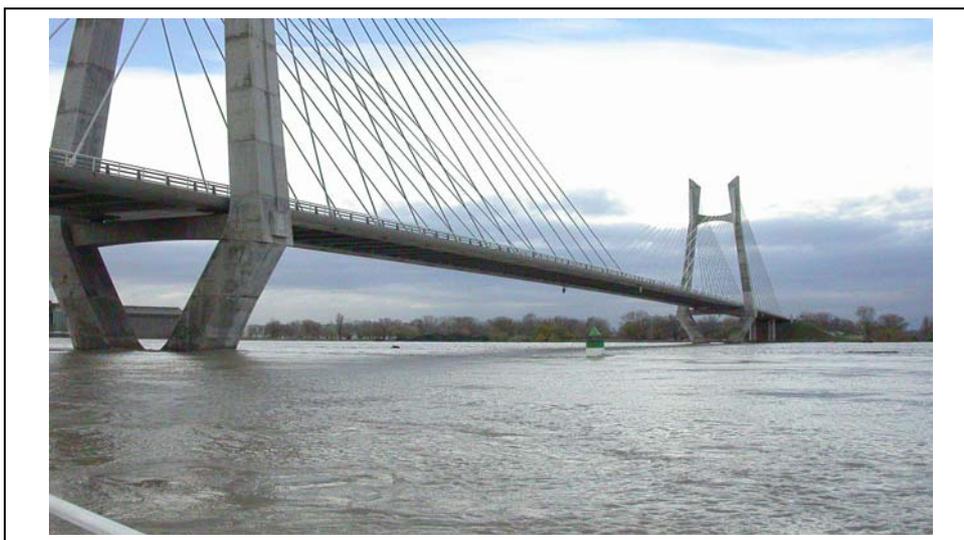


**Conférence de consensus sur le débit du Rhône à  
Beaucaire pour la crue de Décembre 2003**

**CONTRIBUTION CNR**



Pont de Beaucaire-Tarascon PK 269.60 – photo prise le 3 décembre 2003

**ANNEXE II**

**Détermination du débit avec un ADCP**



Compagnie Nationale du Rhône

DPFI-PF-Labo 05-615  
Date: 15 juin 2005

**COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE**  
Direction du Patrimoine Fluvial et Industriel  
Département Patrimoine Fluvial  
Laboratoire Hydraulique - Mesures  
4 rue de Chalon sur Saône  
69007 LYON

Tél. : 04.78.61.60.00 - Télécopie : 04.78.58.69.38

Siège Social : 2 rue Bonin - 69316 LYON CEDEX 04

# Conférence de consensus sur le débit du Rhône à Beaucaire pour la crue de Décembre 2003

## Contribution CNR

### Annexe II

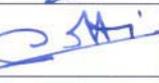
#### Détermination du débit avec un ADCP

#### Unité réalisatrice **COMPAGNIE NATIONALE DU RHONE**

Département Laboratoire d'Essais – Mesures - Contrôles  
4, Rue de Chalon sur Saône  
69007 LYON

**Rapport**                      Définitif

#### Contrôle qualité

|              | Nom          | Date         | Signature   |
|--------------|--------------|--------------|---|
| Réalisé par  | A. OLIVIER   | 15 juin 2005 |  |
| Vérifié par  | G. PIERREFEU | 15 juin 2005 |  |
| Approuvé par | M. SCOTTI    | 15 juin 2005 |  |

#### Historique du document

| Indice | Date         | Désignation de la révision |
|--------|--------------|----------------------------|
| 0      | 15 juin 2005 | Création du document       |

# Détermination du débit avec un ADCP<sup>1</sup>

L'ADCP fait partie des techniques de mesure de débit par exploration du champ de vitesse. Son fonctionnement est basé sur la propagation et la réflexion des ondes acoustiques sur les particules en suspension dans l'eau.



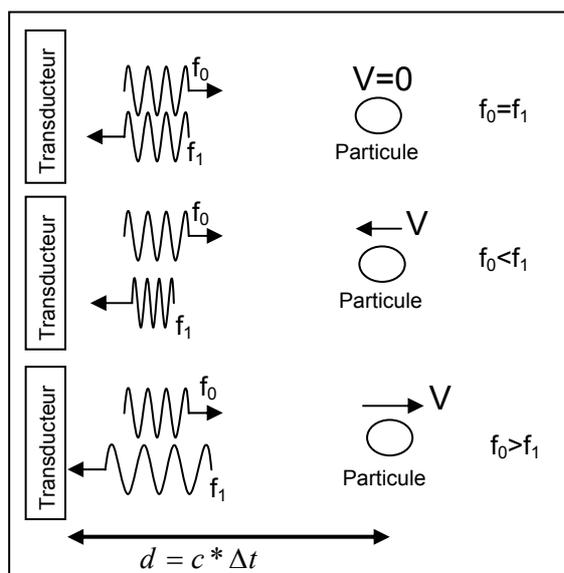
Figure 1 : L'ADCP Broadband 1200kHz de la CNR

Après un rappel sur l'effet Doppler, nous expliquerons brièvement ce qu'est un ADCP. Par la suite, nous présenterons le principe de la mesure de la vitesse de l'eau ainsi que l'utilisation de ceci pour la mesure du débit à travers la section d'une rivière.

## 1 L'effet Doppler

Ce paragraphe présente l'effet Doppler et son utilisation dans la mesure de la vitesse radiale relative entre deux corps.

Rappelons tout d'abord qu'une onde est caractérisée par sa fréquence  $f$  et par sa longueur d'onde  $\lambda$ . Ces grandeurs sont reliées par la vitesse du son  $c$  dans le milieu considéré, ici l'eau :



$$c = \text{fréquence} * \text{longueur d'onde} \quad (1)$$

$$= f * \lambda$$

Admettons qu'une onde sonore soit émise dans l'eau par un émetteur. Cette onde rencontre des particules en suspension dans l'eau qui réfléchissent en partie l'onde sonore vers l'émetteur qui les réceptionne. Lorsque les particules s'éloignent de l'émetteur, elles reçoivent le son avec une fréquence inférieure à celle émise. Au contraire, si elles se rapprochent de l'émetteur elles reçoivent le son avec une fréquence supérieure à celle émise. C'est l'effet Doppler (cf. fig. 2).

Figure 2 : L'effet Doppler

<sup>1</sup> Extrait du rapport de projet de fin d'études d'Audrey OLIVIER de l'Ecole Centrale de Lyon effectué à la CNR en 2004 « Maîtrise de la précision de mesure de débit avec un profileur de courant à effet Doppler (ADCP) »

Comme les particules réfléchissent l'onde sonore et que l'émetteur est également le récepteur, l'effet Doppler est appliqué deux fois. Par conséquent, le décalage Doppler  $\Delta f$  est défini comme suit :

$$\Delta f = 2F_0(V/c) \quad (2)$$

où  $F_0$  est la fréquence d'émission,  $V$  la vitesse des particules et  $c$  la vitesse du son dans l'eau. Ainsi, si les particules s'éloignent de l'émetteur alors elles reçoivent l'onde sonore avec une fréquence  $F_0 - \Delta f/2$ . Si elles se rapprochent de l'émetteur elles reçoivent l'onde sonore avec une fréquence  $F_0 + \Delta f/2$ .

Une mesure de la différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue permet donc de connaître la vitesse de la particule sur laquelle l'onde s'est réfléchi.

Remarque : une mesure du temps écoulé entre l'émission et la réception de l'onde sonore permet de connaître la distance entre la particule et le capteur. Les ondes acoustiques permettent donc de connaître la vitesse et la position d'une particule.

## 2 Que veut dire ADCP ?

Nous allons désormais regarder ce que veut dire ADCP. L'ADCP de la CNR est un appareil fabriqué par la société RD Instruments (RDI). Les initiales ADCP viennent de Acoustic Doppler Current Profiler. Ce nom à lui seul contient les bases du principe de détermination du profil des vitesses dans une colonne d'eau. Les ADCP de la CNR sont équipés de quatre capteurs acoustiques (appelés transducteurs). Chacun de ces transducteurs émet et reçoit un faisceau d'ondes acoustiques. Les quatre faisceaux sont orientés dans des directions opposées, deux à deux. Cette géométrie particulière est appelée « Configuration Janus » (cf. Fig. 3).

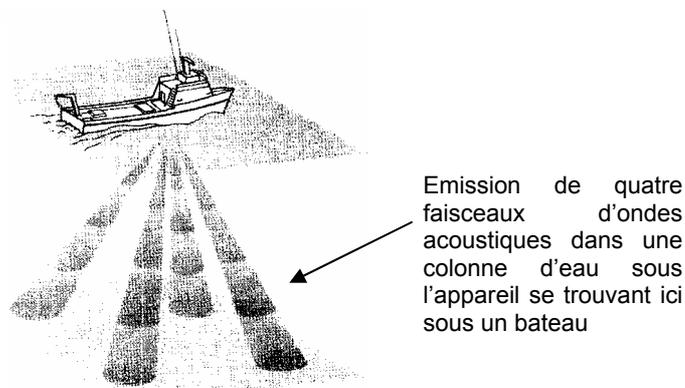


Figure 3 : Les faisceaux de l'ADCP sous le bateau qui le transporte

- **Acoustic** : l'ADCP utilise des ondes acoustiques pour détecter la vitesse de l'eau. Il existe 6 modèles différenciés par la fréquence de ces ondes. La CNR utilise quatre de ces modèles : deux à 600kHz (un à technologie Broadband et un Work Horse), un à 1200kHz (Broadband) et un à 2400kHz (Stream Pro). L'émetteur/récepteur s'appelle un transducteur.
- **Doppler** : l'ADCP utilise l'effet Doppler pour détecter le déplacement de l'eau. En effet, les particules en suspension dans l'eau se déplacent à la même vitesse que l'eau. Ainsi, mesurer la vitesse des particules revient à mesurer la vitesse de l'eau.
- **Current** : l'effet Doppler est un effet directionnel (faisceau orienté de 20° ou 30° par rapport à la verticale selon l'appareil). Ceci signifie que tout changement de fréquence sur un faisceau est associable à la composante de la vitesse suivant la direction de propagation de l'onde. La composante perpendiculaire à cette direction n'a aucune influence sur l'effet

Doppler. Ainsi un seul faisceau ne permet pas de déterminer le vecteur vitesse. Il faut trois faisceaux pour déterminer les trois composantes du vecteur vitesse. Il est à noter que les ADCP utilisés par la CNR émettent un quatrième faisceau qui, en donnant une deuxième valeur de la composante verticale de la vitesse, permet une validation (ou un rejet) de la mesure effectuée.

- Profiler: le découpage temporel de l'onde reçue par l'ADCP permet d'obtenir un profil vertical de vitesse.

### 3 Mesure de la vitesse de l'eau

#### 3.1 Principe de la mesure de la vitesse de l'eau par rapport à l'ADCP

Nous allons désormais préciser le fonctionnement de l'ADCP vis-à-vis des mesures de vitesse.

L'ADCP utilise l'écho des particules en suspension pour mesurer la vitesse du courant. Il émet des ondes. Celles-ci se réfléchissent sur les particules en suspension qui se déplacent à la même vitesse que l'eau. De l'écart de fréquence  $\Delta f$  entre l'onde émise et l'écho on peut déduire la vitesse des particules et donc de l'eau (effet Doppler). En réalité, au cours de la mesure, les particules ne se déplacent pas forcément dans le même axe que celui du transducteur. L'équation (2) devient :

$$\Delta f = 2F_0(V/c) * \cos(A) \quad (3)$$

où A est l'angle entre le vecteur vitesse et l'axe du transducteur (cf. Fig. 4).

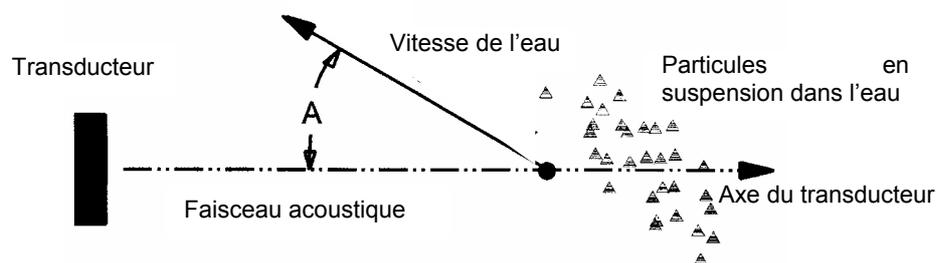
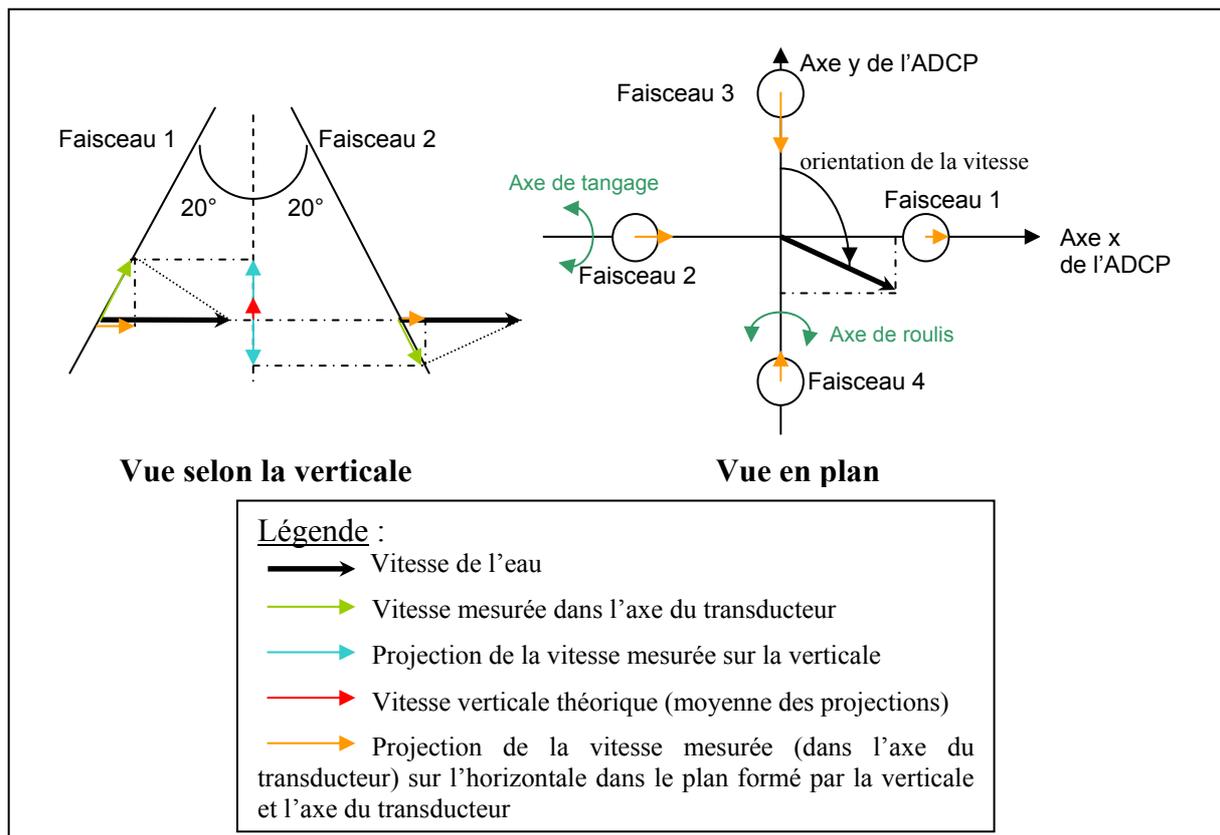


Figure 4 : Exemple d'orientation du vecteur vitesse par rapport à l'axe du transducteur

Ainsi, pour un faisceau, la mesure de la vitesse se fait selon un axe, celui du transducteur. Pour en déduire la vitesse et la direction de l'écoulement suivant trois axes, deux axes horizontaux et un axe vertical, l'ADCP a besoin d'effectuer plusieurs mesures simultanément. Les ADCP utilisés par la CNR émettent et reçoivent sur quatre axes simultanément. Des règles de trigonométrie simples permettent d'en déduire les composantes horizontales et verticales de la vitesse (cf. Fig. 5). la composante de la vitesse de l'eau selon un axe est la moyenne des composantes calculées sur les deux faisceaux associés.

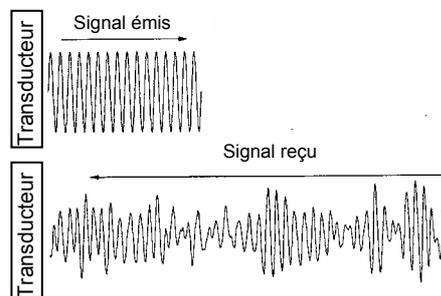
Il est à noter que trois faisceaux sont suffisants pour mesurer les trois composantes de la vitesse. Dans notre cas, la présence d'un quatrième faisceau permet de faire deux mesures indépendantes de la composante verticale de la vitesse. La comparaison de ces deux mesures permet d'établir un facteur de qualité, l' « error velocity », qui valide ou rejette la mesure selon le résultat de la comparaison.

Afin de déterminer les vitesses horizontales et verticales, l'ADCP a besoin de connaître précisément à tout moment son inclinaison : il est muni d'un capteur d'inclinaison qui permet de faire des corrections.



**Figure 5 : Mesure des composantes de la vitesse à partir de deux faisceaux**

Nous avons présenté le principe de la mesure dans le cas où une seule fréquence est reçue par le transducteur. En réalité, un faisceau rencontre un très grand nombre de particules en suspension, qui ne vont pas toutes à la même vitesse et qui ne sont pas toutes à la même profondeur. Deux particules à une vitesse différente réfléchissent à une fréquence différente (cf. équation 3). Deux particules ayant la même vitesse mais étant à des profondeurs différentes réfléchissent un signal de même fréquence mais d'amplitude différente (perte d'énergie de l'onde au cours de son parcours à cause des réflexions multiples). D'autre part pour chaque réflexion, il y a des transmissions. Il existe donc du bruit. Par conséquent, le signal reçu par le transducteur est très complexe : son amplitude et son déphasage varient au cours du temps (cf. Fig. 6).



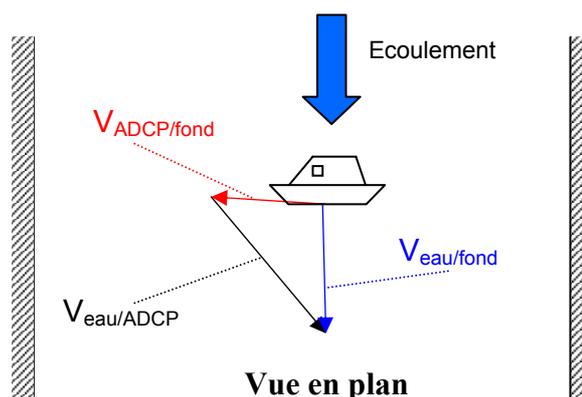
**Figure 6 : Signal reçu en présence de plusieurs particules**

L'ADCP analyse chaque signal par la méthode d'auto-covariance. En réalité, l'ADCP émet une suite de trains d'onde qui constituent un code. La méthode d'auto-covariance compare le signal reçu au code émis pour déterminer les différences d'amplitude (liées à la profondeur) et les différences de fréquence (liées à la vitesse).

De plus, il y a un découpage temporel du signal reçu : connaissant la vitesse du son dans l'eau, cela revient à découper la colonne d'eau de mesure en cellules dont le centre se trouve à des profondeurs différentes ( $profondeur = vitesse \cdot temps$ ) (cf. Fig. 3 sur laquelle on peut visualiser des cellules sur chaque faisceau). L'analyse de la fréquence pour chaque zone temporelle du signal permet de calculer une vitesse moyenne sur cette zone. On obtient alors un profil vertical de vitesse. L'ADCP, relié à une embarcation, se déplace le long de la section de la rivière (cf. Fig 8). On connaît alors le profil de vitesse sur plusieurs verticales de la section.

### 3.2 Composition des vitesses

Le fonctionnement de l'ADCP est basé sur une hypothèse forte : le fond du cours d'eau est immobile. Cette hypothèse lui permet d'obtenir la vitesse de l'eau par rapport à un point fixe, le fond. En effet, d'une part l'ADCP mesure la vitesse de l'eau comme on l'a vu ci-dessus. Par conséquent la vitesse que l'on obtient est une vitesse par rapport à l'ADCP, soit la vitesse de l'eau par rapport à l'ADCP.



F  
Figure 7 : Composition des vitesses

D'autre part, de la même façon qu'il mesure la vitesse des particules, l'ADCP mesure la vitesse du fond par rapport à lui-même. En prenant l'opposé, on obtient la vitesse de l'ADCP par rapport au fond. Une simple composition vectorielle des vitesses nous permet d'obtenir la vitesse de l'eau par rapport au fond (cf. fig. 7).

## 4 Mesure du débit

### 4.1 Principe de la mesure du débit à travers la section d'une rivière

Comme on l'a vu dans le chapitre précédent, l'ADCP mesure la vitesse de l'eau à plusieurs profondeurs sur plusieurs verticales le long de la section. Ceci va permettre de déterminer le débit. Le débit est le volume total d'eau qui traverse une section par unité de temps. En effet, soit L la position le long d'un parcours arbitraire qui traverse le fleuve. Le débit Q est défini par:

$$Q = \int_{longueur} \int_{hauteur} \overline{n(L) \cdot V(z, L)} dz dL \quad (4)$$

avec n : vecteur unitaire horizontal normal au parcours, en L ;

V : vecteur vitesse ;

z : profondeur du point de mesure.

L'ADCP discrétise le profil des vitesses. Par conséquent, les intégrales de l'équation 4 sont remplacées par des sommations et les termes dz et dL deviennent Dz et DL :

- Dz correspond au découpage de la colonne d'eau en éléments verticaux, les cellules (cf. Fig 3). Dz est compris entre 0.2 et 1m pour les jaugeages usuels de la CNR.

- DL dépend de la vitesse du bateau et correspond à la distance parcourue pendant la durée nécessaire pour établir les mesures sur une verticale. Cette distance est obtenue par intégration de la vitesse du bateau (qui est celle de l'ADCP) pendant la durée de calcul d'une verticale. Pour les jaugeages habituels de la CNR, DL est compris entre 1 et 5m.

Le débit total est donc la somme des débits mesurés pour chaque cellule. Une verticale composée de plusieurs cellules est un ensemble (cf. Fig. 8).

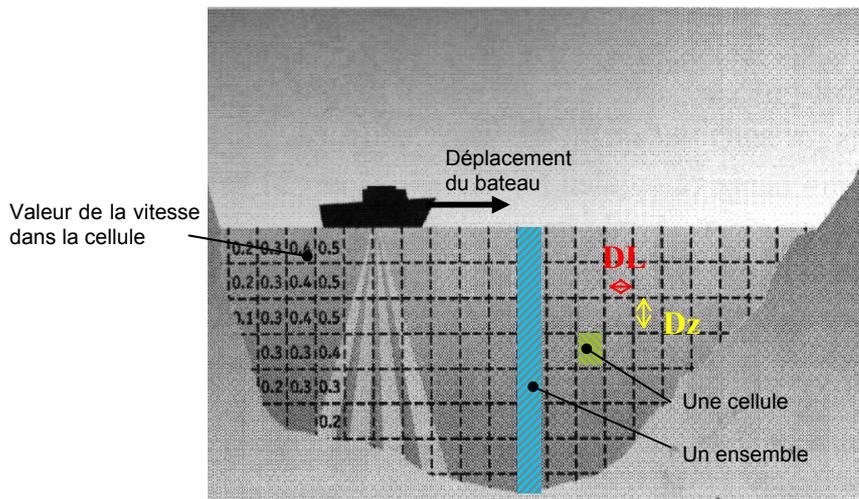


Figure 8 : Calcul du débit dans chaque cellule au cours de l'avancement de l'embarcation

Il existe des parties non mesurées dans la section de la rivière (cf. fig. 9) :

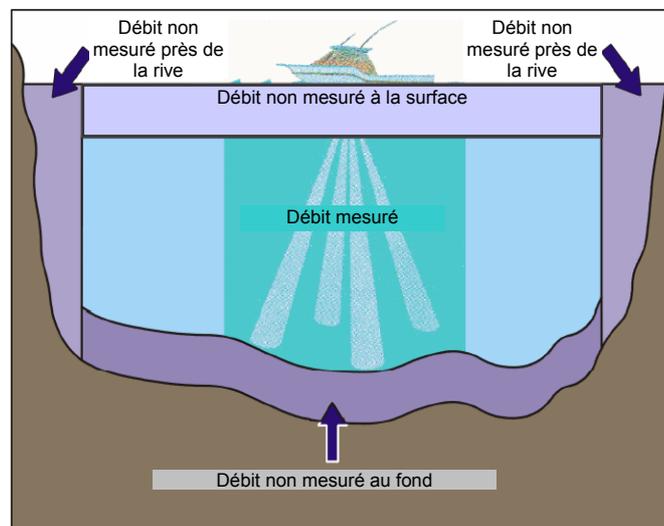


Figure 9 : Zones de la section sans mesure de débit

- L'ADCP ne mesure pas la partie haute de la colonne d'eau pour les raisons suivantes : les transducteurs de l'ADCP doivent être immergés pour fonctionner et il y a une distance minimale à respecter entre le transducteur et le premier point de mesure, en partie pour distinguer le signal émis de la première réflexion (distance environ égale au blanc laissé sous l'ADCP à laquelle on ajoute une hauteur de cellule).
- L'ADCP ne mesure pas la couche basse de la colonne d'eau, près du fond, à cause de problèmes de réflexion acoustique (lobes secondaires). Cette couche non mesurée représente la somme : 6% de la distance transducteur/fond + hauteur d'une cellule  $D_z$ .

- Les bords près des rives ne sont pas mesurés par manque de profondeur. En effet, il faut une profondeur minimale pour que l'ADCP fonctionne. Cette profondeur minimale est de 1.4m pour les ADCP à 600kHz, 0.8m pour l'ADCP Broadband 1200kHz et une dizaine de centimètres pour le StreamPro (2MHz).

Dans les zones non mesurées, les vitesses sont extrapolées par le logiciel d'exploitation associé à l'ADCP (logiciel WinRiver), à partir des mesures dans la zone mesurée.

Ainsi, au cours d'une traversée du cours d'eau, l'ADCP détermine pas à pas la section projetée perpendiculairement à l'écoulement local. Le débit est déterminé pas à pas à partir des mesures de vitesse de l'eau et du bateau.

## 4.2 Calcul du débit en mode autonome

Le mode autonome est le mode de base de l'ADCP, lorsqu'il est couplé à aucun appareil extérieur. En mode autonome, l'ADCP reste dans son propre repère pour calculer le débit à partir des vitesses mesurées. Comme nous l'avons vu ci-dessus, il y a cinq zones dans lesquelles l'ADCP détermine le débit.

### 4.2.1 Calcul du débit dans la zone mesurée

Dans la zone mesurée, le débit est déterminé directement à partir des mesures de vitesses. Dans une cellule indiquée  $i$ , il se calcule de la façon suivante (cf. Fig 10 pour préciser les notations) :

$$\begin{aligned} Q_{mesuré,i} &= \overrightarrow{V_{eau/fond,i}} \cdot \vec{n} * S_i \\ &= V_{eau/fond,i} * D_a * V_b * \Delta t * \sin(\alpha_i - \beta) \end{aligned} \quad (5)$$

Par conséquent, dans un ensemble, le débit mesuré est égal à :

$$\begin{aligned} Q_{mesuré\_ensemble} &= \sum Q_{mesuré,i} \\ &= \Delta t D_a V_b \sum_{i=1}^N V_i * \sin(\alpha_i - \beta) \end{aligned} \quad (6)$$

où :

- $N$  est le nombre de cellules de l'ensemble considéré ;
- $\Delta t$  est le temps entre l'ensemble considéré et le dernier ensemble validé ;
- $D_a$  est la hauteur d'une cellule ( $D_z$  dans l'équation 4) ;
- $V_i$  est la vitesse de l'eau par rapport au fond dans la cellule  $i$  ;
- $\alpha_i$  est la direction de l'écoulement dans la cellule  $i$  par rapport au fond ;
- $V_b$  est la vitesse du bateau, et donc de l'ADCP, par rapport au fond pour l'ensemble considéré ;
- $\beta$  est la direction de la vitesse du bateau par rapport au fond.

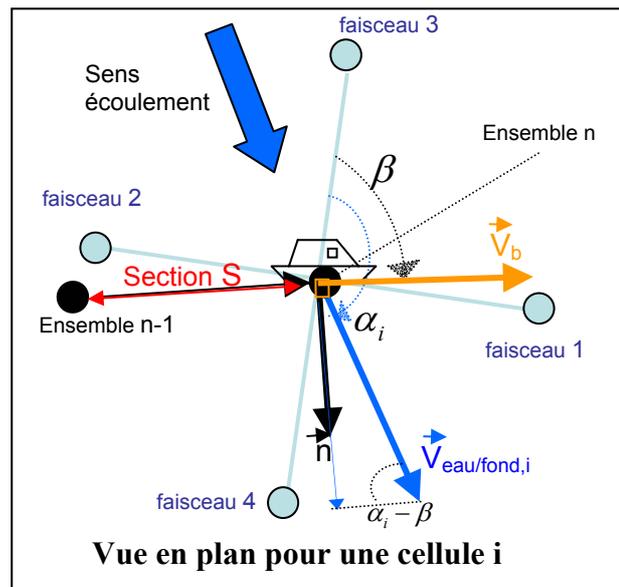


Figure 10 : Calcul du débit en mode autonome

Pour obtenir le débit dans l'ensemble de la zone mesurée, il faut sommer les débits calculés dans chaque cellule :

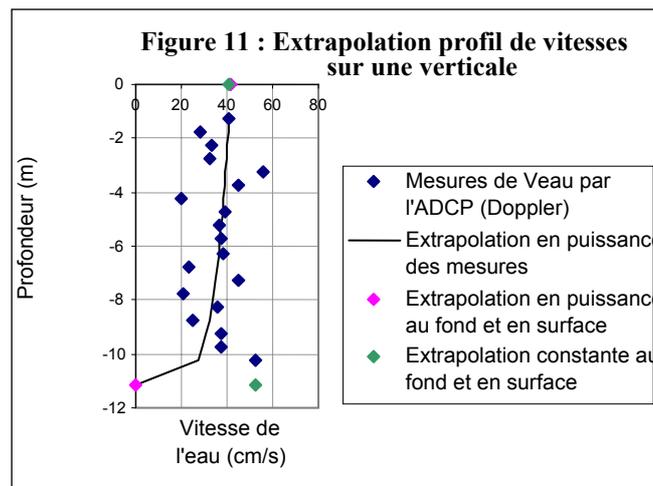
$$Q_{mesuré} = \sum_{i=1}^{nombre\_total\ de\ cellules} Q_{mesuré,i} \quad (7)$$

Le nombre total de cellules dépend de la profondeur et peut être obtenu à partir de WinRiver. Cette méthode de calcul est confirmée par le fait que lorsque l'on reproduit ce calcul à la main avec les données brutes, on retrouve le résultat indiqué par le logiciel WinRiver.

#### 4.2.2 Calcul du débit dans la zone de surface

Pour l'extrapolation en surface, l'ADCP dispose de deux méthodes :

- L'extrapolation du profil de vitesse de l'ensemble en loi puissance : le logiciel lisse suivant une loi en puissance les valeurs de vitesse du profil considéré (trait plein noir sur la figure 4.9), puis il affecte à la zone non mesurée une valeur de vitesse qui prolonge ce lissage (symbole  $\blacklozenge$  sur la figure 11) ;
- L'extrapolation du profil de vitesse de l'ensemble avec la méthode appelée constante : le logiciel applique la vitesse mesurée dans la plus proche cellule de la zone non mesurée à cette dernière (symbole  $\blacklozenge$  sur la figure 11).



La CNR utilise toujours la méthode « constante » pour l'extrapolation en surface : elle consiste donc à appliquer à la zone non mesurée en surface la valeur de vitesse mesurée dans la première cellule sous la surface. Ceci revient à utiliser la formule suivante pour un ensemble :

$$Q_{SURFACE\_UN\_ENSEMBLE} = [V_{eau/fond} \cdot V_b \sin(\alpha - \beta)]_{cellule\_surface} * \Delta t * (D_{TOP} - \frac{D_a}{2}) \quad (8)$$

où :

- $V_{eau/fond}$  est la vitesse de l'eau par rapport au fond dans la première cellule sous la surface ;
- $V_b$  est la vitesse du bateau, et donc de l'ADCP, par rapport au fond pour cet ensemble ;
- $\alpha$  est la direction de l'écoulement (soit de  $V_{eau/fond}$ ) dans la première cellule sous la surface ;
- $\beta$  est la direction de la vitesse du bateau pour cet ensemble ;
- $\Delta t$  est le temps entre l'ensemble considéré et le dernier ensemble validé ;
- $D_{TOP}$  est la profondeur du centre de la première cellule sous la surface ;
- $D_a$  est la hauteur d'une cellule.

L'expression de  $D_{TOP}$  dépend du mode utilisé pour déterminer la vitesse de l'eau par rapport à l'ADCP. Ce mode est choisi selon les conditions de jaugeage :

- Mode 1 : il correspond aux environnements difficiles (turbulences, courants de cisaillement, obligation d'avoir une vitesse de bateau élevée par rapport à l'eau) et convient pour les cours d'eau profonds. C'est le mode le plus utilisé par la CNR car c'est le plus robuste, notamment en période de crue. Il permet de mesurer des vitesses dans une plage de  $\pm 10\text{m/s}$ . Les caractéristiques standards de l'ADCP correspondent à ce mode.
- Mode 5 : il est utilisé dans les cours d'eau peu profonds. Il est efficace lorsque le courant est faible (moins de  $1\text{m/s}$ ) mais il ne convient pas en écoulement turbulent. En revanche il est très précis.
- Mode 8 : il est plus souple que le précédent. Il permet des mesures jusqu'à  $2\text{m/s}$  avec également des couches de faible épaisseur. Il convient donc à des mesures en eau peu profonde avec écoulement turbulent.

L'expression de  $D_{TOP}$  est alors :

- Mode 1 :  $D_{TOP} = D_{ADCP} + D_b + (D_p + D_0 + D_a) / 2$
- Modes 5 et 8 :  $D_{TOP} = D_{ADCP} + D_b + (D_p + D_a) / 2$

où :

- $D_{ADCP}$  est l'enfoncement de l'ADCP (10 à 40cm pour la CNR) ;
- $D_b$  est le blanc sous l'ADCP (15 à 40cm pour la CNR) ;
- $D_a$  est la hauteur d'une cellule (0.2 à 1m pour la CNR) ;
- $D_p$  est la longueur totale d'un code de trains d'ondes (environ la hauteur d'une cellule) ;
- $D_0$  est le retard entre les trains d'ondes émis (quelques centimètres).

Posons  $\kappa=1$  en mode 1 et  $\kappa=0$  en mode 5 et 8. Dans ce cas :

$$D_{TOP} = D_{ADCP} + D_b + (D_p + \kappa D_0 + D_a) / 2^{(2)} \quad (9)$$

Alors :

$$Q_{SURFACE\_UN\_ENSEMBLE} = [V_{eau / fond} \cdot V_b \sin(\alpha - \beta)]_{cellule\_surface} * \Delta t * (D_{ADCP} + D_b + \frac{D_p + \kappa D_0}{2}) \quad (10)$$

Il faut sommer sur tous les ensembles pour avoir le débit dans toute la zone non mesurée en surface.

Cette méthode de calcul est confirmée par le fait que lorsque l'on reproduit ce calcul à la main avec les données brutes, on retrouve le résultat indiqué par le logiciel WinRiver.

<sup>2</sup> Si l'on veut obtenir rapidement une approximation de la hauteur de la zone non mesurée en surface, on peut faire le calcul suivant :  $D_{TOP} = D_{ADCP} + D_b + D_a$  puisque  $D_p \sim D_a$  et  $D_0$  est faible devant les autres paramètres.

#### 4.2.3 Calcul du débit dans la zone de fond

Pour l'extrapolation au fond, l'ADCP dispose de deux méthodes (cf. §4.2.2). La CNR utilise toujours la méthode « puissance » qui consiste à appliquer à la zone non mesurée au fond la vitesse qui prolonge le lissage, selon une loi en puissance, des valeurs de vitesse dans la zone mesurée. Ceci revient à utiliser la formule suivante pour un ensemble :

$$Q_{FOND\_UN\_ENSEMBLE} = \frac{V_b \Delta t D_a Z_1^{b+1} \sum_{i=1}^{\text{nbre cellules dans l'ensemble}} V_i \sin(\alpha_i - \beta)}{Z_2^{b+1} - Z_1^{b+1}} \quad (11)$$

où :

- $\Delta t$  est le temps entre l'ensemble considéré et le dernier ensemble validé ;
- $D_a$  est la hauteur d'une cellule ;
- $Z_1$  est la hauteur de la zone non mesurée au fond (cf. Fig.12) ;
- $b$  est un coefficient égal à 1/6 ;
- $V_i$  est la vitesse de l'eau par rapport au fond dans la cellule  $i$  de l'ensemble considéré ;
- $V_b$  est la vitesse du bateau, et donc de l'ADCP, par rapport au fond pour cet ensemble ;
- $\alpha_i$  est la direction de l'écoulement (soit de  $V_i$ ) dans la cellule  $i$  de l'ensemble considéré ;
- $\beta$  est la direction de la vitesse du bateau pour cet ensemble ;
- $Z_2$  est la hauteur de la zone comprenant la zone mesurée et la zone non mesurée au fond (cf. Fig.12).

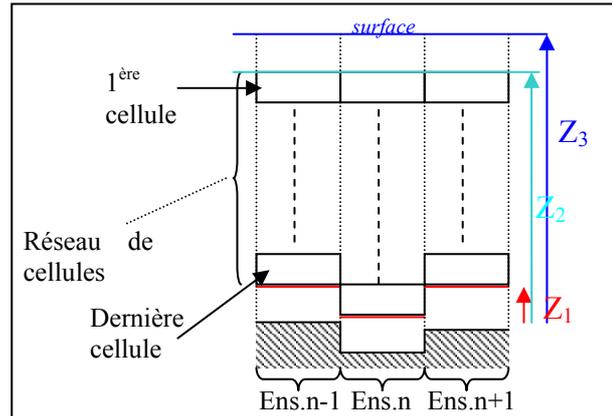


Figure 12 : Dimensions des zones de mesure ou d'extrapolation du débit

Il faut sommer sur tous les ensembles pour avoir le débit dans toute la zone non mesurée au fond. Notons que les grandeurs  $Z_1$  et  $Z_2$  varient d'un ensemble à l'autre (cf. figure 12). Cette méthode de calcul est confirmée par le fait que lorsque l'on reproduit ce calcul à la main avec les données brutes, on retrouve le résultat indiqué par le logiciel WinRiver.

#### 4.2.4 Calcul du débit près des rives

La méthode d'extrapolation utilisée conduit à la formule suivante :

$$Q_{RIVE} = C V_m L d_m \quad (12)$$

où :

- $C$  est le coefficient de forme de la zone non mesurée au bord de la rive (0.35 si la rive est triangulaire, 0.91 si la rive est rectangulaire) ;
- $V_m$  est la vitesse moyenne de l'eau dans l'ensemble le plus proche de la rive ;
- $L$  est la laisse au bord de la rive ;
- $d_m$  est la profondeur de l'ensemble le plus proche de la rive.

Cette méthode de calcul est confirmée par le fait que lorsque l'on reproduit ce calcul à la main avec les données brutes, on retrouve le résultat indiqué par le logiciel WinRiver.

#### 4.2.5 Cas d'une cellule invalidée

Il arrive que certaines mesures soient invalidées, selon le résultat du critère « error velocity » (cf. §.3.1). Dans ce cas, la cellule invalidée est marquée comme « bad ». Une extrapolation du

débit dans cette cellule est alors faite à partir des valeurs dans la cellule de même profondeur de l'ensemble suivant. Dans ce cas, le logiciel WinRiver affiche :

- Un débit nul pour la cellule invalidée (cellule i) ;
- Un débit prenant en compte le temps  $\Delta t$  entre l'ensemble de la cellule i+1 et le dernier ensemble pour lequel la cellule de même profondeur a été validée.

Ce raisonnement est donc appliqué même si plusieurs cellules à la suite de même profondeur sont invalidées. Le temps  $\Delta t$  des équations 5 à 12 pour le calcul est alors le temps écoulé entre l'ensemble considéré et l'ensemble de la dernière cellule validée à la même profondeur.

Certains ensembles sont totalement invalidés, si le fond n'a pas été correctement détecté par exemple. Dans ce cas, les débits de toutes les cellules et des zones non mesurées sont estimés de la même façon que ci-dessus.