HAL
open science

Mesure des débits à l'aide de débitmètres ultrasoniques Doppler. Cas des petits cours d'eau ruraux

François Birgand, Jean-Claude Benoist, Emilie Novince, Nicolas Gilliet, Patricia Saint-Cast, Eric Le Saos

To cite this version:

François Birgand, Jean-Claude Benoist, Emilie Novince, Nicolas Gilliet, Patricia Saint-Cast, et al.. Mesure des débits à l'aide de débitmètres ultrasoniques Doppler. Cas des petits cours d'eau ruraux. Ingénieries eau-agriculture-territoires, 2005, 41, p. 23 - p. 38. hal-00476108

HAL Id: hal-00476108

https://hal.science/hal-00476108v1

Submitted on 23 Apr 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Mesure des débits à l'aide de débitmètres ultrasoniques Doppler
Cas des petits cours d'eau ruraux

François Birgand[a], Jean-Claude Benoist[b], Émilie Novince[b], Nicolas Gilliet[c], Patricia Saint-Cast[b] et Éric Le Saos[b]

L'estimation des flux de polluants générés par l'activité agricole et la quantification des transferts impliquent au préalable la mesure des débits d'eau à l'exutoire des bassins versants. Dans cet article, les auteurs présentent le principe général et l'application de la méthode utilisant des débitmètres à effet Doppler continu, ainsi que les avantages qu'elle présente dans le cas des petits cours d'eau.

Les trop fortes émissions de nutriments dans les milieux récepteurs lacustres et côtiers sont à la source des problèmes écologiques fréquemment observés en France et dans le monde en général (Vitousek *et al.*, 1997). Réduire ces émissions est devenu un objectif prioritaire (*e.g.* directive nitrate en Europe, *Clean Water Act, section 319* aux États-Unis). Ces réductions s'adressent particulièrement à l'agriculture puisque 40 à 80 % des émissions d'azote dans le milieu récepteur côtier lui sont attribuées en Europe (Isermann, 1990). De multiples travaux de recherche et de suivi de la qualité de l'eau impliquent bien souvent la mesure des flux de nutriments. Ces flux sont calculés à partir de la mesure des débits et des concentrations.

Les débits dans les petits bassins versants agricoles (surface ≤ 3500 ha) ont souvent été estimés dans le passé, et le sont encore, par calcul à partir de la seule mesure de hauteur d'eau, soit en association avec un ouvrage (cas des déversoirs à paroi mince ou à seuil, canaux venturi, par exemple), soit directement dans le lit du cours d'eau, mesures dont les principes ont été brièvement rappelés par Benoist et Birgand (2002). Les débits sont obtenus par calcul à partir d'une courbe de tarage, connue théoriquement dans le premier cas et établie expérimentalement par jaugeage dans le second.

Les conditions d'application des techniques de mesure de débits à partir d'ouvrages ne sont pas toujours réunies. Par exemple, l'utilisation optimale des déversoirs à paroi mince nécessite un dénivelé suffisant pour assurer un déversement libre et pleinement aéré (NF X 10-311, 1983). De même, l'utilisation des courbes de tarage obtenues expérimentalement hors ouvrage repose sur l'hypothèse que la relation hauteur/débit est univoque et ne varie pas au cours du temps. En d'autres termes, on fait l'hypothèse que pour une hauteur d'eau donnée dans une section stable de mesure, la vitesse moyenne sur la section est unique. On néglige ainsi deux types d'événements :

1) l'évolution graduelle ou soudaine de la courbe de tarage faisant suite à l'évolution des caractéristiques physiques de la section où est pratiquée la mesure mais aussi en aval de celle-ci (dépôts de sédiments, emprise de la végétation, embâcle, érosion …) ;

2) l'hystérésis de la relation hauteur/débit entre la crue et la décrue (figure 1, *p. 24*).

L'avènement relativement récent des « débitmètres » basés sur l'effet Doppler permet de s'affranchir de certains problèmes liés aux courbes de tarage, puisque le débit n'est plus estimé par calcul à partir de la seule hauteur d'eau, mais à partir de la vitesse de l'eau et de la surface

Les contacts

[a] Cemagref, UR Hydrosystèmes et bioprocédés, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex

[b] Cemagref, UR Gestion environnementale et traitement biologique des déchets, 17 avenue de Cucillé, 35044 Rennes Cedex

[c] INRA, UMR Sol Agronomie Spatialisation de Rennes-Quimper, 65 route de Saint-Brieuc, 35042 Rennes Cedex

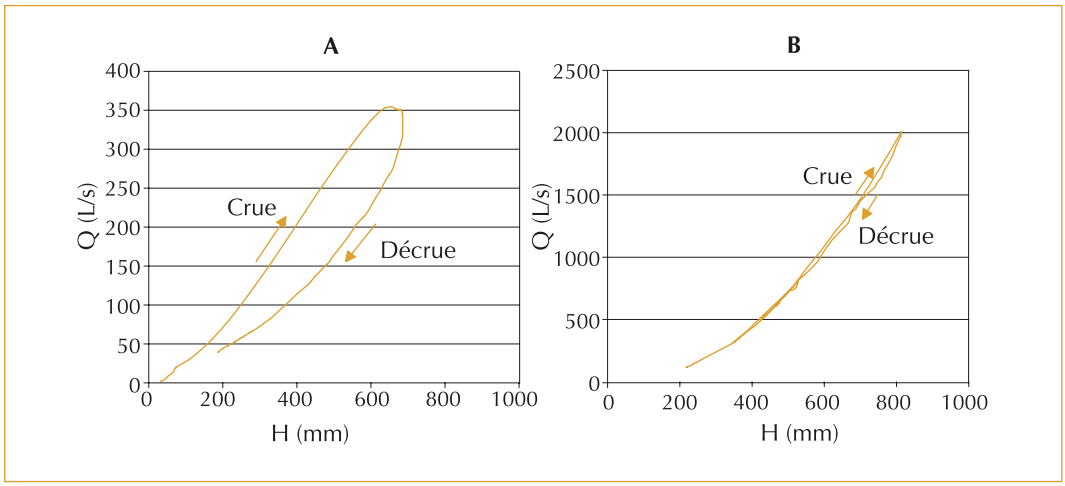


Figure 1 – Courbes hauteur-débit (A) non univoque pour un canal à très faible pente (0,02 %, Plymouth, Caroline du Nord, USA) et (B) quasi univoque pour un canal à pente plus élevée (1,5 %, Nozay, Loire-Atlantique). Données obtenues avec un débitmètre Doppler.

de la section mouillée, elle-même calculée à partir de la mesure de la hauteur d'eau. Cette technique peut aussi parfois s'appliquer là où celles associées aux ouvrages ne peuvent être utilisées avec satisfaction, comme nous le verrons par la suite.

Deux applications du principe de l'effet Doppler existent : le Doppler continu et le Doppler pulsé. Dans ce dernier cas, on explore la vitesse d'un petit volume d'eau situé à une distance connue de l'instrument. Pour ce faire, une impulsion ultrasonique est émise pendant un temps très court et le signal réfléchi est enregistré après une période définie et fixe qui correspond au temps qu'il faut à l'onde sonore pour parcourir deux fois la distance entre l'instrument et le volume d'eau dans lequel on cherche à mesurer la vitesse. Il semble que ces appareils aient des performances extrêmement intéressantes, mais cette technologie reste encore très onéreuse (environ 10 fois le prix d'un Doppler continu ; Vermeyen, 1999). Dans le cas du Doppler continu, on ne fait pas de discrimination spatiale *a priori* et toute la colonne d'eau devant le capteur est explorée. C'est le principe et l'application du Doppler continu qui sont présentés dans cet article car la plupart des appareils Doppler communément commercialisés utilisent cette méthode.

Nous allons en premier lieu rappeler le principe général et l'application de l'effet Doppler pour la mesure des vitesses de l'eau. Les performances de la méthode ont été testées sur des sections calibrées en bois dont un guide de construction est fourni en annexe. Suit une discussion sur les avantages d'un tel dispositif.

Principes du Doppler continu

Dans l'application (de la méthode à une section calibrée) qu'on se propose de présenter ici, le débit est estimé en un point donné, en multipliant la vitesse moyenne de l'eau en ce point par la surface de la section mouillée. La surface de la section mouillée est souvent dérivée de la mesure ponctuelle de hauteur d'eau et la vitesse moyenne de l'eau est estimée à partir de mesures de vitesse par effet Doppler.

Le principe de la mesure de la vitesse de l'eau par effet Doppler

Le principe de « l'effet Doppler » (identifié par Christian Doppler en 1842) utilisé pour la mesure des vitesses de l'eau est le suivant : lorsqu'une onde sonore est réfléchie sur une particule en mouvement, la fréquence de l'onde réfléchie est modifiée par rapport à la fréquence de l'onde incidente et cette modification est fonction de la vitesse de la particule en mouvement. Dans la pratique et pour les « débitmètres » fonctionnant sur ce principe, des ultrasons sont émis par une céramique piezoélectrique fixe immergée et réfléchie par les particules en suspension ou les bulles d'air transportées par l'écoulement. Utiliser l'effet Doppler pour mesurer la vitesse de l'eau implique l'hypothèse fondamentale que les particules ou les bulles d'air se déplacent avec la même vitesse que l'eau. Les capteurs sont toujours immergés et généralement placés face à l'écoulement, le plus souvent sur le radier. Le principe de mesure de la vitesse de l'eau dans un canal ouvert par effet Doppler continu est illustré sur la figure 2.

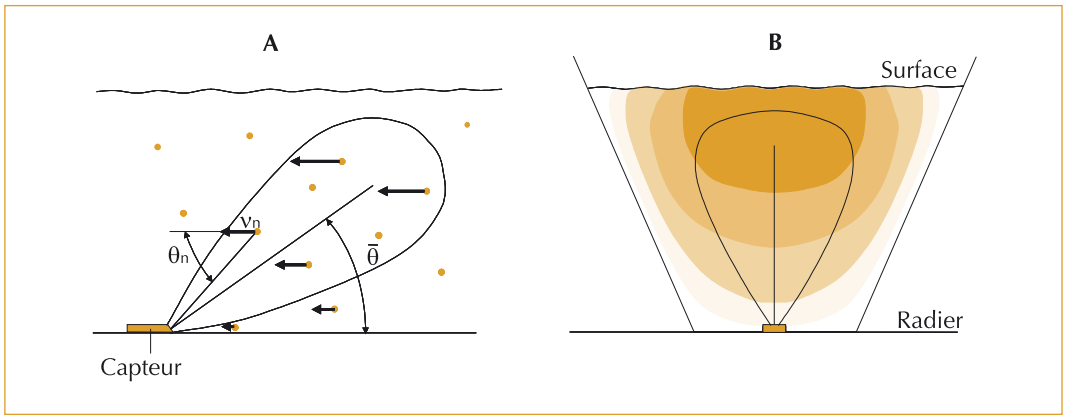


Figure 2 – Principe de mesure de la vitesse de l'eau dans un canal ouvert par effet Doppler.
A : vue de profil ;
B : vue dans le sens du courant.
Les vitesses des particules en suspension sont schématisées par des flèches de longueurs variables (A) et par des courbes isotaches (B ; adapté de NF X 10-311).

La vitesse V_n d'une particule peut être théoriquement déterminée par la relation :

Équation 1

$$V_n = \frac{f_{D,n} \cdot c}{2 f_s . \cos\theta_n}$$

où

$f_{D,n}$: décalage de fréquence produit par une particule qui sert de réflecteur,

f_s : fréquence des émissions d'ultrasons sans mouvement de l'eau,

c : célérité du son dans l'eau,

θ_n : angle entre la ligne de mouvement de la particule et la direction particule-capteur,

θ : angle entre le centre du faisceau et la ligne de mouvement de la particule. Cet angle est aussi appelé angle du faisceau et dépend des appareils.

L'application de l'effet Doppler pour mesurer les vitesses de l'eau dans les canaux découverts impose des contraintes et des limites. Optimiser l'utilisation du Doppler continu nécessite la connaissance des limites de cette technique. Nous allons nous attacher à présenter ces limites dans les parties suivantes.

Les limites inhérentes au Doppler continu

La largeur du faisceau d'onde ultrasonore

C'est la composante selon la direction (par rapport au radier, figure 3) de la vitesse v_n qui crée un décalage de fréquence de l'onde émettrice et c'est donc seulement cette projection ($v_{n/\theta}$) de la vitesse recherchée que l'appareil mesure directement.

Si le faisceau d'onde ultrasonore était « parfait », c'est-à-dire si les ondes n'étaient envoyées que dans une et une seule direction, et que les vitesses de la colonne d'eau étaient strictement identiques verticalement, les x particules placées dans le faisceau d'onde renverraient x fois le même signal correspondant au même décalage de fréquence (figure 3).

En réalité, l'onde ultrasonore n'est pas émise dans une direction unique mais plutôt dans un angle solide représenté sur les figures 2 et 4. Lorsqu'une particule traverse le faisceau de l'onde ultrasonore à la même vitesse (de A vers C sur la figure 4), la composante de la vitesse recherchée varie en fonction de l'angle et donc de ce que la particule se trouve au point A, B ou C (vitesses v_A, v_B, v_C, respectivement sur la figure 4). Le décalage de

1. L'écoulement uniforme dans un bief correspond à un écoulement pour lequel la profondeur et la vitesse restent constantes tout le long du bief. Dans ce cas, le vecteur vitesse est constant le long de toute ligne de courant (NF ISO-772. 2001).

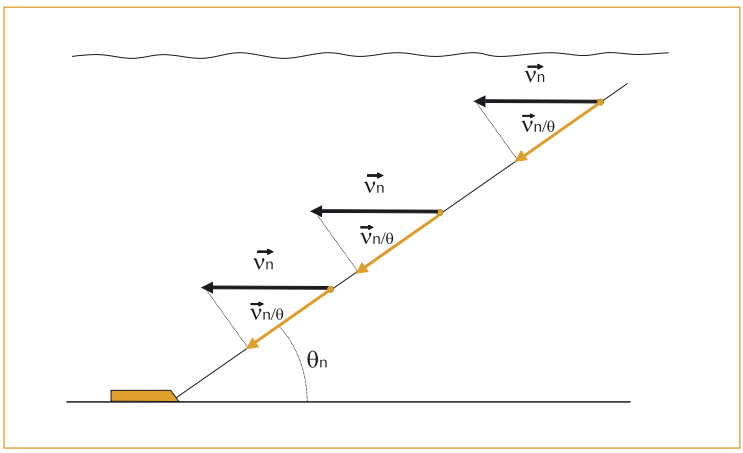
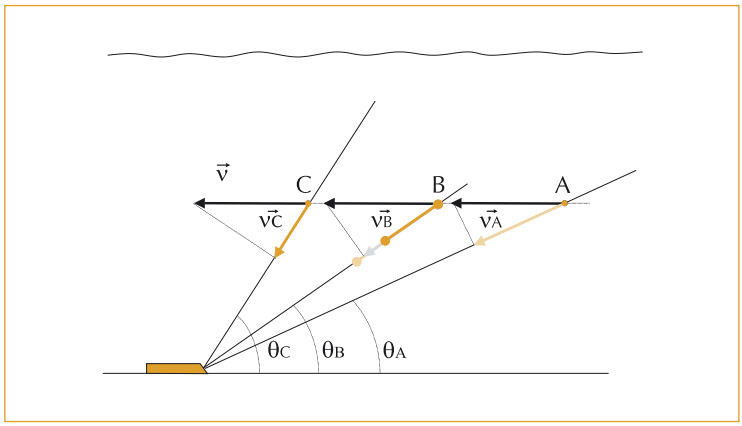


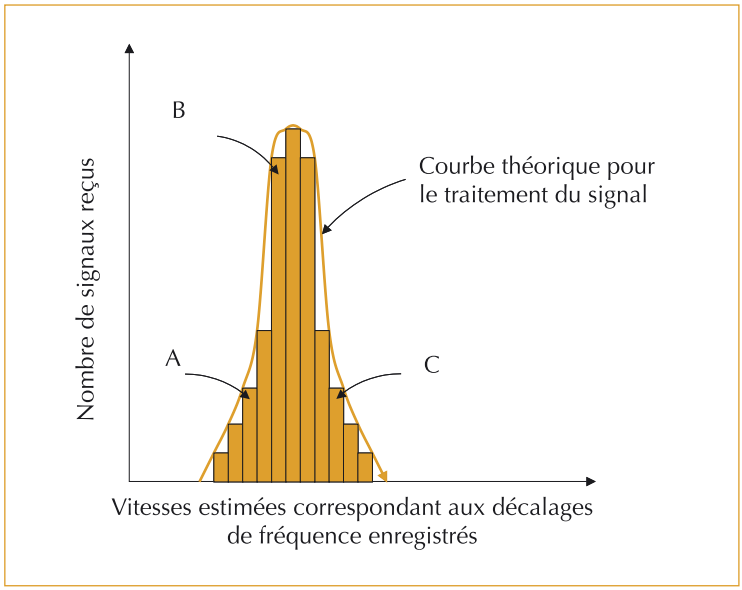
Figure 3 – Représentation schématique de la composante selon la direction du faisceau ultrasonore parfait qui émettrait dans une direction unique, qui crée le décalage de fréquence de l'onde incidente. Représentation pour un écoulement isotrope uniforme[1].



▲ Figure 4 – Représentation schématique de la diversité du signal reçu en fonction de la position pour trois particules A, B et C ayant la même vitesse.

fréquence détecté par l'instrument n'est donc pas le même selon que la particule se situe en A, B ou C. En revanche, pour le calcul de la vitesse, on utilise dans l'équation 1, la même valeur de l'angle du faisceau θ, caractéristique de l'appareil. Différentes valeurs de la même vitesse v seront donc estimées selon que la particule se trouve en A, B ou C (figure 4).

En faisant le même raisonnement à un instant donné, les x particules réparties régulièrement entre A et C, renvoient autant de signaux différents. Ainsi, en répartissant les vitesses en classes de valeurs, on obtient un histogramme de vitesse qui correspond à tous les signaux reçus pour une même vitesse uniforme dans toute la colonne d'eau (figure 5). À partir de l'émission d'une unique fréquence d'ultrasons, on obtient donc une multitude de décalages de fréquences en réponse. Néanmoins, les signaux reçus pour une vitesse homogène et égale dans la colonne d'eau sont répartis selon une loi statistique caractéristique de l'instrument qui peut être traitée de façon automatique (figure 5). Cette loi caractéristique est généralement définie par les constructeurs sur canal expérimental. Pour cela, la méthode la plus employée semble être celle précisée dans la norme ISO 3455:1976 et décrite par Vermeyen (1999). Sur un canal jaugé d'eau immobile, l'instrument est immergé et fixé sous la surface, le faisceau d'onde ultrasonore dirigé vers le bas, sur un chariot se déplaçant à vitesse constante et connue. Les valeurs de vitesses mesurées correspondent donc à la vitesse relative de l'instrument par rapport à l'eau. L'eau étant immobile dans le canal, la vitesse relative est homogène et identique dans l'enveloppe du faisceau de l'onde ultrasonore.



▲ Figure 5 – Spectre de répartition théorique statistique des signaux ultrasonores **pour une vitesse homogène et uniforme dans la colonne d'eau.** Les classes de vitesse auxquelles appartiendraient les vitesses calculées aux points A, B et C de la figure 4 sont montrées par les flèches.

Le traitement automatique du spectre de signaux reçus (figure 5) est quasiment toujours breveté ; il fait appel à des techniques d'analyse spectrale et de transformées de Fourier.

La plupart des instruments Doppler envoient donc une onde dans un volume d'eau correspondant à un angle solide plus ou moins large selon la philosophie des constructeurs. Pour une fréquence donnée des ultrasons, nous avons donc montré qu'il y avait une multitude de décalages de fréquence dus à l'effet Doppler, du seul fait que l'onde se réfléchisse sur les particules placées dans l'angle solide formé par le faisceau d'onde. La forme du spectre de réponse de l'onde réfléchie peut toutefois être mesurée par expérimentation au laboratoire et la vitesse recherchée peut être extraite automatiquement à partir de l'histogramme de réponse en utilisant des techniques de traitement du signal. Néanmoins, pour pouvoir être mesuré, le décalage de fréquence doit être différent de zéro. Ceci implique que la vitesse de l'eau doive être différente de zéro et, plus précisément, qu'elle doive être minimale pour que l'histogramme de réponse soit clairement éloigné du zéro pour que le traitement du signal soit juste. Tous les appareils Doppler continus ont donc une gamme de vitesses proches de zéro pour lesquelles les vitesses ne sont pas fiables ou, souvent filtrées et non mesurées (Edelhauser, 1999).

Nous allons désormais voir que d'autres facteurs influent sur le spectre de réponses qui peuvent varier selon les conditions dans lesquelles les instruments sont installés.

Les turbulences des filets d'eau

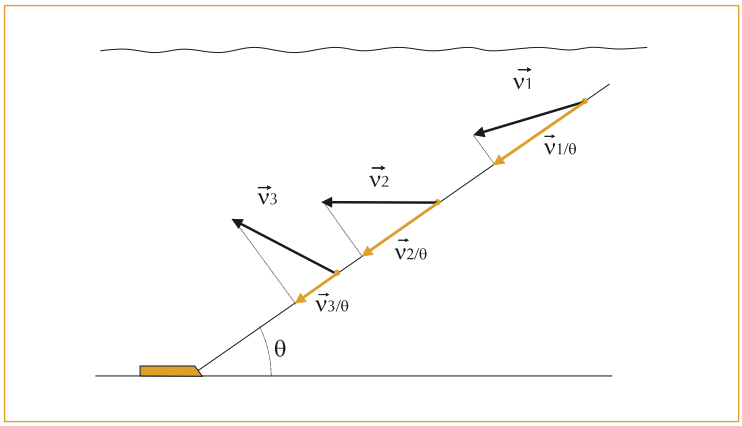
Dans le cas idéal d'un débit uniforme, les filets d'eau sont parfaitement parallèles les uns aux autres et sont dans la direction de l'écoulement. Dans la réalité, l'écoulement n'est quasiment jamais uniforme et par conséquent, à cause des turbulences dans l'eau, la direction du vecteur vitesse (de même norme) d'une particule à un instant donné peut être différente de la direction globale de l'écoulement. En conséquence, et d'après ce qui a été présenté auparavant, les projections des vitesses selon l'axe du faisceau varieront avec la direction des particules (figure 6). La vitesse de l'écoulement recherchée correspond à la composante horizontale des vecteurs vitesses de toutes les particules. Un appareil Doppler prenant en compte la composante selon la seule direction de l'angle du faisceau de référence, la vitesse de l'écoulement sera surestimée pour la particule V_1 et sous-estimée pour la particule V_3, respectivement, sur la figure 6. La conséquence est que le spectre de réponse sera dégradé par rapport au spectre théorique vu précédemment.

Dans la pratique, les appareils ont été conçus pour des conditions de turbulence minimes. Il faut donc faire en sorte de placer les débitmètres Doppler dans un écoulement le plus laminaire et uniforme possible, recommandation généralement précisée par les constructeurs.

Les variations du champ de vitesse dans la colonne d'eau

Le champ de vitesse de l'eau dans un canal à surface libre n'est pas uniforme sur toute la surface mouillée. À cause des frottements dus aux parois, la vitesse de l'eau est freinée près du périmètre mouillé alors qu'elle ne l'est pas ou peu au centre de l'écoulement (figure 2B, *p. 25* et figure 6, voir aussi la norme NF X10-311). Ainsi, la vitesse d'eau dans la zone appelée couche limite très près des parois, est quasiment nulle.

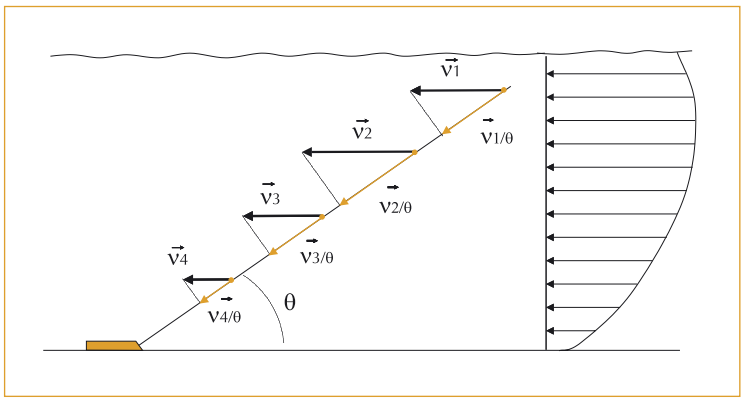
Dans la direction θ du faisceau, le décalage de fréquence dû à l'effet Doppler ne sera donc pas unique et sera représentatif du profil de vitesse que traverse l'onde ultrasonore (figure 7). À notre connaissance, cet aspect des choses n'est pas clairement explicité par les constructeurs qui ont développé le traitement du signal dans des conditions de vitesse homogènes, parallèles et isotropes. En réalité, les profils de vitesse sont complètement dépendants des conditions d'écoulement, et en particulier des formes et des dimensions de la section. Il est donc attendu que le traitement proposé du signal soit relativement « générique ». En conséquence, la vitesse estimée par les instruments correspond à une sorte de vitesse « moyenne » à l'intérieur de l'enveloppe de l'onde ultrasonore, **vitesse qui ne correspond pas nécessairement à la vitesse moyenne sur la section mouillée utilisée pour le calcul des débits**.



▲ Figure 6 – Effet des turbulences dans l'eau sur le décalage de fréquence de particules ayant des vitesses de même norme.

L'intensité du signal reçu

Dans une eau très turbide, une partie importante du signal envoyé est réfléchie par les particules proches de l'instrument avant de pouvoir parvenir aux particules plus éloignées. Les signaux renvoyés par les particules proches seront donc relativement plus nombreux que ceux renvoyés par les particules à la limite de pénétration du signal sonore. Dans les eaux turbides, la technique Doppler continu a théoriquement tendance à donner une relative importance aux vitesses



▼ Figure 7 – Vue longitudinale de la répartition normale des vitesses dans un canal découvert.

de l'eau proche du capteur. Il semble que ce phénomène soit au moins partiellement pris en compte dans le traitement automatique du signal breveté par les constructeurs. Dans le cas d'eau extrêmement turbide, l'onde ultrasonore peut ne pas atteindre la même distance et ainsi ne pas scanner le même volume de la colonne d'eau lorsque l'eau est claire. Dans ces deux cas, ce n'est pas le même volume d'eau dans lequel on mesure une vitesse « moyenne ».

Les réflexions de l'onde sonore à l'interface air-eau

Lorsque la hauteur d'eau est relativement faible, les ondes ultrasonores émises et renvoyées peuvent se réfléchir au niveau de l'interface air-eau. Ceci ne pose pas de problème particulier sinon que certaines zones de la colonne d'eau peuvent être explorées plusieurs fois et ainsi donner une importance artificielle lors du traitement du signal. Un problème plus commun semble être la réflexion des ultrasons contre les vaguelettes générées par le vent. La vitesse de déplacement de ces vaguelettes provoque un décalage de fréquence des ultrasons émis et vient ainsi perturber le signal reçu. Pour des vitesses d'eau relativement faibles de quelques centimètres par seconde, ce problème peut devenir assez gênant, d'autant plus que les débitmètres sont souvent placés dans des buses ou des sections relativement calibrées dans lesquelles les courants d'air sont assez fréquents.

Les propriétés des ondes ultrasonores dans l'eau

Ces limites ne sont pas spécifiques à la méthode elle-même mais correspondent aux spécificités des appareils. Ainsi, une onde ultrasonore à fréquence relativement plus faible aura tendance à pénétrer sur une plus grande distance. La colonne d'eau scannée sera donc plus importante, ce qui peut être préférable dans beaucoup de cas. La contrepartie est que les plus basses fréquences impliquent une taille plus grande du transducteur émetteur d'ultrason, et par conséquent une obstruction plus grande de l'écoulement, chose que l'on cherche à éviter, *a priori*.

La célérité du son dans l'eau varie avec sa densité, qui elle-même est fonction de la température et de la concentration en ions (dans la pratique, il s'agit de la salinité). Certains capteurs possèdent une sonde de température et font automatiquement la correction pour la vitesse de l'eau. Dans la plupart des cas de mesure de débit dans les bassins versants agricoles de petite taille, la salinité de l'eau reste faible et la célérité du son dans l'eau n'est que très peu influencée par la concentration ionique de l'eau.

Bilan et règles d'application du Doppler continu

La première règle essentielle d'installation du débitmètre Doppler continu est un écoulement le plus uniforme possible, dont les profils de vitesse sont relativement répétables au cours du temps, et qui permette de se rapprocher le plus possible des conditions pour lesquelles le traitement du signal de décalage de fréquences a été établi.

D'autres conditions sont proposées dans les lignes directrices d'application de la méthode établies par l'ISO (*International Organization for Standardization* ; ISO/TS 15769:2000(E)), mais certains aspects nous paraissent sujets à amélioration. En particulier, les lignes directrices insistent sur le fait que le faisceau d'onde ultrasonore doive couvrir une surface maximale de la section mouillée totale, car ainsi, la vitesse estimée par le capteur Doppler serait plus proche de la vitesse moyenne sur toute la section mouillée. De notre point de vue, il ne semble pas du tout évident que la vitesse estimée par un capteur Doppler, le faisceau d'onde couvrît-il toute la surface mouillée, corresponde nécessairement à la vitesse moyenne (utilisée pour le calcul du débit) sur toute la section. Le traitement du signal ayant été mis au point pour des sections particulières et une isotropie des vitesses, il ne peut pas s'adapter universellement à toutes les dimensions, tailles et formes des sections, et ainsi à tous les champs de vitesse. Il nous semble donc important que la vitesse estimée par le capteur Doppler soit comparée à la vitesse moyenne sur la section. Celle-ci peut-être calculée à partir des techniques de jaugeage basées sur l'exploration du champ de vitesse (mesures au courantomètre et micro-moulinet). Ainsi un calibrage de la vitesse estimée par le capteur Doppler nous semble nécessaire pour que celle-ci soit prise en compte dans le calcul des débits. Ce point à notre avis essentiel n'apparaît pas dans le guide normatif.

La deuxième règle essentielle de bonne application des capteurs Doppler continu est donc l'établissement de la corrélation entre la vitesse mesurée par le capteur Doppler et la vitesse moyenne utilisée pour le calcul des débits dans

la section particulière où sera installé l'instrument. Cette corrélation se fait lors de jaugeages manuels pour la gamme de vitesses rencontrées.

Il faut ici rappeler que le débit est calculé en multipliant la vitesse moyenne par la surface de la section mouillée. Toutes les précautions prises et énoncées plus haut doivent être accompagnées d'une bonne estimation de cette surface. La grande majorité des appareils Doppler la calcule par la seule mesure de la hauteur d'eau. La relation entre la hauteur d'eau et la surface de la section mouillée ne pourra se faire avec une bonne précision que si les dimensions de la section de mesures sont connues et stables.

La troisième règle d'application des capteurs Doppler est une installation dans une section de dimensions connues et stables, et à partir desquelles il est aisé de calculer la surface de la section mouillée avec la seule mesure de hauteur d'eau.

Application pour une section aménagée calibrée en bois

Nous proposons ici une application de l'utilisation des capteurs ultrasoniques Doppler associée à la construction d'une section trapézoïdale en bois installée au fond d'un cours d'eau dont on désire mesurer les débits. L'eau s'écoule sur du contreplaqué marine, lui-même maintenu sur des cadres en bois fixés au radier et aux berges. L'intérêt d'une telle section est multiple :

– le fond et les côtés de la section étant plaqués le plus possible au radier et aux berges, respectivement, les régimes d'écoulement sont faiblement perturbés ;

– les dimensions de la section mouillée sont connues ;

– la surface de la section mouillée peut être facilement dérivée de la seule mesure de hauteur d'eau ;

– l'incertitude de la mesure par jaugeage de la vitesse moyenne dans la section peut être maîtrisée ;

– la station trapézoïdale peut être installée quasiment partout dans la mesure où la ligne d'eau reste quasi horizontale, condition qui peut se trouver à un endroit ou un autre, même dans un cours d'eau à fort gradient global. La seule condition aval contraignante est le maintien d'un niveau d'eau suffisant en période d'étiage ;

– une telle section est facile à fabriquer, à installer et peut être démontée si besoin sans laisser de « traces ». Elle demande un entretien sommaire puisqu'il n'y a pas de rétention de sédiments car très peu d'obstacles. La viabilité à long terme est liée à la longévité du contreplaqué choisi et moins à celle du bois des cadres ;

– une telle station n'offre pas d'obstacle à la remontée des poissons ;

– elle se fond relativement bien dans le paysage ;

– le prix de revient de son installation est relativement bon marché par rapport à l'installation d'un déversoir.

Un guide de construction et d'installation d'une telle station est fourni en annexe (*p. 77*). Seront discutés ici les performances et les avantages d'un tel dispositif par rapport à des méthodes de jaugeages classiques.

Discussion sur la méthode de mesure des débits avec des stations en bois calibrées

L'objet de cette partie n'est pas d'évaluer tel ou tel capteur Doppler ou la technique Doppler en elle-même, mais plutôt l'ensemble « section calibrée en bois équipée d'un capteur Doppler continu ».

Évaluation de la relation vitesse capteur-vitesse moyenne

Nous avons vu précédemment que la vitesse estimée par les débitmètres Doppler continus ne correspond pas nécessairement à la vitesse moyenne qui sert pour le calcul des débits dans la section. Il faut donc impérativement estimer la corrélation entre la vitesse mesurée par le capteur avec la vitesse moyenne sur la section mouillée. Pour cela, on effectue des jaugeages ponctuels qui permettent d'obtenir un débit à un moment donné, débit que l'on divise par la surface mouillée pour obtenir la vitesse moyenne.

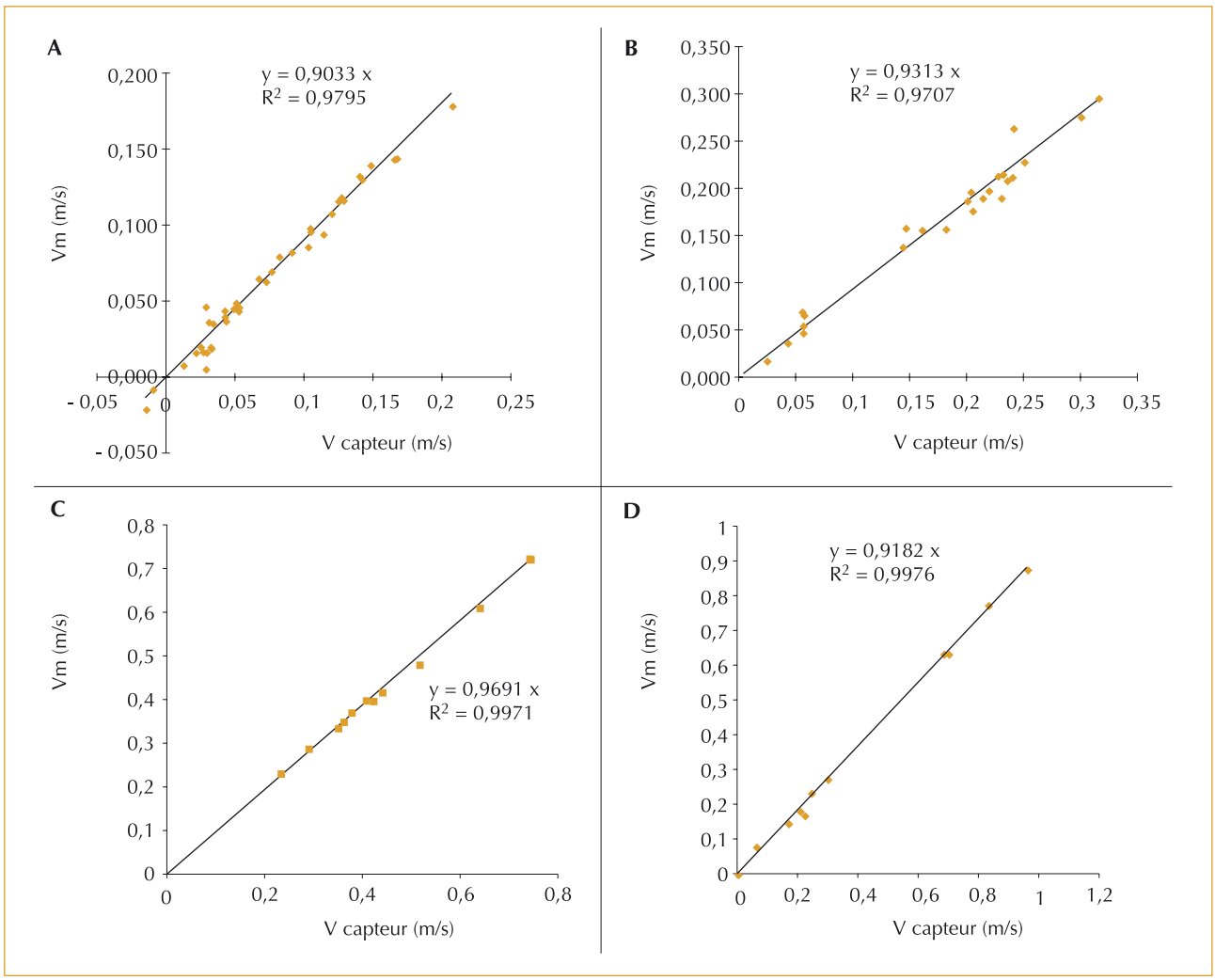
Il existe plusieurs méthodes de jaugeages rappelées dans la norme NF EN ISO 748 (2002). Nous avons choisi la méthode qui consiste à séparer artificiellement la section mouillée en colonnes verticales d'eau dans lesquelles on évalue une vitesse moyenne. La même norme rappelle les différentes méthodes d'estimation des vitesses moyennes sur une verticale dans une section, et nous avons choisi la méthode du point unique.

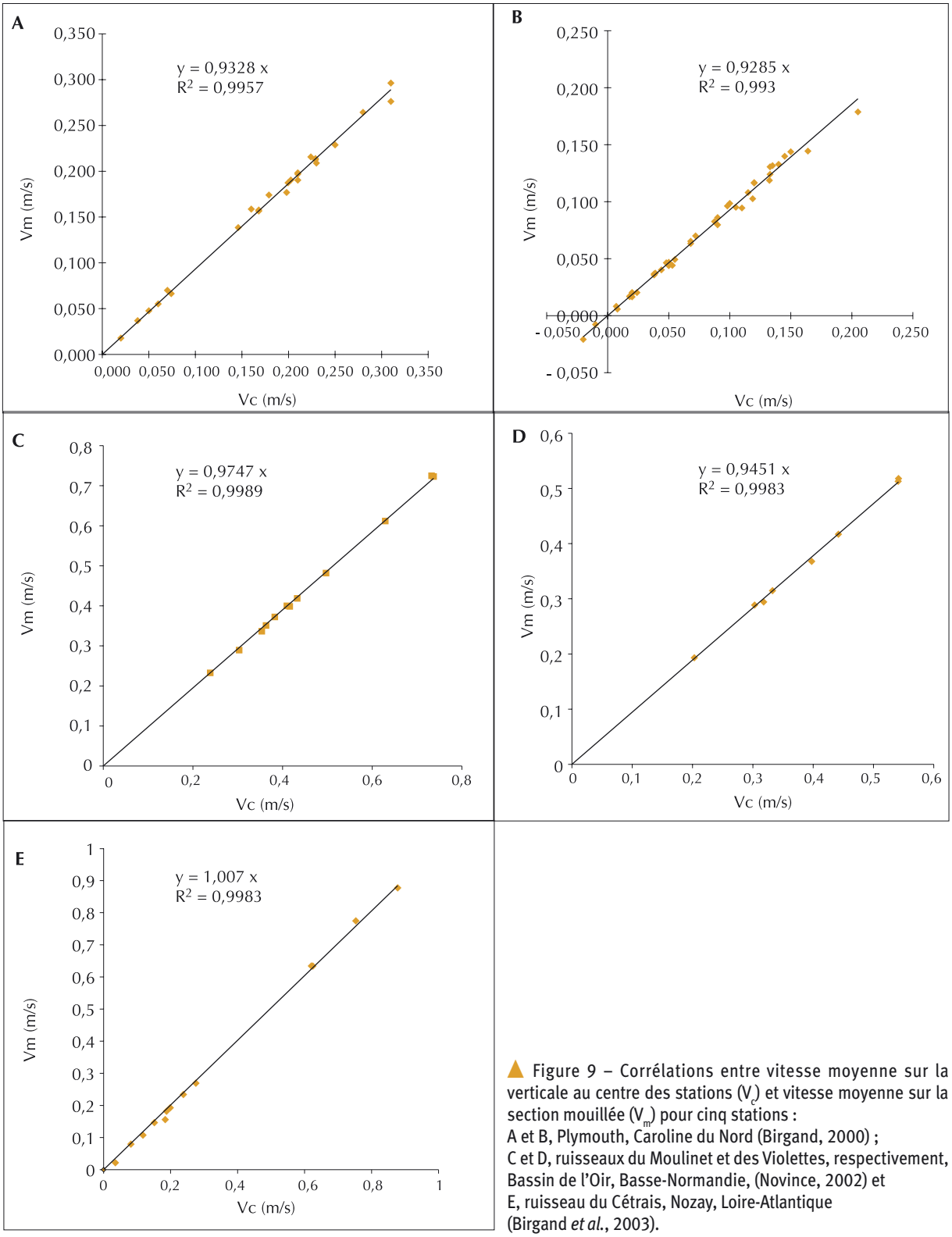
▼ Figure 8 – Corrélations entre vitesses mesurées par des capteurs Doppler ($V_{capteur}$) et vitesses moyennes sur la section mouillée (V_m) pour quatre stations : A et B, Plymouth, Caroline du Nord, USA (Birgand, 2000) ; C, ruisseau du Moulinet, Bassin de l'Oir, Basse-Normandie, (Novince, 2002) et D, ruisseau du Cétrais, Nozay, Loire-Atlantique (Birgand *et al.*, 2003).

Dans cette méthode, on considère que la vitesse moyenne sur une verticale correspond à la vitesse ponctuelle située à 0,6 fois la profondeur au-dessous de la surface. Le débit dans chaque colonne imaginaire de la section mouillée est calculé en multipliant la vitesse moyenne sur la verticale au centre de chaque colonne par sa surface. Le débit total est évalué en sommant tous les débits élémentaires dans chaque colonne. Pour chaque jaugeage, on peut donc évaluer la vitesse moyenne correspondante. On obtient au final une corrélation entre la vitesse du capteur et la vitesse moyenne sur la section, en prenant les valeurs de vitesses moyennes obtenues pour des régimes d'écoulement différents à des périodes de l'année différentes et en sélectionnant parmi les valeurs enregistrées automatiquement celles correspondant aux dates et heures de jaugeage (figure 8).

Toutes les mesures présentées ici ont été faites avec des appareils Doppler continus Starflow (Unidata Australia). Il est intéressant de constater que les corrélations sont plutôt bonnes à très bonnes entre les vitesses du capteur et les vitesses moyennes (R^2 entre 0,97 et 0,995). Les coefficients de corrélation 0,9033 et 0,9691 montrent que des surestimations systématiques de 3 à 10 % auraient été faites en prenant les valeurs de vitesses données par les capteurs Doppler comme vitesse moyenne pour le calcul des débits, et par conséquent de grossières erreurs sur les volumes écoulés.

Plusieurs facteurs influent sur les résultats de ces corrélations dont deux en particulier : les formes et dimensions des sections en bois et la fiabilité des capteurs utilisés. Il nous a semblé intéressant d'apprécier l'impact sur les écou-





▲ Figure 9 – Corrélations entre vitesse moyenne sur la verticale au centre des stations (V_c) et vitesse moyenne sur la section mouillée (V_m) pour cinq stations :
A et B, Plymouth, Caroline du Nord (Birgand, 2000) ;
C et D, ruisseaux du Moulinet et des Violettes, respectivement, Bassin de l'Oir, Basse-Normandie, (Novince, 2002) et
E, ruisseau du Cétrais, Nozay, Loire-Atlantique
(Birgand *et al.*, 2003).

lements des stations elles-mêmes. Pour cela, nous avons corrélé la vitesse moyenne (estimée par la méthode précédente) sur la verticale au centre des stations (endroit où les capteurs sont installés) avec la vitesse moyenne sur la section mouillée. Cette relation est quasi indépendante du courantomètre utilisé. Il nous semble que ces corrélations sont bonnes (figure 9, *p. 31*), ce qui semble vouloir indiquer que les stations en bois permettent des écoulements ayant des caractéristiques semblables pour des régimes de débits et de vitesse différents et cela de façon relativement constante dans le temps. Les coefficients de corrélation s'échelonnent surtout entre 0,93 et 0,97. La valeur de 1,007 correspond à une section placée trop près d'un méandre et pour laquelle les vitesses ne sont pas symétriques dans la section. Il est intéressant de noter que pour les quatre autres stations pour lesquelles les écoulements étaient relativement symétriques, les coefficients varient peu malgré des différences de forme des sections. En l'absence de jaugeage préalable, et dans une section où l'écoulement est relativement uniforme, on peut prendre comme première approximation que la vitesse moyenne au centre est à peu près égale à 0,95 fois la vitesse moyenne sur la section.

Cette dernière information est utile dans la mesure où les vitesses mesurées par les capteurs correspondent aux vitesses moyennes au centre. Les différences de coefficients entre les figures 8 et 9 suggèrent néanmoins que cette condition n'était pas remplie avec les capteurs utilisés ici.

Performances de la méthode de mesure

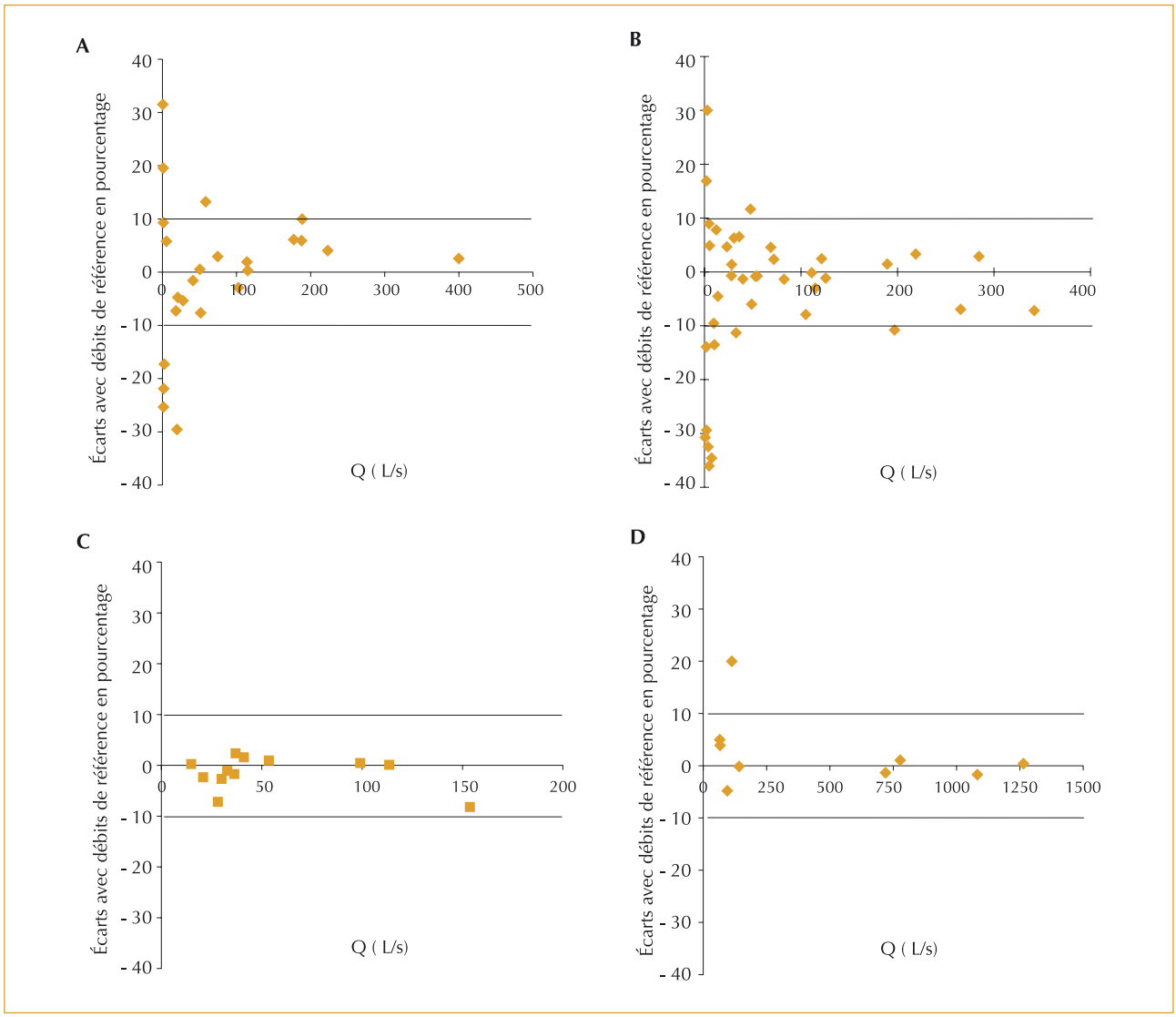
Il ne s'agit pas dans cette partie d'évaluer, avec toute la rigueur que cela nécessite, les incertitudes associées avec cette méthode de mesure des débits. Cette évaluation fait l'objet de travaux en préparation. Les performances de la méthode sont évaluées ici en comparant les débits mesurés ponctuellement par jaugeage avec ceux estimés à partir des mesures des capteurs Doppler (figure 10 et tableau 1).

À partir des résultats sur les stations sur lesquelles nous avons pu faire un suivi métrologique, on est tenté de conclure que les débits peuvent être mesurés avec des écarts à ± 10 % de la valeur réelle. Seul le calcul complexe de l'incertitude peut de façon rigoureuse confirmer cette observation. Les écarts aux débits de référence mesurés en Caroline du Nord (figure 10 A et B) montrent des valeurs supérieures à 10 % pour les très faibles débits. Il est néanmoins reconnu qu'il est très difficile d'avoir des écarts faibles pour cette gamme de débits. La performance semble être la meilleure pour la station du Moulinet en Normandie (figure 10 C). Ceci est peut-être dû à la zone de calme qui existe à l'amont de cette station et qui tend à uniformiser les écoulements au passage sur la station. Les conclusions sont à nuancer pour les stations des figures 10 C et D, dans la mesure où encore peu de valeurs étaient disponibles pour l'écriture de cet article.

Nous pensons néanmoins que la valeur de 10 % autour de la valeur de référence de débit semble être un bon repère pour ce genre de station de mesure. Un des plus grands intérêts au niveau métrologique de l'utilisation de la présente méthode est le fait que, par définition du calcul de la vitesse moyenne sur la section, on ne fait *a priori* pas d'erreur systématique sur cette évaluation. En effet, la droite de régression passe par définition au « centre » du nuage de points. La seule erreur systématique peut provenir du calcul de la surface de la section mouillée.

La comparaison des coefficients de corrélation entre les débits mesurés manuellement et ceux estimés dans les sections (tableau 1) fait apparaître que les débits ont été surestimés, et ce de façon significative, sur les stations de Caroline du Nord (coefficient de corrélation égal à 1 non inclus dans l'encadrement des valeurs limites au seuil de confiance 95 %). Pour les deux autres stations françaises, les débits estimés automatiquement ne sont pas significativement différents des débits de référence. Néanmoins, le faible nombre de points de mesures effectués sur les stations françaises par rapport aux américaines agrandit artificiellement l'encadrement des valeurs limites de « significativité » (tableau 1).

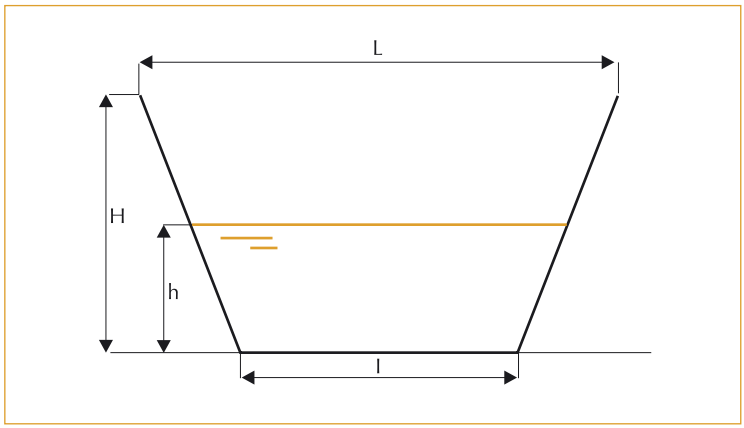
Ces résultats suggèrent que malgré toutes les précautions prises pour les corrections des vitesses, des erreurs systématiques peuvent amener à sous ou surévaluer les débits et par voie de conséquence les volumes écoulés et les flux de nutriments ou de polluants. La surévaluation des débits pour les stations de Caroline du Nord a été attribuée à une légère surestimation des hauteurs d'eau par le capteur de pression incorporé à l'appareil Doppler, et ce malgré les recalages réguliers effectués sur ce paramètre. Il nous semble donc important de rappeler quelques règles pour minimiser les incertitudes de mesure sur la surface de la section mouillée.



▲ Figure 10 – Écarts entre les débits mesurés dans les stations en bois trapézoïdales équipées de « débitmètres » Doppler avec des débits de référence mesurés par jaugeages ponctuels. A et B, Plymouth, Caroline du Nord, USA (Birgand, 2000) ; C, ruisseau du Moulinet, Bassin de l'Oir, Basse-Normandie, (Novince, 2002) et D, ruisseau du Cétrais, Nozay, Loire-Atlantique (Birgand *et al.*, 2003).

	Coefficient de corrélation	Coefficient de détermination R^2	Seuil de confiance = 95 %		Différence significative par rapport au débit de référence
			Limite inférieure	Limite supérieure	
Station Plymouth A	1,0377	0,9983	1,0236	1,0518	Oui
Station Plymouth B	1,0314	0,9949	1,0136	1,0492	Oui
Station du Moulinet	0,9537	0,9942	0,9029	1,0045	Non
Station du Cétrais	0,9965	0,9995	0,9843	1,0087	Non

▲ Tableau 1 – Statistiques des corrélations linéaires entre les débits de référence mesurés par jaugeage et les débits mesurés avec les appareils Doppler dans les sections en bois.



▲ Figure 11 – Dimensions pour le calcul de la surface de la section mouillée.

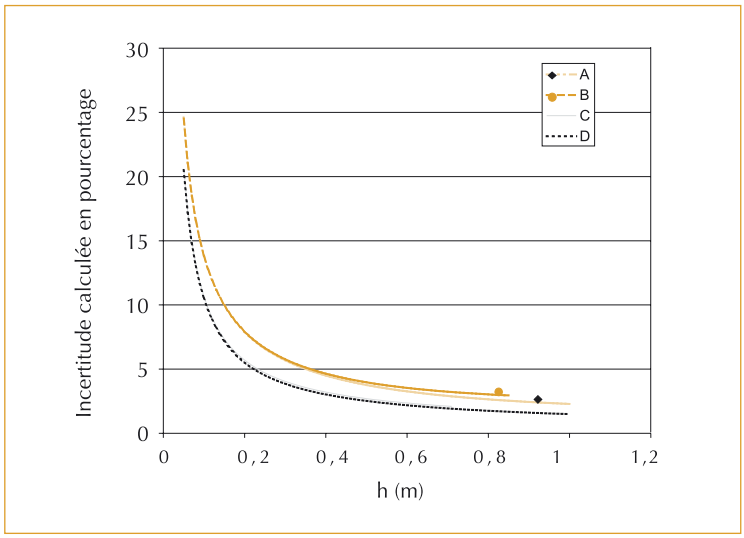
Règles pour minimiser les erreurs sur le calcul de la surface de la section mouillée

La construction d'une section en bois réduit très sensiblement les incertitudes sur la surface de la section mouillée par rapport à une mesure dans un cours d'eau sans section contrôlée. Néanmoins, l'installation et/ou la forme de la section peuvent jouer de façon significative. Un exemple du calcul d'incertitude sur l'estimation de la surface mouillée illustre ce propos.

La surface S de la section mouillée peut être exprimée en fonction de longueurs facilement mesurables sur le terrain et peut s'exprimer :

$$S = \frac{(L - l) \times h^2}{2 \times H} + h \times l$$

avec L, l, H, et h explicités sur la figure 11.



▼ Figure 12 – Calcul théorique des incertitudes sur la surface de la section mouillée pour quatre stations. A, B, C et D correspondent aux stations définies dans la figure 9 (*p. 31*).

La grande majorité des capteurs Doppler sont équipés de capteurs de pression (transducteur, « bulle à bulle ») qui permettent de mesurer la hauteur d'eau au-dessus du fond de la station.

En faisant l'hypothèse que la section est parfaitement horizontale et symétrique, l'incertitude $u^2(S)$ sur S peut se calculer en fonction des incertitudes $u^2(h)$, $u^2(H)$, $u^2(L)$ et $u^2(l)$ de h, H, L et l, respectivement, avec :

$$u^2(S) = \left(\frac{(\partial S)}{(\partial h)}\right)^2 \bullet u^2(h) + \left(\frac{(\partial S)}{(\partial L)}\right)^2 \bullet u^2(L) + \left(\frac{(\partial S)}{(\partial l)}\right)^2 \bullet u^2(l) + \left(\frac{(\partial S)}{(\partial H)}\right)^2 \bullet u^2(H)$$

Les dérivées partielles ont été obtenues à partir de l'équation de S. Pour le calcul, nous avons estimé les incertitudes sur H, L et l de longueurs égales à 1,5 cm pour la station relativement petite de la figure 10 C et 2 cm pour les autres stations. Il est communément accepté de prendre 1 cm pour l'incertitude sur h (Benoist et Birgand, 2002).

Les résultats des calculs sur les incertitudes sur la surface de la section mouillée sont présentés sur la figure 12. Deux types de courbes se dégagent et correspondent à des formes de sections particulières. Les sections des stations A et B sont très évasées, avec des angles entre le fond et les bords inférieurs à 23°, alors que les stations C et D ont des angles plus aigus, autour de 40°. Pour les stations A et B et pour une même hauteur h, la surface mouillée des stations est plus importante que pour les stations C et D, ce qui a pour conséquence des incertitudes plus fortes de 2 points environ pour les deux premières stations. On fait l'hypothèse, dans ce calcul d'incertitude, que la section est parfaitement horizontale et symétrique, ce qui dans la pratique est sûrement un peu faux. Les incertitudes sont donc certainement supérieures à celles évaluées ici.

On peut néanmoins conclure qu'il est préférable *a priori* d'installer les stations dans des sections relativement encaissées, de façon à minimiser l'incertitude théorique sur la surface de la section mouillée, et prendre la plus grande précaution lors de l'installation pour que la section soit la plus horizontale et la plus symétrique possible.

Les dimensions de la section utilisées pour calculer la surface de la section mouillée sont les mêmes pour les jaugeages et pour le calcul automatique du débit, puisque les jaugeages manuels sont effectués au niveau de l'emplacement

des débitmètres dans la section trapézoïdale. Les incertitudes de mesure des dimensions de la section peuvent donc être masquées pour le calcul de la vitesse moyenne et à terme des débits. Un biais peut donc être introduit sans qu'à aucun moment l'on puisse s'en rendre compte. Il est donc impératif de mesurer de façon la plus précise possible les dimensions de la section en bois. Nous préconisons en particulier l'utilisation de niveaux de chantier pour les mesures de hauteur. Nous pensons néanmoins que l'erreur faite sur la surface de la section mouillée est sans doute moins grande ici que dans le cas où les jaugeages sont faits dans des sections « naturelles » où le périmètre mouillé est irrégulier et mal connu.

Les surestimations de débits observées en Caroline du Nord ont été attribuées à une légère surestimation des hauteurs. Les capteurs de pression avaient en effet tendance à dériver à la hausse au cours du temps. Cette dérive avait pourtant été prise en compte et régulièrement corrigée, mais les résultats montrent combien malgré toutes les précautions prises, il peut être facile de systématiquement sur ou sous-estimer les débits.

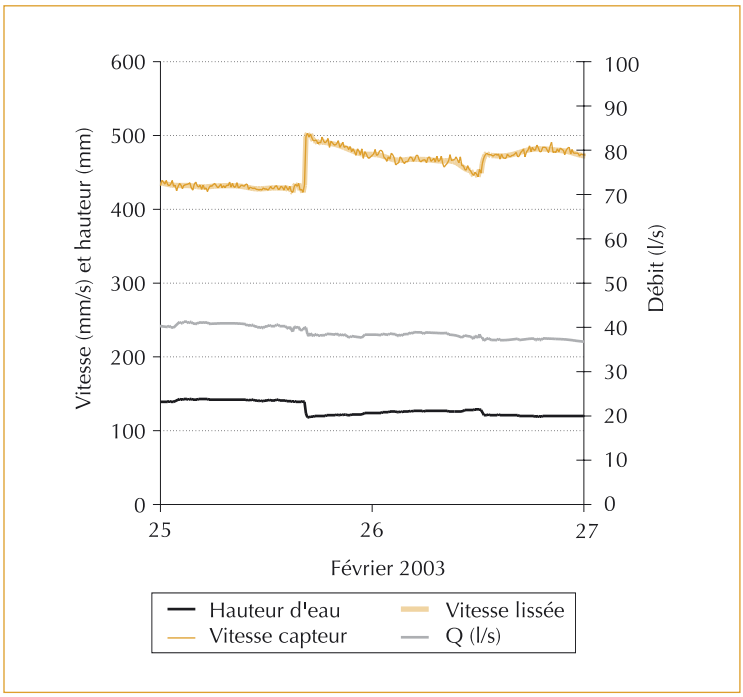
Avantages et limites de la mesure des débits par effet Doppler

Le principal avantage de la méthode par rapport à des méthodes classiques de mesure des débits, est l'information nouvelle sur la vitesse. Ceci permet de mesurer des débits dans des situations ou des sections où la relation entre la vitesse et la hauteur d'eau n'est pas univoque, condition nécessaire pour la majorité des méthodes plus classiques. La méthode permet aussi de détecter des changements soudains ou progressifs de la relation hauteur-débits, ce qu'une méthode classique de mesure de hauteur d'eau non associée à un ouvrage hydraulique ne peut pas.

L'exemple de la figure 13 montre une baisse soudaine du niveau de l'eau liée au relargage d'une embâcle à l'aval de la section (à deux reprises en 24 heures). En utilisant une relation hauteur-débit classique pour estimer les débits, deux estimations à la baisse des débits auraient été calculées. En réalité, le relargage des embâcles s'est accompagné, fort logiquement, d'une augmentation des vitesses de l'eau, et le débit n'a en fait quasiment pas varié sur la figure 13. Seule la mesure de vitesse accompagnée de la mesure de hauteur permet de telles observations. Outre les variations soudaines, la méthode présentée ici permet de prendre en compte les phénomènes d'hystérésis pendant les crues déjà présentés auparavant (figure 1, *p. 24*).

La bonne utilisation de cette méthode doit nécessairement s'accompagner d'une campagne de jaugeage pour permettre de caractériser la relation entre les vitesses mesurées par le capteur et les vitesses moyennes sur la section. En cela, la méthode nécessite autant de travail de jaugeage que les méthodes plus classiques et n'est donc pas plus « simple » d'utilisation. En revanche, le calibrage de la vitesse établi, on peut avoir une information fine de la courbe de tarage hauteur-débit, et particulièrement, on peut avoir une information sur les débits extrêmes, qu'il est très difficile de jauger en général. Les débitmètres Doppler peuvent donc être installés de façon temporaire sur des stations où la relation hauteur-vitesse est univoque, de façon à obtenir une information très fine sur la courbe de tarage hauteur-débit, pour n'avoir ensuite que la hauteur à mesurer et utiliser les débitmètres Doppler sur d'autres stations.

La mesure des vitesses permet en outre d'obtenir une information supplémentaire sur les écoulements. On peut ainsi en début de crue détecter des augmentations de débits, uniquement dues à des augmentations de vitesses avant que le niveau



▼ Figure 13 – Conséquences de variations soudaines des conditions de contrôle aval sur les vitesses, les hauteurs et les débits sur le ruisseau des Violettes en Basse-Normandie (Novince, 2002).

d'eau n'ait augmenté. Cette observation peut s'avérer très importante pour l'interprétation des remises en suspension de sédiments dans l'eau par exemple (Lefrançois *et al.*, 2004).

L'information sur les vitesses nécessite un travail supplémentaire de traitement de données par rapport aux seules mesures de hauteur. En particulier, les vitesses « brutes » enregistrées par les capteurs présentent en général un « bruit » autour d'une tendance générale. Ce bruit ne correspond sans doute pas à des fluctuations réelles des débits, mais plutôt à des incertitudes de mesure sur les vitesses et/ou à des turbulences ponctuelles. Nous pensons qu'il est préférable de « lisser » le signal des vitesses en utilisant des moyennes glissantes de façon à utiliser la tendance générale comme valeur de vitesse moyenne pour le calcul des débits (figure 13). Néanmoins, lors des augmentations soudaines des vitesses, la meilleure information disponible sont les données brutes, les valeurs lissées ayant tendance à sur et sous-estimer les vitesses, avant et après les variations (figure 13). Ces corrections sont apportées principalement après évaluation visuelle. Il n'est pas certain néanmoins que les lissages jouent beaucoup sur le calcul des volumes écoulés, mais le lissage nous semble important.

Les chances de dysfonctionnement des appareils sont multipliées par deux par rapport aux mesures classiques de hauteur seule. La dérive des mesures de vitesse n'est pas aussi facilement détectable que celle d'une mesure de hauteur, surtout si elle est lente et faible. Les corrections à apporter ne sont pas simples (bruit du signal) et les appareils doivent être régulièrement renvoyés chez le fabricant pour vérification. Des jaugeages de contrôle doivent être impérativement effectués régulièrement pour détecter des dérives.

Il faut rappeler que les stations doivent être installées dans des sections où la ligne d'eau est quasi horizontale, ce qui peut limiter son application dans beaucoup de situations (Birgand *et al.*, 2005). *A contrario*, cette contrainte peut aussi être un avantage, dans la mesure où l'écoulement n'est pas entravé et la remontée des poissons est possible, ce qui n'est pas le cas avec beaucoup d'ouvrages hydrauliques dont la vocation est la mesure des débits.

Conclusion

L'avènement relativement récent des débitmètres Doppler continus permet d'envisager la mesure des débits dans des situations où les méthodes classiques ne peuvent pas être utilisées de façon satisfaisante. La mesure simultanée des vitesses et de la hauteur de l'eau permet de s'affranchir de certaines conditions de contrôle aval de certaines méthodes plus classiques. Les débits sont calculés en multipliant la surface mouillée avec la vitesse moyenne sur la section.

Nous proposons l'emploi de ces débitmètres sur des sections en bois facilement construites, installées (et démontées le cas échéant). La méthode semble être au moins aussi performante que d'autres techniques, même si l'incertitude de mesure n'a pas été estimée ici avec toute la rigueur que cela nécessite.

L'installation pourtant très simple (Birgand *et al.*, 2005) doit être aussi soignée que possible, car les erreurs systématiques sur la mesure ponctuelle des débits et des volumes écoulés viennent du calcul de la surface mouillée. Les vitesses mesurées par les capteurs Doppler doivent être impérativement corrigées car elles ne correspondent pas forcément à la vitesse moyenne nécessaire au calcul des débits. Les vitesses moyennes sur la section sont obtenues par jaugeage classique dont on améliore sensiblement l'incertitude grâce aux dimensions relativement bien connues de la section mouillée. Les vitesses du capteur sont donc corrigées par l'équation de corrélation entre vitesses moyennes et vitesses du capteur. Cette corrélation implique que l'on ne fait pas *a priori* d'erreur systématique sur la mesure des vitesses.

L'information sur la vitesse de l'eau peut s'avérer cruciale pour le calcul des débits lors de changements soudains ou à moyen terme des conditions de contrôle aval. L'information sur la vitesse peut s'avérer importante pour l'interprétation du transport de nutriments et de polluants dans les bassins versants ruraux.

Ces instruments peuvent en outre être installés de façon momentanée (dans la mesure où l'on connaît bien les performances du capteur utilisé) sur certaines stations de façon à dériver des relations hauteur-débits sur un grand nombre de couple hauteur-débits, et prendre aussi en compte des valeurs extrêmes de hauteurs et débits qui sont par définition rares et donc difficiles à obtenir sur le terrain. Ces débitmètres peuvent aussi être installés dans des buses, assez fréquentes en milieu rural, dans la mesure où les conditions d'installation et de calcul des débits décrites ici sont respectées. ❐

Remerciements

Une partie de ce travail a été financée par les fonds FEOGA[2] dans le cadre d'un projet pluriannuel de protection des eaux contre les pollutions diffuses sur le bassin du Don et du Cétrais (Loire-Atlantique). Une autre partie du travail a été financée dans le cadre d'une action de recherche Inra-Cemagref « Aquae », dans le cadre d'un projet intitulé « Effets de la gestion des bassins versants sur les transferts particulaires et dissous et la qualité biologique des eaux de surface en zone d'élevage ». Les autres résultats proviennent de la thèse de François Birgand, effectuée en Caroline du Nord (USA), où la méthode présentée ici a été mise au point.

2. Fonds européen d'orientation et de garantie agricole.

Résumé

La mesure des débits d'eau à l'exutoire des « petits » bassins versants (‹ 3 500 Ha) est un préalable essentiel à l'estimation des flux de polluants générés par l'activité agricole. Il existe beaucoup de méthodes normées pour mesurer les flux d'eau (28 recensées dans la norme ISO/TR8363: 1997). Dans cet article, nous proposons une méthode relativement simple de la mesure des débits dans les canaux ouverts qui utilise les débitmètres ultrasoniques Doppler, désormais couramment disponibles sur le marché. Cette méthode en général ne fait pas encore l'objet de norme mais des lignes directrices ont récemment été établies (ISO/TS 15769:2000(E)). Nous proposons en premier lieu un rappel du principe et des limitations de la méthode. Plusieurs exemples de stations sont proposés pour plusieurs gammes de débits, et pour lesquels la performance de mesure a été évaluée. Nous pensons que cette méthode peut être très appropriée pour la mesure des débits à l'exutoire des bassins versants agricoles ayant des débits de pointes inférieurs à 10 m³/s et qu'elle pourrait parfois remplacer avantageusement d'autres méthodes plus classiques et dont la mise en œuvre n'est pas toujours optimale.

Abstract

Measuring flow rates at the outlet of small rural catchments (‹3500 Ha) is essential for estimating pollutant fluxes resulting from agricultural activities. Many norms exist for measuring flow rates (28 norms cited in ISO/TR8363: 1997). In this article, we propose a simple method for measuring flow rates in open channels using continuous wave Doppler flowmeters, henceforth rather commonly used. This method has not been registered as a norm, yet, but technical specifications have been drawn (ISO/TS 15769:2000(E)). We here propose a description of the Doppler method principles and limits. Several monitoring stations that we built serve for evaluating the performance of the method. We believe this method can be very appropriately used for flow rates under 10 m³/s and in locations where other classical methods are used in less that satisfactory situations.

Bibliographie

BIRGAND, F *et al.* , 2005, Guide d'application de la technique du Doppler continu pour une section calibrée en bois, *Ingénierie-EAT*, n° 41, p. 77-82.

BENOIST, J.-C. ; BIRGAND, F., 2002, Les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles, *Ingénierie-EAT*, n° 32, p. 51-63.

BIRGAND, F., 2000, *Quantification and modeling of in-stream processes in agricultural canals of the lower coastal plain*, Ph.D. dissertation, Raleigh, North Carolina, USA, 489 p., http://www.lib.ncsu.edu/etd/public/etd-247157710012191/etd-title.html

BIRGAND, F. ; BIOTEAU, T. ; CARLUER, N. ; GOUY, V. ; LEIBREICH, J. ; MACARY, F. ; MARGOUM, C. ; SAINT-CAST, P. ; TURLAN, T. ; TURPIN, N., 2003, *Protection des eaux contre les pollutions diffuses*, rapport FEOGA 2002-2003.

Clean Water Act, Section 319, 1987, Clean Water Act, U.S. Congress, http://www.epa.gov/owow/nps/cwact.html

Directive 91/676/CEE du conseil du 12 Décembre 1991, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates de sources agricoles.

EDELHAUSER, M., 1999, A comparison of continuous wave Doppler vs. Pulsed Profiling Technology, 11 p., MGD Technologies Inc., http://www.mgdinc.com/

LEFRANÇOIS, J. ; GRIMALDI, C. ; BIRGAND, F. ; GASCUEL-ODOUX, C. ; GILLIET, N., 2004, Suspended sediment dynamics in small agricultural catchments : relationships between discharge and sediment concentration, poster au colloque EGU, Nice, 25-30 avril 2004.

ISERMANN, K., 1990, Share of agriculture in nitrogen and phosporus emissions into the surface waters of Western Europe against the background of their eutrophication, *Fert. Res.*, 26, p. 253-269.

ISO 3455:1976, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts. Étalonnage des moulinets à élément rotatif en bassins découverts rectilignes*, 8 p.

ISO/TR 8363:1997, *Measurements of liquid flow in open channels - General guidelines for selection of method. International Norm*, Geneva (Switzerland), ISO, septembre 1997, 7 p.

ISO/TS 15769:2000(E), *Hydrometric Determinations – Liquid Flow in Open Channels and Partly Filled Pipes – Guidelines for the Application of Doppler-Based Flow Measurements, Technical Specification*, Geneva (Switzerland), ISO, décembre 2000, 23 p.

NF EN ISO 748, 2002, *Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes d'exploration du champ des vitesses. Norme européenne, norme française (X 10-301)*, Paris (France), AFNOR, janvier 2002, 44 p.

NF ISO-772, 2001, *Déterminations hydrométriques – Vocabulaire et symboles. Norme internationale*, Paris (France), AFNOR (X10-350), février 2001, 99 p.

NF X 10-311 (1983), *Mesure de débit de l'eau dans les canaux découverts au moyen de déversoirs en mince paroi*, Paris (France), AFNOR, septembre 1983, 37 p.

NOVINCE, E., 2002, *Mesure des flux de matières en suspension dans le cadre d'une étude sur le colmatage des frayères à Salmonidés dans deux bassins versants bas-normands*, mémoire de DEA, Cemagref Rennes, 78 p.

TROSKOLANSKI, A.-T., 1963, *Théorie et pratique des mesures hydrauliques*, Dunod Ed., 820 p.

VERMEYEN, T.-B., 1999, A laboratory evaluation of Unidata's Starflow Doppler Flowmeter and MGD Technologies Acoustic Doppler FlowMeter (ADFM), Water Resources Research Laboratory, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, http://www.usbr.gov/wrrl/tvermeyen/starflow/index.html

VITOUSEK, P.-M. ; ABER, J.-D. ; HOWARTH, R.-W. ; LIKENS, G.-E., MATSON, P.-A. ; SCHINDLER, D.-D.-W., SCHLESINGER, W.H. ; TILMAN, D.-G., 1997, Human alteration of the global nitrogen cycle: Sources and consequences, *Ecol. Appl.*, 7(3), p. 737-750.