

# Les dispositifs de mesure des débits dans les bassins versants agricoles

Jean-Claude Benoist et François Birgand

*À l'échelle des bassins versants, la maîtrise des pollutions et la mise en place de stratégies préventives nécessitent une quantification et une localisation des flux, notamment à partir de dispositifs de mesure des débits. Ce document présente les principales techniques de mesures des débits et une analyse de leur emploi en fonction des contextes et situations. Les techniques de jaugeage sont rappelées et les instruments de mesure de vitesse et de hauteur couramment employés sont inventoriés. La dernière partie rappelle les bases de l'acquisition des données qui permettent l'adéquation des équipements d'acquisition de mesure en fonction des instruments utilisés.*

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 (ex. : directive nitrate 91/676/CEE). Ces réductions s'adressent particulièrement à l'agriculture puisqu'entre 40 et 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 dans les bassins versants agricoles. La mesure des débits étant un préalable essentiel à la mesure des flux, ce document présente, de façon succincte, les dispositifs de mesures de débit dans le domaine de l'hydrologie agricole<sup>1</sup>.

Le débit correspond à un volume de liquide écoulé pendant une unité de temps. Il n'est pas mesuré en tant que tel mais calculé à partir d'une ou plusieurs grandeurs mesurées selon les deux expressions générales :

1)  $Q =$  fonction de la hauteur, établie à partir d'une courbe de tarage issue de jaugeages ; ou à partir d'une loi de déversoir,

2)  $Q =$  produit de la vitesse moyenne  $\times$  section mouillée (cette dernière établie à partir d'une mesure de hauteur).

La validité du calcul est soumise à des hypothèses relatives aux conditions d'écoulement dans la section de mesure, et il convient de vérifier la validité de celles-ci. Il conviendra aussi de différencier les mesures dites permanentes, les seules à caractériser le débit de façon acceptable, et les mesures dites temporaires utilisées pour une estimation ponctuelle (permettant un choix de site par exemple) ou pour un étalonnage du site (jaugeage). Chaque type de mesure nécessite des équipements quelque peu différents.

Quel que soit son principe, la mesure de vitesse ne se fait en général que localement par rapport à la section mouillée totale. La vitesse de l'eau mesurée et enregistrée ne correspond donc pas forcément à la vitesse moyenne recherchée pour le calcul du débit. Établir une relation entre la vitesse mesurée localement dans la colonne d'eau et la vitesse moyenne dans la section mouillée est donc nécessaire pour améliorer l'évaluation des débits.

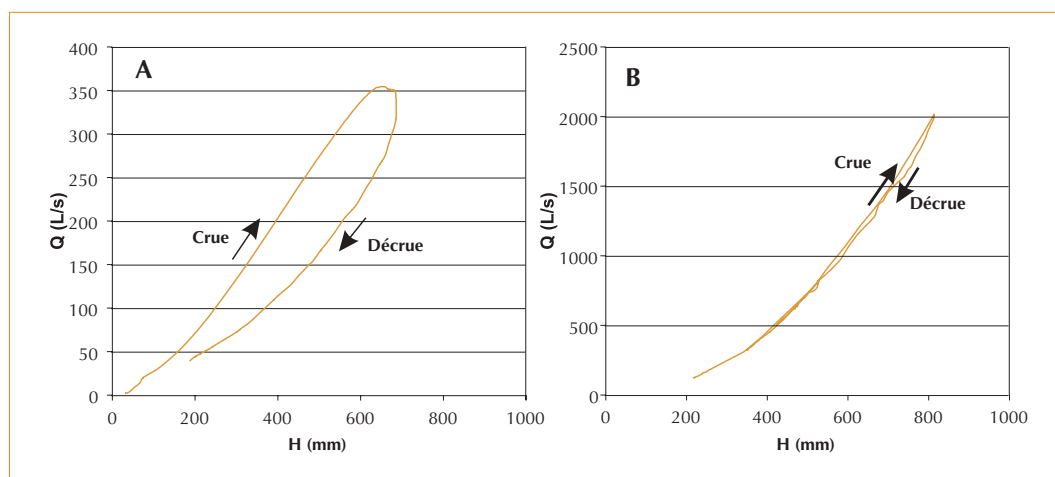
Si quelques éléments d'appréciation sont formulés ici pour tel ou tel dispositif de mesure, nous éviterons volontairement la comparaison entre eux

1. Ce document est très inspiré de l'excellent ouvrage écrit par Bertrand-Krajewski *et al.*, (2000) qui dresse de façon très exhaustive l'état des connaissances pour les mesures en hydrologie urbaine et en assainissement, principes qui peuvent être transposables à l'hydrologie des bassins versants agricoles.

## Contact

Cemagref, UR Gestion des effluents d'élevage et des déchets municipaux, 17, avenue de Cucillé, CS 64427, 35044 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.



en terme d'incertitude de mesure, car elle serait au mieux insuffisante et au pire erronée. En effet, l'incertitude de mesure est établie à partir d'une somme des erreurs évidemment liées à celle du capteur (communément intitulée, dans la documentation commerciale, précision de mesure), mais qui doit être complétée des erreurs dues à la méthode, au milieu, aux opérateurs et à la matière. Ces erreurs peuvent être variables selon le dispositif ébauché.

La détermination d'une incertitude de mesure d'un dispositif demande un développement à part entière relevant d'une démarche métrologique établie à partir de méthodes dûment approuvées, généralement sur la base de normes dont quelques unes sont rappelées au cours du texte et auxquelles nous renvoyons le lecteur.

## Les techniques de mesure du débit

### Les mesures des débits dans les « grands » bassins versants agricoles (> 2 000 ha ou débit maxi > 3 m<sup>3</sup>/s)

La taille du bassin oriente la technique de mesure. Pour les grands bassins, la détermination de vitesse moyenne en continu à partir d'une seule mesure de vitesse locale est pour le moins délicate. Aussi la méthode la plus répandue est d'établir une courbe de tarage  $Q = f(\text{hauteur})$ , obtenue par jaugeages répétés suffisamment de fois pour représenter au mieux les variations possibles de hauteur d'eau. Le débit est donc évalué par la mesure d'une seule grandeur : la hauteur d'eau.

L'établissement d'une courbe de tarage est une opération relativement lourde. Les principes en seront rappelés ci-après.

L'hypothèse de base consiste à considérer que l'écoulement est permanent uniforme. Autrement dit, on fait l'hypothèse que la relation hauteur-débit est uniforme et qu'elle ne varie pas au cours du temps, et en particulier lors d'un événement hydrologique. Cette hypothèse est en général appropriée mais il convient d'être conscient de ses limites. La limite la plus évidente est que la relation hauteur-débit peut évoluer graduellement ou de façon soudaine 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...). Il peut donc y avoir détarage de la station de mesure et il est nécessaire d'effectuer des contrôles réguliers pour vérifier la validité de la courbe de tarage.

Il convient aussi de s'assurer lors de l'installation d'une section de mesure que les caractéristiques physiques de la section et du bief associé soient les plus stables possible. Une deuxième limite de la courbe de tarage est le caractère parfois non univoque de la courbe hauteur-débit lors des crues. En effet, lors de la crue et de la décrue, le régime n'est plus permanent et devient transitoire. La courbe hauteur-débit peut donc présenter, entre la crue et la décrue, une hystérésis forte dans les canaux à pente très faible (< 0,5 % ; figure 1A), ou plus faible dans les canaux à pente plus élevée (> 1 % ; figure 1B).

## Les mesures des débits dans les « petits » bassins versants (< 2000 ha ou débit maxi < 3 m<sup>3</sup>/s)

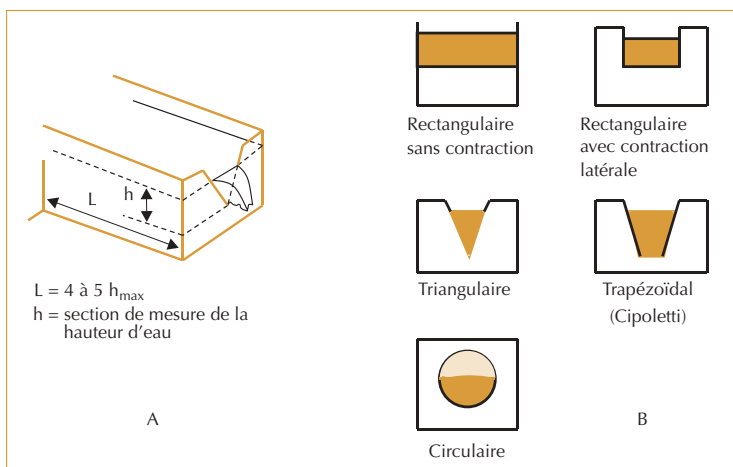
L'exploitation d'une relation stable et connue entre la cote de la surface libre en un point et le débit dans la section.

Dans les petits bassins versants ruraux, il s'agit en général de bloquer l'écoulement de l'eau dans son lit naturel pour forcer l'eau à se déverser en chute libre au-dessus d'une section de contrôle de dimensions connues et non fluctuantes. Ce dispositif modifie le régime d'écoulement en créant une transition entre un régime fluvial à l'amont et un régime torrentiel à l'aval du point de mesure. Une relation bi-univoque sous la forme  $Q = f(h)$  en fonction du type de déversoir est connue de façon théorique et peut être utilisée dans la mesure où les hypothèses dans lesquelles cette relation est obtenue sont satisfaites sur le terrain.

Différentes conditions d'installation et d'utilisation sont précisées dans la norme NF X10-311 1983. L'eau en amont du déversoir doit avoir une vitesse négligeable. Il faut donc en général un bassin de tranquillisation en amont du dispositif pré-étalonné. Aussi, la mesure de la hauteur  $h$  au-dessus du seuil doit se faire à une distance en amont de la structure équivalente à 4 à 5 fois la hauteur maximale (figure 2A). Une autre condition est que le niveau de l'eau en aval du déversoir doit être suffisamment en dessous de la crête pour assurer un déversement libre et pleinement aéré. Le déversement libre est réalisé lorsque l'écoulement est indépendant du niveau aval. On obtient un déversement pleinement aéré lorsque la pression de l'air sur la surface inférieure de la lame déversante est égale à la pression atmosphérique (NF X10-311 1983). Ces conditions ne seront correctement respectées que s'il existe une dénivellation suffisante entre l'amont et l'aval du déversoir.

Un grand nombre de dispositifs fait l'objet de normes internationales dont quelques exemples sont présentés dans la figure 2B (déversoirs à paroi mince : norme NF X 10-311 de 1983) et complétés par une littérature scientifique et technique très abondante dans ce domaine (ex : ouvrages d'hydraulique).

Cette méthode de mesure des débits est très bien adaptée aux bassins versants de quelques centaines d'hectares et est couramment utilisée dans ces conditions. Des déversoirs dits portatifs existent dans le commerce et peuvent être



facilement installés dans les fossés pour lesquels le débit ne dépasse pas 150 l/s. En général, les déversoirs triangulaires (angle de 90° ou 120°) sont utilisés pour mesurer finement les « petits » débits (< 150 l/s). Pour les débits vraiment très faibles (< 1 l/s), les mêmes déversoirs triangulaires à angle très aigu (15-25°) sont parfois utilisés. Les déversoirs rectangulaires sont plus adaptés à des débits compris entre 0,2 et 3 m<sup>3</sup>/s.

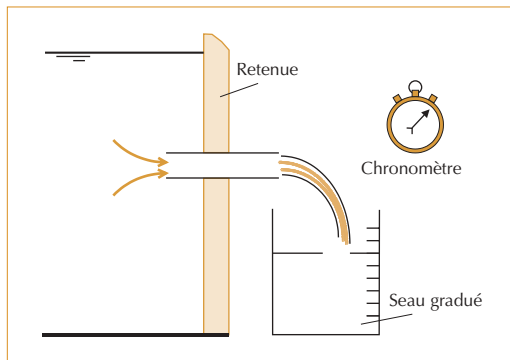
D'autre part, pour des débits supérieurs à 150 l/s, il est bien souvent nécessaire de faire une installation pérenne impliquant des travaux de génie civil. Pour des débits de pointe atteignant plusieurs m<sup>3</sup>/s, l'utilisation des déversoirs devient en général plus difficile car leur taille devient alors prohibitive. De plus, la retenue d'eau en amont peut provoquer des débordements, et le déversement libre en aval du déversoir peut ne plus être respecté. Pour des raisons environnementales, l'utilisation des déversoirs dans des ruisseaux qui jouent un rôle important pour la reproduction piscicole peut devenir problématique (obstacle à la remontée).

### L'EXPLORATION DU CHAMP DES VITESSES DANS UNE SECTION CALBRÉE

Dans les bassins versants où les conditions ne permettent pas la mise en place de déversoirs, par exemple à cause du manque de dénivellation ou à cause des débits de pointe trop importants, la technique de l'exploration du champ des vitesses dans une section calibrée existante ou à construire peut être utilisée. Un aménagement simple, en bois, dans le lit d'un cours d'eau peut être une solution avantageuse (Birgand et Benoist, en prép.). Le débit en régime permanent peut alors être calculé selon l'expression  $Q = V \times S$  ( $V$  : vitesse moyenne dans la section et  $S$  : surface mouillée).

▲ Figure 2 – (A) schéma d'un déversoir triangulaire à paroi mince et (B) principaux types de déversoirs à paroi mince.

► Figure 3 – Schéma de principe d'une mesure de débit par empotement.



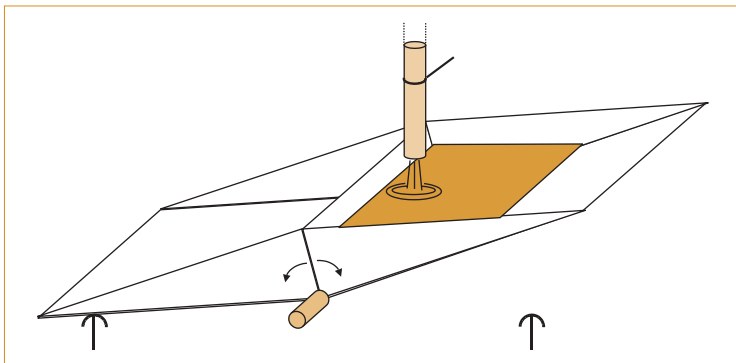
Cette méthode semble être performante mais n'exclut pas pour autant la comparaison, voire l'affinage de cette expression, par un jaugeage. En effet, dans les sections mouillées assez petites, on peut admettre que la vitesse mesurée par le capteur est la vitesse moyenne. Pour les sections plus grandes, il faut établir une relation entre la vitesse locale mesurée par le capteur et la vitesse moyenne sur toute la section mouillée. Cette relation est obtenue en effectuant des jaugeages pour différentes vitesses. Pour les sections calibrées régulières, cette relation est linéaire.

Le grand avantage de cette technique de mesure est qu'elle permet de s'affranchir de la nécessité d'une relation stable entre hauteur et débit quelque soit le régime d'écoulement, comme présenté ci-dessus, ou au contraire de la conforter si elle existe et de l'identifier sans campagne de jaugeage spécifique. La limite de cette technique est que la relation vitesse moyenne-vitesse locale mesurée par le capteur doit être linéaire.

#### Les mesures des très petits débits (< 1 l/s)

La mesure des très faibles débits dans le contexte des bassins versants agricoles peut être considéré comme relativement anecdotique. Toutefois on rappelle ici quelques techniques simples.

▼ Figure 4 – Schéma de principe d'un débitmètre à auget basculeur pour les très faibles débits.



La première est l'utilisation de déversoirs triangulaires à angle très aigu présentés auparavant. La seconde est la technique par empotement qui consiste à chronométrer le temps de remplissage d'un récipient gradué sous une chute d'eau dont on cherche à estimer le débit (figure 3). Cette technique est indifférente aux fluctuations de forme de la section. Elle peut être utilisée comme moyen de jaugeage d'un déversoir par exemple. Elle n'est, en revanche, pas automatisable.

Enfin, la technique de l'auget basculeur couramment utilisée pour la mesure de la pluviométrie peut s'appliquer dans ces conditions de très faibles débits. Le principe est illustré sur la figure 4. Lorsque le premier auget se remplit, il y a déplacement de son centre de gravité jusqu'à basculement par l'intermédiaire du pivot. Il se vide pendant que l'auget opposé, replacé au niveau de l'alimentation d'eau, se remplit à son tour. Les basculements peuvent alors être enregistrés et horodatés automatiquement.

À notre connaissance, ce système n'est pas commercialisé et son utilisation reste ponctuelle, dans les laboratoires de recherche bien souvent.

#### Les éléments de choix des techniques

Pour conclure cette partie, s'il semble évident que pour mesurer les débits dans un collecteur de drainage, dans un fossé ou une rivière, on ne fera pas appel aux mêmes techniques, le choix pour une situation donnée n'est pas unique pour autant et dépend d'un certain nombre de facteurs.

Le premier d'entre eux, est sans doute la gamme des débits à mesurer. La figure 5 propose un récapitulatif des gammes de débit généralement adaptées pour les techniques présentées ci-dessus et qui permet une première discrimination.

Selon les situations, d'autres facteurs rentrent en jeu :

- la pente ou la dénivellation. Dans un cours d'eau à très faible pente, l'emploi d'un déversoir peut être exclu, auquel cas, les techniques de la section calibrée et de la courbe de tarage s'imposeront ;

- l'aspect pérenne ou provisoire de l'installation. L'installation d'un déversoir permet de s'affranchir de l'établissement d'une relation hauteur-débit, mais peut en revanche imposer des travaux de génie civil pour des débits assez importants. La technique de la section calibrée pouvant se réduire à l'installation d'un débitmètre dans une buse existante peut être un compromis intéressant ;

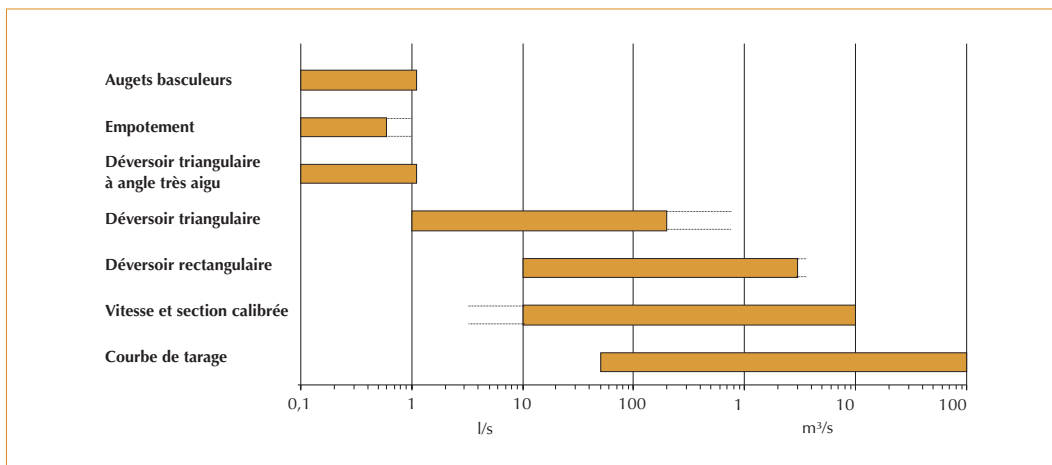


Figure 5 – Gammes de débits et techniques usuelles de mesure associées.

- l’incertitude de mesure. L’utilisation d’un déversoir permet des mesures plus fines en général, même s’il existe sûrement des cas où d’autres techniques peuvent s’avérer intéressantes ;
- le contexte écologique et/ou administratif. Certaines règles écologiques (obstacles à la remontée des poissons dans le cas des déversoirs par exemple) et administratives (aménagement des cours d’eau réglementé) peuvent imposer ou proscrire telle ou telle technique.

### Les techniques de jaugeage

Une littérature scientifique et technique très abondante a été consacrée à ces dispositifs en plus des normes auxquelles nous renvoyons le lecteur. Seront donc rapportés ici les principes schématiques. Le jaugeage consiste à explorer des champs de vitesses locales d’écoulement en différents points à travers une section mouillée afin de déterminer la vitesse moyenne d’écoulement à travers cette section. Un exemple est présenté sur la figure 6. À partir d’une mesure conjointe de la hauteur, le débit Q peut être calculé par intégration. Ainsi est déterminé  $Q = f(h)$  dite courbe de tarage.

### La technique du moulinet

C’est une méthode de référence développée à partir de l’appareil appelé « moulinet » défini par la norme NF ISO 2537 (1989). Il est composé d’une hélice dont la vitesse de rotation est une fonction de la vitesse de l’eau dans son voisinage. Les courbes d’étalonnage sont établies à partir de cet équipement selon différentes normes (NFX 10-301 de 1970 ; NFX 10-305 de 1991).

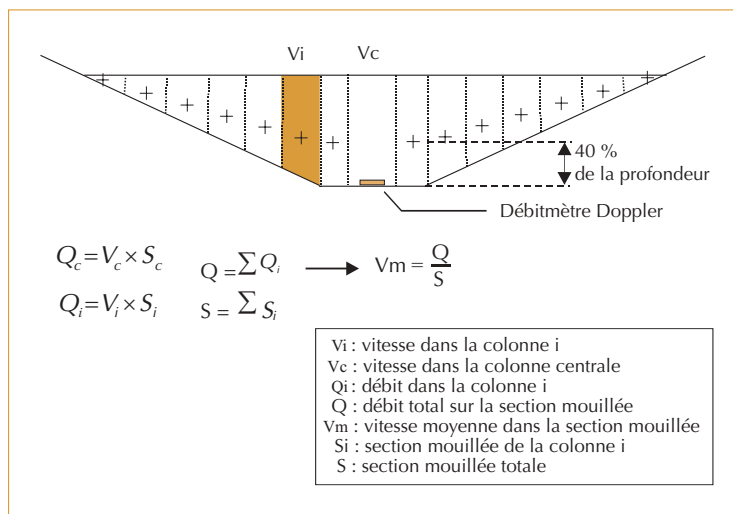
### Le « courantomètre »

La méthode de mesure est similaire à celle du moulinet à partir d’un ensemble de mesures de vitesses ponctuelles au sein d’un écoulement. Les appareils principaux sont le « courantomètre » électromagnétique et le « courantomètre » à effet DOPPLER. Seul le premier est décrit ci-après car le second, de technique similaire à ceux des capteurs de vitesse, sera explicité un peu plus loin.

Le principe du « courantomètre » électromagnétique, basé sur une loi de Faraday est le suivant.

Le déplacement d’un corps conducteur, ici l’eau, (de conductivité > 5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à travers un champ magnétique induit une force électromagnétique proportionnelle à la vitesse du déplacement du corps (l’eau). Bien adapté aux mesures locales de vitesse par l’emploi d’un capteur électromagnétique à électrodes affleurantes (semblable extérieurement

Figure 6 – Schématisation d’une opération de jaugeage en utilisant la technique du point unique. Les vitesses  $V_i$  sont mesurées au moulinet ou courantomètre au point unique situé à 40 % de la profondeur dans chaque colonne imaginaire. On fait l’hypothèse que cette vitesse ponctuelle correspond à la vitesse moyenne sur la colonne i.



aux sondes DOPPLER), des adaptations pour une interprétation d'une vitesse moyenne de la section mouillée impose des travaux de génie civil importants par la pose d'une bobine d'induction située sous l'ensemble de l'écoulement. Cette adaptation est décrite dans la norme NF X 10-336 (1993).

Ces appareils sont considérés comme des appareils d'étalonnage avec une précision de mesure de vitesse locale de l'ordre de 1 %.

### Le traçage

Cette méthode consiste à mesurer un débit à partir d'une mesure de la dilution ou du passage d'un traceur chimique ou radioactif injecté dans l'écoulement étudié. La concentration en traceur est mesurée à l'aval au point d'injection au droit d'une section de mesure située à une distance dite de bon mélange. La méthode complète est décrite dans la norme NF ISO 9555-1 (1994), soit par injection instantanée, soit par injection à débit constant. L'incertitude de mesure sur le débit peut être estimée à moins de 5 %.

### Les capteurs pour la mesure permanente du débit

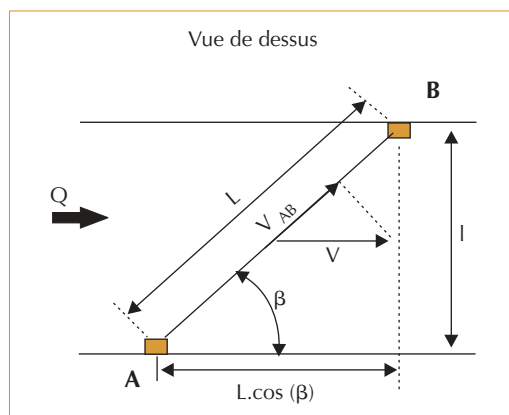
Comme on l'a vu précédemment, le débit peut être mesuré indirectement selon les conditions du site soit par la mesure de la hauteur seule ou par la mesure combinée de la hauteur et de la vitesse moyenne ; cet appareil étant dénommé communément « débitmètre ». Dans les deux cas, le principe de mesure de la hauteur est similaire. Cette partie traitera donc d'une part des capteurs de mesure de vitesse moyenne et des capteurs de mesure de hauteur.

### La mesure de vitesse moyenne

En hydrologie, deux principes émergent : mesure du temps de transit d'ondes ultra sonores et mesure par effet DOPPLER d'ondes ultra sonores. La méthode électromagnétique a été décrite auparavant.

#### LA MESURE DU TEMPS DE TRANSIT D'ONDES ULTRA SONORES

Deux céramiques ultrasonores alternativement émettrices et réceptrices sont installées sur les bords opposés des berges avec un angle  $\beta$  donné par rapport à la direction de l'écoulement selon la figure 7.



▲ Figure 7 – Principe de mesure du temps de transit d'ondes ultra sonores.

Le principe est de mesurer la différence des temps de propagation d'ondes ultra sonores entre celles qui se déplacent dans le sens de l'écoulement et celles dans le sens contraire. Cette méthode est décrite dans les normes NF ISO 6416 (1994) et NF ISO 6418 (1986). La vitesse moyenne est déduite par une fonction de la différence du temps de propagation.

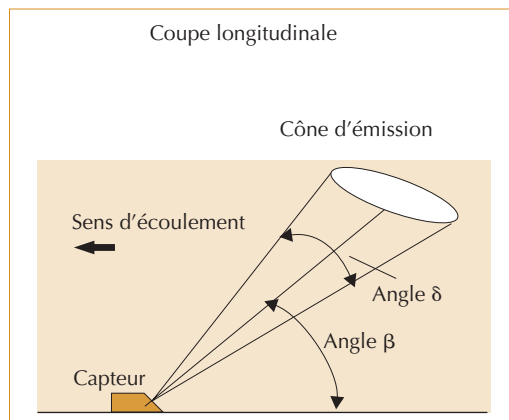
Elle a un intérêt certain pour mesurer la vitesse moyenne dans les cours d'eau d'assez grandes dimensions.

#### LA MESURE PAR EFFET DOPPLER

Le principe de mesure consiste à déterminer la vitesse de l'écoulement à partir du décalage de fréquence produit par l'effet DOPPLER (figure 8).

Schématiquement une onde ultra sonore est émise à partir du capteur à une fréquence N et sous un

▼ Figure 8 – Principe de mesure de la vitesse par effet Doppler.





angle  $\beta$  par rapport à l'écoulement. Celle-ci se propage en formant un cône puis est réfléchi vers le capteur par les particules en suspension avec une fréquence  $N + \Delta N$  ( $\Delta N = 0$  si la vitesse de l'obstacle est égale à zéro). Cette technique admet comme condition fondamentale la présence de particules en suspension ou de bulles d'air se déplaçant à la même vitesse que l'eau.

La difficulté majeure est le traitement du signal qui est très complexe (et le plus souvent bien protégé par son concepteur et donc non connu). Entre autre, l'information brute recueillie par le capteur, sous forme d'un spectre d'énergie, est variable selon le débit, la surface mouillée, le volume exploré, les matières en suspension (concentration, granulométrie, répartition), la température... Cependant ce principe donne globalement satisfaction, aussi, à défaut de norme sur cette technique (un projet de norme est en cours), il convient d'être prudent et attentif à la fiabilité et à la précision du dispositif utilisé.

Dans le cas où le cône de mesure dans un petit cours d'eau couvre bien la section mouillée totale, on pourra confondre la vitesse mesurée avec la vitesse moyenne. Pour des cours d'eau plus larges, il faut nécessairement établir une relation entre la vitesse moyenne et la vitesse mesurée.

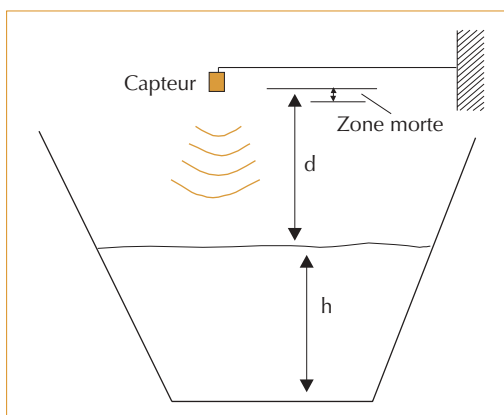
Le volume du cône exploré et la distance maximale de pénétration dépendent de la charge en particules dans l'eau mais aussi des appareils. Certains explorent 50 cm devant l'appareil, alors que d'autres explorent jusqu'à plus de 1 m pour les mêmes conditions de turbidité. Le choix des appareils dépendra donc de la hauteur d'eau maximale escomptée. La technique peut s'appliquer jusqu'à des hauteurs d'eau de 1,5 m. Néanmoins, lorsque la hauteur d'eau dépasse ces valeurs, la mise en place du capteur sous flotteur a été testée avec succès dans le domaine de l'assainissement (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000).

### La mesure des hauteurs d'eau

En hydrologie, un certain nombre de techniques permet la mesure des hauteurs d'eau. Elles peuvent être classées en deux catégories : mesurage du temps de transit d'une onde ou mesurage de la pression.

#### LES CAPTEURS À ULTRASONS

Le principe consiste à mesurer le temps de parcours aller-retour d'une onde qui est réfléchi par l'interface air-eau. Les capteurs peuvent être aériens



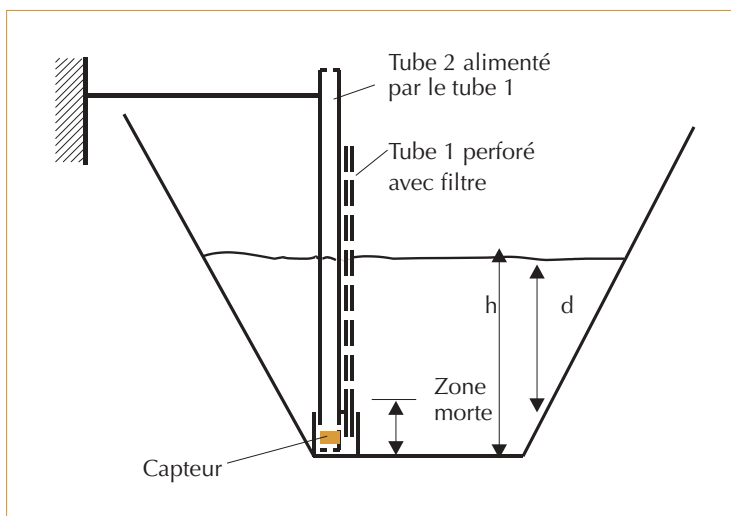
▲ Figure 9 – Capteur de hauteur aérien à ultrasons.

selon la figure 9 (les plus communs) ou immergés selon la figure 10. La distance  $d$  séparant le capteur de la surface de l'eau est directement proportionnelle au temps de transit de l'onde et dépendant de la célérité des ultrasons dans l'air (aériens) ou dans l'eau (immergés).

**Les capteurs aériens à ultrasons**, très faciles à poser, ne gênant pas l'écoulement, sont très sensibles aux éléments suivants :

- écume, corps flottant à la surface de l'eau ;
- turbulence de l'air et du vent ;
- température de l'air (en général compensée) et surtout au gradient de température le long du parcours jusqu'à la surface de l'eau.

▼ Figure 10 – Capteur à ultrasons immergé.



C'est pourquoi l'apparente simplicité d'installation peut poser des problèmes de fiabilité de mesure à l'air libre en milieu ouvert. Ceci peut être néanmoins amélioré en isolant l'eau dans un tuyau vertical et en installant le capteur au sommet de ce tuyau.

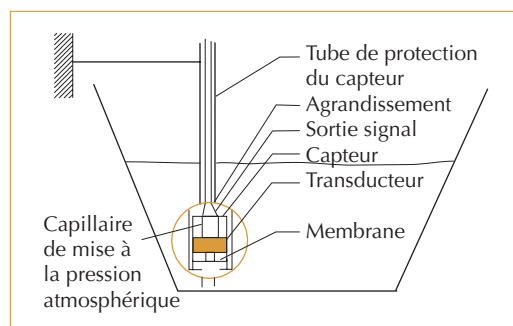
**Les capteurs à ultrasons immergés** (figure 10, p. 57) demandent une installation plus compliquée car il faut les protéger des dépôts et même du transport solide qui perturbent l'émission des ondes. En outre, cette installation peut gêner l'écoulement. Le gros avantage est le fonctionnement dans un environnement relativement stable en température (compensée) et surtout un faible gradient de température le long du parcours dans l'eau.

La sensibilité à la variation des sels dissous dans l'eau qui a une influence sur la valeur de la célérité des ultrasons et donc des erreurs de mesure, ne devrait pas être préjudiciable à une utilisation de ces capteurs dans le domaine de l'hydrologie agricole. Le développement de ces capteurs dans le milieu des années 80 semble actuellement s'estomper quelque peu.

#### LES CAPTEURS DE PRESSION HYDROSTATIQUE

Le principe, présenté dans la figure 11, est la mesure de la pression hydrostatique d'une colonne d'eau au moyen d'un capteur de pression immergé. Le capteur comprend une membrane souple qui subit une déformation mécanique variable en fonction de l'effet du poids de l'eau qui la surplombe, la partie opposée de la membrane étant mise à la pression atmosphérique par l'intermédiaire d'un capillaire. C'est le système de transformation de cette déformation mécanique en un signal électrique appelé transducteur qui différencie l'appellation des types de capteurs de pression dont la liste principale est la suivante : piézo-résistifs à jauge extensométrique (jauges de contrainte métallique ou semi-conducteur) ; inductif (tend à disparaître) ; magnétique ; capacitifs ; piézo-électriques-résistif, etc.

► Figure 11 –  
Capteur de pression  
immergeable.



Dans les domaines hydrologie agricole/assainissement, les capteurs les plus usuels sont de type piézo-résistif à jauges métallique ou céramique (développement plus récent), ou capacitif (très grande étendue de mesure mais très volumineux). Bien adapté en hydrologie agricole, ce capteur de pression demande une installation convenable et peut gêner l'écoulement. Les sources d'incertitudes se limitent principalement à la variation de pression entre la surface de l'eau et le point de prise de pression atmosphérique (0,0012 m/m).

Le point le plus sensible est l'influence de la pression dynamique sur la mesure de pression statique donc de la hauteur. Il convient alors de protéger le capteur de cette influence par un puits de tranquillisation ou par un carénage. Il convient de signaler que ce capteur immergé dans l'eau avec son circuit électrique peut être sensible à la foudre ; plusieurs installations ont été détruites de cette manière.

Le défaut majeur qu'il lui était attribué dans les années 70/80 était sa dérive dans le temps (liée à l'aspect mécanique de la membrane : fatigue). Outre le fait que ces produits ont subi des améliorations, la notion de dérive existe bel et bien. Cependant en métrologie, on doit raisonner en terme d'erreur de mesure globale, régulièrement déterminée à partir de vérification ou d'étalonnage, et ce quel que soit le type de mesure et de capteur. La dérive quand elle existe, peut alors être associée à l'incertitude de mesure.

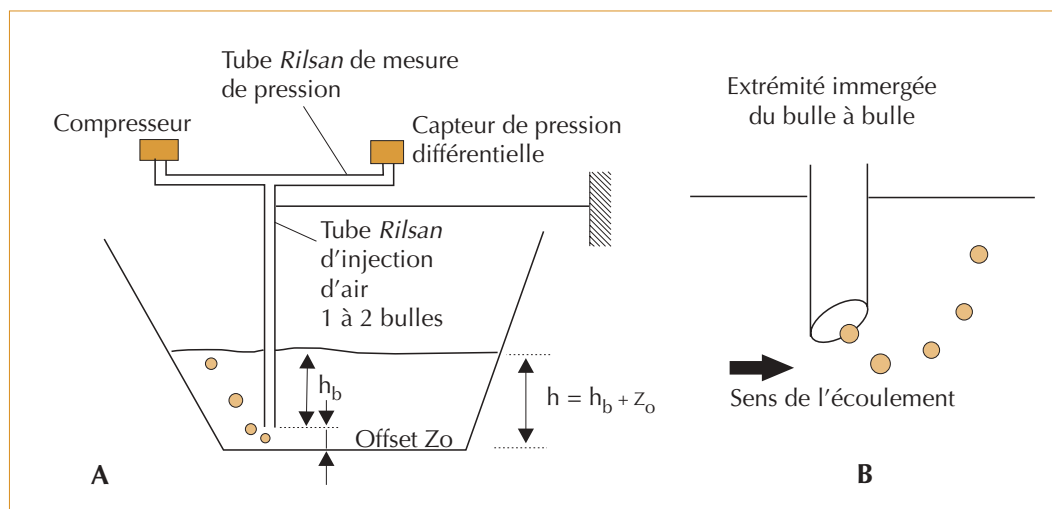
Ce n'est qu'à partir de là que l'on peut comparer les performances à 6 mois, à 1 an (périodicité communément admise en terme de vérification/étalonnage) d'un instrument à un autre, en faisant la somme des erreurs pour chacun d'eux (linéarité, reproductibilité, hystérésis, résolution, dérive...). Dans ce domaine, le fascicule de documentation FD X 07-021 donne de précieuses indications.

Pour revenir au capteur de pression, la dérive deviendrait préjudiciable à la mesure si elle s'accompagnait d'un défaut de linéarité et de sensibilité, ce qui n'est en général pas le cas. Aussi une dérive, certes réduite, ne remet pas en cause les mesures si le capteur de pression est régulièrement recalé (communément intitulé calage du zéro de périodicité minimale 6 mois-1 an).

#### LES CAPTEURS DE PRESSION BULLE À BULLE

Le principe, schématisé dans la figure 12, consiste à envoyer un débit d'air, au moyen d'un compresseur, dans un tube immergé dont l'extrémité doit





◀ Figure 12 – (A) schéma de principe du capteur bulle à bulle et (B) positionnement de l'extrémité du tube bulle à bulle par rapport à l'écoulement (d'après Bertrand-Krajewski et al., 2000).

être placée à une cote fixe et constante, d'une pression telle qu'elle puisse vaincre la pression exercée par la colonne d'eau. La pression résultant de la hauteur d'eau correspond au moment où les premières bulles s'échappent de la partie inférieure du tube (quelques bulles/s). C'est cette pression nécessaire qui est mesurée par un capteur de pression (non immergeable) de principe similaire à ceux indiqués auparavant.

D'installation aisée (seul le tube de prise de pression est immergé), les inconvénients majeurs sont :

- la vitesse de poursuite. En effet un délai minimum est nécessaire pour que la pression de l'air soit en équilibre avec la colonne d'eau. Selon que l'on est en montée (crue) ou en descente (décrue), il y a sous-estimation ou surestimation de hauteur, donc du débit temporaire. Cet aspect est minimisé en augmentant le nombre de bulles/s ;
- la vitesse d'écoulement. Pour des hauteurs faibles (moins de 5 cm) et des vitesses fortes (plus de 0,8 m/s), un phénomène d'aspiration de bulles, par effet Venturi, peut se produire et fausse les résultats de mesures (Laveuf et Phillipe, 1982) ;
- l'incertitude liée au capteur de pression. Il y a lieu d'ajouter les pertes de charges dans le tube.

Cette technique largement employée dans les années 80 tend à se réduire pour des motifs de manque de fiabilité, probablement due à l'addition des facteurs de risque par rapport au capteur immergé : compresseur, risque de fuite aux divers branchements du tube alors que cette technique est plus ancienne que celle des capteurs immergeables.

#### LES AUTRES TYPES DE CAPTEURS DE MESURE DE HAUTEUR D'EAU

##### Mesure par un réglé électronique immergé

Ce type de capteur (de développement récent) se présente sous la forme d'une règle équipée de nombreuses cellules de mesure de conductivité. Un signal électrique est émis à travers l'eau tout le long du réglé. Le niveau d'eau est déterminé par la position du point de discontinuité entre la conductivité de l'eau et celle de l'air.

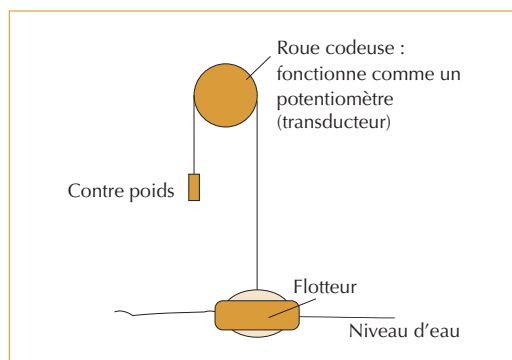
Si l'inconvénient majeur est la gêne dans l'écoulement, son principe est simple, précis et robuste. D'un coût élevé, il paraît cependant très bien adapté aux conditions de l'hydraulique agricole bien qu'à notre connaissance, cet instrument ne soit pas autonome (avec une sortie analogique ou numérique standardisée par exemple), et n'est vendu qu'avec son propre traitement du signal associé à son enregistreur intégré. Capteur très robuste par rapport aux eaux chargées, il est aussi sensible à la foudre.

##### Mesure par un codeur limnimétrique à flotteur

Autonome ou associé à un limnigraphe à flotteur existant, celui-ci transmet son mouvement en fonction des variations de hauteur d'eau sur une roue d'un codeur (par un système mécanique poulie/câble) dont le principe fonctionne comme un potentiomètre (figure 13, p. 60). Distribué avec une sortie analogique (du potentiomètre), numérique RS 232<sup>2</sup> ou associé à son propre enregistreur intégré, il est mécaniquement fiable et robuste. Son aspect imposant associé à une installation uniquement dans un puits peut gêner l'écoulement.

2. RS 232 : connecteur standard d'interface série des ports de communication COM des ordinateurs.

► Figure 13 – Principe d'un codeur limnimétrique à flotteur.



### Mesure par capteur radar

Initialement adapté pour le milieu industriel dans des conditions difficiles (hautes températures et pression, couche gazeuse variée...), le principe est identique à celui des capteurs ultrasons aériens (avec des ondes de fréquence beaucoup plus élevée). Aux avantages des capteurs ultrasons s'ajoute la quasi-insensibilité aux variations et gradients de température. Ses qualités métrologiques associées à la simplicité d'installation en font un appareil performant. Reste qu'il est encore d'un coût élevé et plus adapté pour les hauteurs d'eau importantes (plusieurs dizaines de mètres avec une résolution de mesure de l'ordre du cm) ; son utilisation ne concerne donc pas actuellement les mesures hydrologiques agricoles.

### La mesure combinée de la hauteur et de la vitesse moyenne

Sur le marché, on trouve essentiellement une mesure de la vitesse par effet DOPPLER associée à une mesure de hauteur par le principe du bulle à bulle, par une sonde de pression immergeable ou par un capteur à ultrasons aérien.

### L'acquisition des mesures

Il n'y a pas, dans l'acquisition de mesure, de spécificité à l'hydrologie agricole. Cependant, il nous semble important de rappeler que les moyens d'acquisition de la mesure devront être adaptés à la capacité de mesure des capteurs (précision, étendue de mesure...) présentée ci-dessus. Aussi pour des agents de terrain, non forcément spécialistes de l'acquisition de la mesure, des éléments basiques de compréhension du cheminement des informations de la prise de mesure à la lecture sur un ordinateur, sont nécessaires pour éviter des associations incohérentes.

Ce cheminement des informations nécessite un ensemble d'équipement, appelé chaîne de mesure. L'objectif doit être l'obtention de données finales exploitables par un ordinateur qui ne peuvent être que des valeurs discrètes (format binaire).

### Les moyens de mesure

Déjà évoquée plus haut, la mesure, autre qu'une lecture visuelle, est généralement issue d'un instrument de mesure approprié qui doit être capable d'émettre ou de délivrer un signal significatif du milieu et de son évolution. Un premier signal (électrique ou non) est émis par un transducteur. Celui-ci est transformé par un conditionneur (en général électronique) en une grandeur électrique (tension, courant, fréquence, résistance, capacité...). Cette grandeur électrique est convertie par un transmetteur en un signal standardisé dit :

- sortie analogique. C'est un signal électrique normalisé continu émis par un instrument de mesure, et qui est du type tension (0-1 V ; 0-2 V ; 0-5 V...) ou courant (4-20 mA), et représente linéairement l'étendue de mesure de la grandeur physique à mesurer par rapport à cette échelle analogique. Ces instruments sont communément appelés capteurs-transmetteur ;
- sortie numérique. L'instrument de mesure délivre directement numériquement la valeur en codage binaire (discrète) par un convertisseur analogique/numérique de la grandeur physique mesurée.

### Les moyens d'acquisition

Différents systèmes de liaison entre la sortie analogique ou numérique délivrée par un instrument de mesure existent (l'ordinateur peut être utilisé en tant qu'outil d'acquisition, à l'aide d'une carte d'acquisition incorporée, par exemple). Le moyen le plus usuel dans l'acquisition de données pour l'hydrologie agricole, est l'utilisation d'une interface. L'interface la plus commune est la sortie RS232. En amont de cette sortie, les données devront être formatées sous forme numérique pour être transmises ensuite à un ordinateur par le port série.

L'équipement terrain comprend donc un ensemble d'éléments dont les extrémités sont le ou les capteurs et la sortie RS232. L'élément intermédiaire est communément intitulé centrale d'acquisition et d'enregistrement des mesures dont le composant essentiel est le convertisseur analogique/numérique.

Les équipements de mesure qui délivrent directement un signal numérique et complétés d'une sortie type RS 232 sont en plein développement. Pour les données terrains, ces équipements ne formant qu'un seul outil compact et indissociable (sonde multiparamètre, par exemple), comprennent leur propre module d'acquisition et d'enregistrement. Aussi les divers cheminements de l'information deviennent transparents vis-à-vis de l'utilisateur et ne seront pas développés.

## La centrale d'acquisition

### PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

La première fonction d'une centrale d'acquisition est la lecture du signal analogique d'un capteur-transmetteur, telle un voltmètre, que l'on appelle aussi voie de mesure. Aussi, cette lecture peut être directe si le capteur est prévu pour délivrer un signal tension, ou indirecte si le capteur est prévu pour délivrer un signal courant (4-20 mA en général). Dans cette dernière configuration de capteur, il faut ajouter aux bornes de la lecture, une résistance R appropriée telle que  $R = U/I$ .

La seconde fonction essentielle est la conversion de la lecture du signal analogique (valeur continue) en une donnée numérique (valeur discrète) par un convertisseur analogique/numérique. Le convertisseur est défini en nombre de bits. Par exemple une conversion sur 8 bits permet de disposer de  $2^8$  valeurs discrètes soit 256. À l'incertitude de mesure liée au capteur s'ajoute une erreur complémentaire appelée erreur de résolution R du convertisseur (centrale) définie comme suit :

$$R = EM/(2^n - 1) \quad (1)$$

avec : EM = étendue de mesure  
n = nombre de bits

Par exemple, soit un capteur d'une EM de 0-2000 mm et d'une incertitude de mesure globale de 0,2 % du maximum de l'étendue de mesure, l'incertitude globale ( $\Delta EM$ ) pour toute mesure est de  $0,2/100 \times 2\ 000$ , soit de  $\pm 4$  mm. L'erreur de résolution complémentaire due à un convertisseur 8 bits (selon (1)) est de  $2\ 000/255$  soit 7,8 mm ; pour un convertisseur 12 bits, elle serait de  $2\ 000/4\ 095$  soit environ 0,5 mm.

Le choix du convertisseur doit donc rester cohérent avec l'incertitude globale du capteur avant cette conversion et s'établit généralement selon la règle suivante : nombre de valeurs discrètes minimum nécessaires  $N > 5 \times EM/\Delta EM$ .

En reprenant l'exemple précédent, le calcul indique  $N > 2\ 500$ . Un convertisseur de 11 bits est trop faible ( $2^{11} = 2\ 048$ ) donc le choix approprié est un convertisseur 12 bits ( $2^{12} = 4\ 096$ ). Naturellement ce choix influe sur le coût du système d'acquisition.

Une centrale d'acquisition est caractérisée aussi par le nombre de voies de mesure correspondant au nombre de capteurs qu'il est possible de relier simultanément. Elle peut aussi être munie de voies spécifiques (voie de comptage pour les pluviomètres à augets basculeurs par exemple). Elle est complétée d'un système d'enregistrement (avec affichage éventuel des données) et d'une sortie type RS232. Par ailleurs, dans la présentation du système (influençant le mode d'utilisation), trois grands cas de figures sont rencontrés :

- des fournisseurs de centrale (donc modulaire) et des fournisseurs de capteurs avec leur sortie analogique standardisée ;
- des fournisseurs de centrale, à l'origine, mais qui développent des types de capteurs particuliers ;
- des fournisseurs de capteurs qui développent des systèmes d'enregistrement jusqu'à des systèmes complètement intégrés.

Dans les deux derniers cas, un premier assemblage est déjà pré-préparé par le fournisseur du système avec différentes options standardisées possibles.

### LES STRATÉGIES D'ÉCHANTILLONNAGE

Pour des raisons d'encombrement de la mémoire (point faible des centrales autonomes), toutes les données converties ne sont pas stockées. Les centrales disposent d'algorithmes plus ou moins complexes relatifs à la cadence de scrutation du capteur avec en option des choix en fonction d'événement particulier (augmentation ou diminution de la cadence). D'autres stratégies d'acquisition plus ou moins complexes sont possibles, le tout étant naturellement d'aboutir à un nombre fini d'enregistrements horodatés.

### LES AUTRES CONSIDÉRATIONS POUR L'ACQUISITION DES DONNÉES

Le signal numérique est un signal assez indifférent à l'environnement (électromagnétique notamment), alors que les signaux analogiques sont sensibles notamment en fonction de la longueur du câblage. Pour réduire ce risque, une sortie analogique d'échelle 4-20 mA est préférable. Le développement des systèmes intégrés qui permettent de traiter au plus près les signaux analogiques en signaux numériques, constitue une étape décisive dans ce domaine.

Au niveau des centrales d'acquisition, on trouve sur le marché des centrales simplement paramétrables (système fermé), généralement dédiées à des domaines d'utilisation (hydrologie-météorologie...) ayant quelques fonctions de pilotage encadrées (sous forme de seuil). On trouve aussi des centrales paramétrables complétées d'une fonction automate (avec un langage de programmation intégré) permettant de construire son propre process, indépendamment de l'ordinateur. Enfin, il existe aussi des centrales entièrement programmables via un ordinateur (sous langage informatique type C...). Si elles permettent une automatisation complète d'un process, certaines exigent une liaison permanente avec l'ordinateur, qui ne les rend guère adaptées pour le terrain.

### Conclusion

Nous avons décrit succinctement un certain nombre de dispositifs permettant *in fine* de mesurer un débit dans un bassin versant. Si ici ou là des avantages et inconvénients ont été formulés, ils ne permettent en aucun cas l'exclusion de tel ou tel instrument de mesure, *a priori*. Le choix d'un dispositif (instrument et technique de mesure) doit relever

d'une réflexion préalable où il est admis que c'est une tâche qui peut parfois être complexe et cela en fonction de l'objectif poursuivi (ou souhaité) et de la situation existante. Cela ne peut aboutir qu'à un compromis entre étendue de mesure/incertitude/coût/fiabilité/maintenance, tout particulièrement lorsque qu'une automatisation est envisagée — ce qui n'est pas toujours nécessaire. C'est probablement sur l'aspect de la détermination de l'incertitude de mesure d'un dispositif que des marges de progrès importantes sont encore à réaliser dans le domaine de l'hydraulique des bassins versants.

Dans le domaine de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement, quelle que soit la technique employée, il est admis qu'il est illusoire d'espérer obtenir une précision sur le débit bien inférieure à 15 % (Bertrand-Krajewski *et al.*, 2000). Une incertitude globale de mesure sur le débit de 15 à 20 % est jugée acceptable. À titre de comparaison, avec un dispositif pré-étalonné (type déversoir), l'incertitude globale de mesure sur le débit est de l'ordre de 5 à 10 % selon le type de dispositifs. Il n'y a pas de raison pour que ces valeurs soient sensiblement différentes dans le domaine de l'hydrologie agricole. □

### Résumé

De multiples travaux de recherche et de suivi de la qualité de l'eau impliquent bien souvent la mesure des flux de nutriments dans les bassins versants agricoles. La mesure des débits étant un préalable essentiel à la mesure des flux, nous proposons un inventaire et une analyse des dispositifs de mesure de débit dans le domaine de l'hydrologie agricole. Dans une première partie, nous présentons les principales techniques de mesures des débits : utilisation des déversoirs, des courbes de tarage et exploration du champ des vitesses dans des sections calibrées. Une analyse de leur emploi en fonction des contextes et situations est aussi fournie. Un rappel sur les techniques de jaugeage est proposé en deuxième partie. Les instruments de mesure de vitesse et de hauteur couramment employés sont ensuite inventoriés. La dernière partie rappelle les bases de l'acquisition des données qui permettent l'adéquation des équipements d'acquisition de mesure en fonction des instruments utilisés.

### Abstract

Water quality research and monitoring works often involve nutrient flux measurements within agricultural watersheds. Flow rate measurements being essential for nutrient flux calculations, we propose an inventory and an analysis of flow measurement devices commonly used in hydrology. In the first part, we present the main techniques for flow measurements: use of weirs, use of stage-discharge curves and velocity-area methods in a calibrated section. An analysis of their use for different situations is given. Main stream gauging techniques are proposed as a reminder in the second part. Water velocity and elevation measurement devices commonly used are described in the following part. In conclusion, we recall the bases of data recording and the need for coherence between recording and measuring devices

## Bibliographie

BERTRAND-KRAJEWSKI, J.-L., LAPLACE, D., JOANNIS, C., CHEBBO, G., 2000, *Mesures en hydrologie urbaine et assainissement*, Éditions Tec & Doc, 794 p., ISBN 2 7430 0380 4.

BIRGAND, F., BENOIST, J.-C., 2003, *Mesure des débits par exploration du champ des vitesses. Exemple dans une section calibrée en bois*, Ingénieries EAT, en préparation.

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

FD X07-021, 1999, Normes fondamentales – Métrologie et applications de la statistique – Aide à la démarche pour l'estimation et l'utilisation de l'incertitude des mesures et des résultats d'essais, Paris (France), AFNOR, octobre 1999, 58 p.

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

LAVEUF, L., PHILIPPE J.-P., 1982, *Mesure des hauteurs d'eau par la méthode du bullage : limites de la méthode en écoulement rapide et recherche de solutions*, Trappes (France), Laboratoire régional de l'Ouest parisien, rapport GSC08 – FAER 1.08.06.0, avril 1982.

NF ISO 2537, 1989, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Moulinet à éléments rotatifs, Paris (France), AFNOR, janvier 1989, 7 p.

NF ISO 6416, 1993, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Mesure du débit à l'aide de la méthode ultrasonique (acoustique), Paris (France), AFNOR, novembre 1993, 31 p.

NF ISO 6418, 1986, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Compteurs ultrasoniques (acoustiques) de vitesse, Paris (France), AFNOR, novembre 1986, 13 p.

NF ISO 9555-1, 1994, Mesure de débit des liquides dans les canaux découverts – Méthodes de dilution en régime permanent utilisant des traceurs – Partie 1 : généralités, Paris (France), AFNOR, décembre 1994, 53 p.

NF X 10-301, 1970, Mesure de débit de l'eau dans les chenaux – Méthode d'exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets à hélice, Paris (France), AFNOR, octobre 1970, 31 p.

NF X 10-305, 1991, Mesure de débit de l'eau dans les canaux découverts – Méthode d'exploration du champ des vitesses utilisant un nombre réduit de verticales. Paris (France) : AFNOR, juin 1991, 5 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.

NF X 10-336, 1993, Mesurage du débit total dans les canaux découverts – Méthode électromagnétique à l'aide d'une bobine d'induction couvrant toute la largeur du chenal. d'exploration, Paris (France), AFNOR, novembre 1993, 18 p.

VITOUSEK, P.-M., ABER J.-D., HOWARTH R.-W., LIKENS G.-E., MATSON P.-A., SCHINDLER 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.