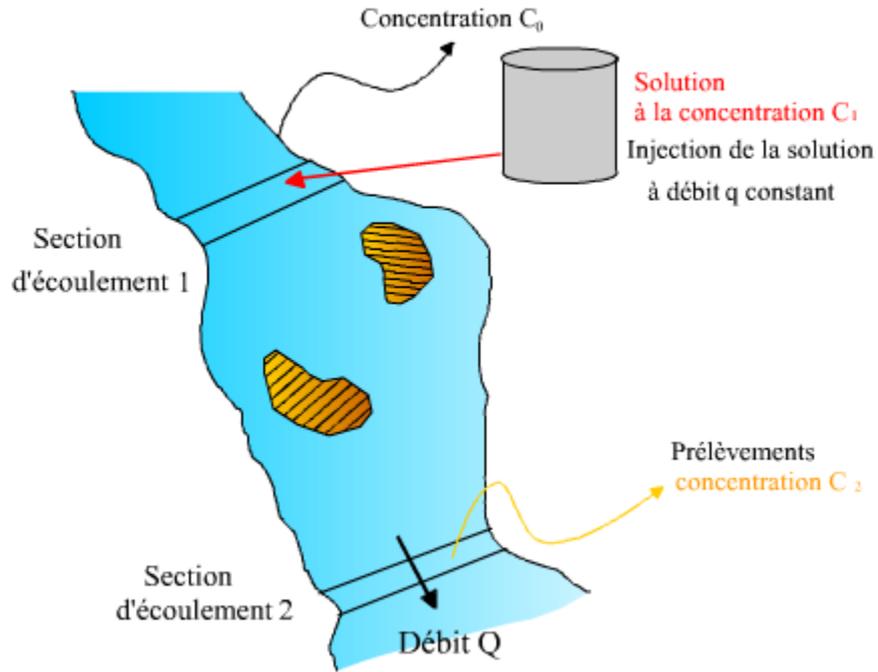


Fig. 3.7 - Principe du jaugeage par dilution; mode opératoire.

Les conditions suivantes sont nécessaires pour que les méthodes par intégration ou dilution puissent être appliquées :

- le débit de la rivière doit rester à peu près constant pendant la mesure ;
- le traceur doit passer dans sa totalité par l'emplacement de prélèvement des échantillons ;
- à la hauteur des prélèvements, le mélange doit être tel qu'en chaque point de la section du cours d'eau, doit passer la même quantité de traceur.

On utilise différents traceurs minéraux ou organiques, tels que la fluorescéine ou la rhodamine. Suivant le débit à évaluer, on n'utilisera pas le même traceurs.

1. Méthode de l'injection à débit constant

La méthode de l'injection à débit constant consiste à injecter dans le cours d'eau un débit constant connu q d'une solution de traceur, à la concentration C_1 (solution mère), pendant un temps déterminé. La durée de l'injection doit être telle que la concentration C_2 du traceur à la section de prélèvement reste constante pendant un certain laps de temps, appelé « palier ». A partir des hypothèses suivantes :

- le débit Q du cours d'eau est constant pendant la mesure (régime permanent),
- le débit q du traceur à la section de prélèvement est égal à celui de l'injection (pas de pertes), et négligeable devant Q ,
- le mélange est homogène à la section de prélèvement,

...alors, et dans l'hypothèse de la conservation de la masse de traceur, on a :

$$Q = q \times \left(\frac{C_1}{C_2} \right) \quad (3.4)$$

2. Méthode par intégration (injection instantanée)

Cette méthode consiste à injecter en un point du cours d'eau un volume V de traceur en solution concentrée C_1 . Au terme d'un parcours suffisamment long pour que le mélange avec l'eau de la rivière soit bon, des échantillons sont prélevés, et cela pendant toute la durée T de passage du nuage de traceur. Les prélèvements sont effectués en plusieurs points de la section d'échantillonnage de façon à fournir une valeur moyenne de la concentration C_2 qui évolue en fonction du temps et du point de prélèvement.

L'intégration au cours du temps des différentes valeurs de concentration $C_2(t)$ donne une valeur moyenne $\overline{C_2}$.



Fig. 3.8 - Jaugeage à débit constant.

Dans l'hypothèse de la conservation de la masse du traceur, on peut exprimer le débit comme suit :

$$Q = \frac{M}{\int_0^T C_2(t) dt} = \frac{V \times C_1}{T \times \overline{C_2}} \quad (3.5)$$

Avec :

Q : débit du cours d'eau [l/s ou m³/s] ;

M : masse de traceur injecté [g] ; $M = V \cdot C_1$;

V : volume de la solution lâchée dans le cours d'eau [l ou m³] ;

C_1 : concentration de la solution lâchée dans le cours d'eau [g/l] ;

$\overline{C_2}$: concentration moyenne du traceur dans les échantillons, obtenue par intégration [g/l] ;

$C_2(t)$: concentration de l'échantillon prélevé au temps t [g/l] ;

T : durée du prélèvement [s].

3.2. Introduction aux régimes hydrologiques

Les relevés des débits d'une rivière pendant une longue série d'années montrent des variations saisonnières systématiques (position des hautes et basses eaux) en fonction des principaux facteurs influençant l'écoulement : le régime des précipitations, la nature du bassin versant, sa situation géographique, l'infiltration, etc. Le régime hydrologique d'un cours d'eau résume l'ensemble de ses caractéristiques hydrologiques et son mode de variation. Il se définit par les variations de son débit habituellement représentées par le graphique de l'écoulement mensuel moyen (calculé sur un certain nombre d'années et aussi appelé débit "inter-mensuel" ou module mensuel). La figure 3.9 représente des valeurs de modules mensuels moyens de certain cours d'eau dans le monde.

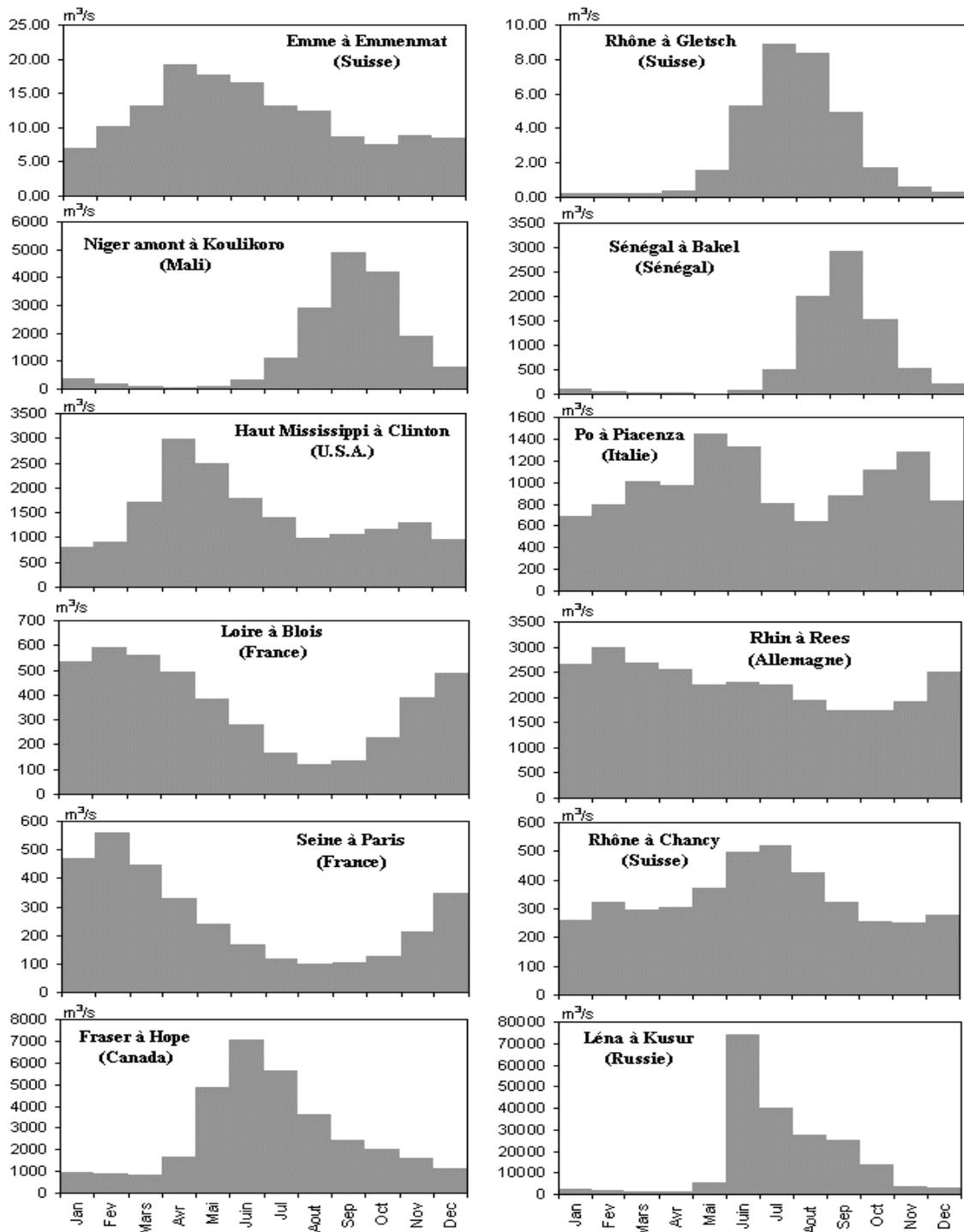


Fig. 3.9 – Régimes moyens (en m^3/s) de quelques fleuves dans le monde.

On utilise aussi le **coefficient mensuel de débits**, qui est défini comme le rapport du débit mensuel moyen au module inter-annuel (moyenne inter-annuelle calculée sur un certain nombre d'années). Celui-ci permet de représenter la répartition, en pourcentage, des débits mensuels au cours de l'année.

$$C_m (\%) = \frac{\text{Débit mensuel moyen}}{\text{Module Interannuel}} \cdot 100 \quad (3.5)$$

On définit également le coefficient d'écoulement annuel par le rapport suivant :

$$C_a (\%) = \frac{\text{Lame moyenne écoulée}}{\text{Pluie moyenne annuelle}} \cdot 100 \quad (3.6)$$

La courbe des coefficients mensuels de débits de l'année moyenne permet de mettre en évidence le caractère systématique des variations saisonnières, et de comparer les rivières entre elles. La connaissance de ce coefficient est aussi d'un grand intérêt pour pouvoir estimer les volumes écoulés au cours d'une saison afin de dimensionner une retenue.

De même, les courbes des fréquences relatives des débits sur une longue série d'années, définissent la variation saisonnière des quantiles de débits (Fig. 3.10). Les courbes cotées 10, 25,..., 90 % indiquent les valeurs des débits mensuels qui ont respectivement 10, 25,..., 90 chances sur 100 de ne pas être atteintes ou dépassées.

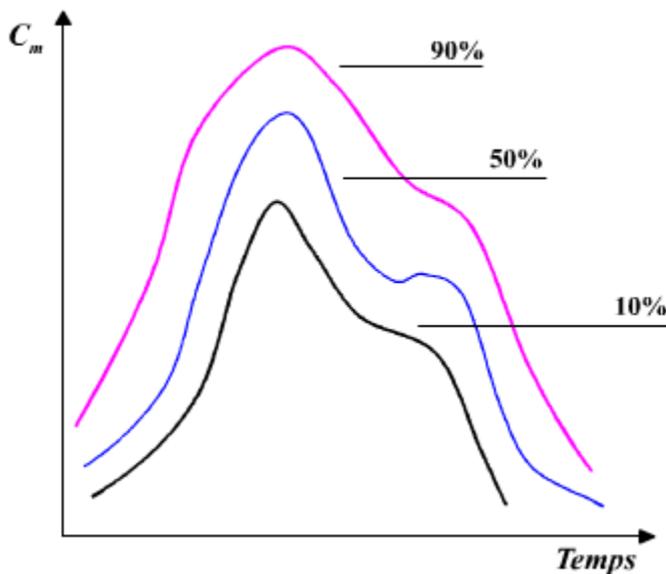


Fig. 3.10 - Exemple de courbes fréquentielles (fréquence de non-dépassement) des débits mensuels.

3.4 Classification des régimes hydrologiques

En conséquence, il est possible de caractériser un bassin versant et son écoulement en adoptant une classification du régime des cours d'eau basée d'une part sur l'allure de la fluctuation saisonnière systématique des débits qu'il présente, et d'autre part sur son mode d'alimentation, c'est-à-dire, la nature et l'origine des hautes eaux (pluviale,

nivale ou glaciaire). La répartition mensuelle des débits est alors utilisée pour classer le régime d'écoulement d'un cours d'eau appelé le **régime hydrologique**.

Une des classifications des régimes hydrologiques des rivières les plus simples est celle de Pardé (1933), qui distingue trois types de régimes :

- **Régime simple** : caractérisé par une seule alternance annuelle de hautes et de basses eaux (un maximum et un minimum mensuels au cours de l'année hydrologique) et, en général, par un seul mode d'alimentation
- **Régime mixte** : 2 maxima et 2 minima, par an, correspondant à plusieurs modes d'alimentation.
- **Régime complexe** : plusieurs extremas et modes d'alimentation.

Références bibliographiques

<https://echo2.epfl.ch/e-drologie/chapitres/chapitre7/main.html>