

Limnimétrie : connaissance des techniques, utilisation et expérimentation des appareils *Water level measurements in rivers and in sewers*

A. Guillon	Ingénieur hydrologue, Service départemental d'assainissement de la Seine-Saint-Denis
M. Audinet	Ingénieur chargé d'étude EDF — DTG
J.M. Bouye	Ingénieur électronicien — CEMAGREF
E. Colin	Adjoint au Chef de service — SRAE Lorraine
J. De Saint Seine	Ingénieur hydraulicien — CETE d'Aix
J.P. Hocq	Ingénieur, Service départemental d'assainissement des Hauts de Seine
B. Moine	Ingénieur des travaux — SRAE Champagne-Ardennes

Après un descriptif technique de chaque type d'appareils utilisés pour la mesure de hauteur d'eau en rivière et en réseau d'assainissement, cette communication présente un bilan de l'utilisation des différents limnimètres (à flotteur, « bulle à bulle », piézorésistif, à ultra-son etc.) en exposant les principaux problèmes et solutions apportés à tous les niveaux de la chaîne de mesure.

Une brève description d'expérimentation réalisée sur plusieurs limnimètres est présentée, suivie d'un aperçu des perspectives dans ce domaine.

This report deals with a technical evaluation of water level sensors used for river or sewer measurements (bubble gages, float gages, ultrasonic sensors, piezo-electrical sensors).

After a short overview of all the constraints and limitations through every step of the data collecting and processing tasks, some results from on-site experimentation are discussed.

Finally, an approach of feasible improvements is intended to define complementary trends.

La mesure de hauteur d'eau est de plus en plus utilisée dans les différents domaines de l'hydrologie et de l'hydraulique : pour la gestion des rivières et des réseaux

d'assainissement, pour le suivi des nappes, pour l'irrigation et le drainage etc. le niveau mesuré étant utilisé soit directement, soit pour un calcul de débit.

1. Différentes utilisations de la mesure de hauteur d'eau

1.1. Mesure des niveaux en rivière [1]

1.1.1. Généralités

Suivant le climat d'un pays ou son degré d'équipement, le contrôle des débits des cours d'eau est de première nécessité pour l'agriculture, pour l'industrie, pour l'alimentation en eau potable ou pour la production d'énergie hydroélectrique.

Pour déterminer les débits des cours d'eau, les hydrologues en sont encore tout d'abord amenés à mesurer et à enregistrer les variations du niveau des eaux.

Ce suivi peut être utilisé en temps réel ou peu différé pour une exploitation immédiate, ou en temps différé pour constituer une banque de données.

1.1.2. Utilisation en temps réel ou peu différé :

- par les Services d'annonce des crues, pour déterminer les risques de submersion. Les dispositifs de mesure doivent alors être particulièrement fiables en hautes eaux;
- par les Services de production hydroélectrique (EDF) pour la gestion optimale des apports aux aménagements, pour la prévision des crues (sécurité des ouvrages) et le contrôle des restitutions (pêche, salubrité...);
- par les Services agricoles pour la gestion des ouvrages de soutien d'étiage;
- par les Services de l'Environnement pour le suivi de la qualité des eaux, le débit permettant de déterminer la charge totale du produit dont on a mesuré la concentration.

1.1.3. Utilisation en temps différé

L'archivage, après validation et création de banques de données, permet les études hydrologiques concernant :

- l'aménagement des cours d'eau,
- la fréquence des crues, des étiages,
- les prévisions d'apports, de crue ou d'étiage.

1.1.4. Le choix du capteur et de la chaîne de saisie des mesures [2]

Il dépendra du site d'implantation et du but recherché. Pour une station de jaugeage sur un cours d'eau, les critères de choix du capteur sont principalement :

- l'amplitude de la mesure est déterminée par reconnaissance sur le terrain. Sa valeur maximale est, en général, inférieure à 10 mètres;
- la sensibilité doit être inférieure au centimètre pour obtenir une précision de l'ordre du centimètre;
- la vitesse de poursuite devra être adaptée au régime hydrologique du cours d'eau. Elle peut varier de quelques décimètres par heure pour des rivières de plaine à quelques mètres par heure pour des torrents de montagne et des rivières à crue subite (type méditerranéen) ou influencées par des apports de zones urbaines;
- la fréquence de mesure (échantillonnage) sera adaptée à la variation du niveau pour bien représenter l'évolution du débit;

— la résistance à l'agressivité chimique de l'eau n'est pas un facteur important en rivière (sinon c'est un égout); on s'intéressera plutôt à la résistance aux chocs (transports solides) ou à l'abrasion par des sédiments fins (eaux glaciaires);

— les contraintes de mise en place et d'environnement climatique (température, humidité...) sont des éléments importants dans le choix du type de capteur. Par exemple le coût d'une station de jaugeage avec puits en terrain difficile peut faire préférer une solution moins simple techniquement comme le capteur de pression.

Par ailleurs, pour obtenir des informations continues et au moindre coût, on s'intéressera à la fiabilité et la simplicité du système pour diminuer la fréquence des interventions.

Enfin, le gestionnaire d'un réseau de mesure recherchera une standardisation de son matériel pour faciliter la formation des techniciens, la maintenance et le dépannage sur le site : des ensembles modulaires permettent maintenant le choix d'un capteur de niveau bien adapté au site et un système d'enregistrement ou de transmission standard.

1.2. Mesure des niveaux en réseau d'assainissement [3], [4], [5]

1.2.1. Généralités

L'ampleur des investissements consacrés à l'assainissement en zone urbaine incite à l'étude du fonctionnement des réseaux d'assainissement, afin de rationaliser au maximum les nouveaux investissements et l'exploitation des réseaux existants.

Si la connaissance approfondie d'un réseau commence par sa description « géométrique » (emplacement et dimension des ouvrages), la connaissance de son fonctionnement nécessite la réalisation de mesures de niveau d'eau et, quand cela est possible, de débit.

1.2.2. Utilisation en temps différé

Les études de diagnostic et d'analyse d'événements particuliers permettent de repérer les problèmes de fonctionnement d'un réseau : mauvais branchements, infiltrations, mauvais dimensionnements d'ouvrage (collecteur, déversoir d'orage...), les arrivées d'eaux parasites (eaux claires en réseau d'eaux usées, rejets industriels toxiques, etc.). Ces études sont basées sur la réalisation de mesures de pluie, de niveaux (de débit) et de qualité d'eau. Les mesures de niveaux peuvent également être utilisées, lors d'événements particuliers ayant provoqué des désordres, pour repérer précisément les zones et les durées de débordements et de mises en charge dangereuses.

1.2.3. Utilisation en temps réel

En réseaux d'assainissement, les mesures de hauteur d'eau peuvent être utilisées en temps réel, le plus souvent pour la gestion locale de certains ouvrages, principalement les stations de relèvement et les stations de crue (relèvement et vanne d'isolation) mais également pour la gestion des bassins de retenue (régulation du débit de sortie et/ou régulation de plan d'eau), de déversoirs d'orage (vanne seuil, siphon, barrage gonflable) etc.

Dans certains cas, une gestion centralisée en temps réel est possible :

- par temps sec : pour la répartition des apports à différentes stations de traitement et pour le contrôle des fuites au milieu naturel;
- par temps de pluie : lorsque l'on dispose sur le réseau, d'ouvrages de stockage et/ou de répartition des eaux, pour gérer ces ouvrages en fonction de l'événement présent (en particulier lorsqu'un orage n'affecte pas toute la surface du bassin versant concerné).

1.2.4. Choix du capteur et de la chaîne de saisie des mesures

Le choix de l'appareil dépend en premier lieu de l'objectif de la mesure.

- l'amplitude de la mesure pourra être très faible (quelques dizaines de centimètres) pour de petits réseaux d'eaux usées et jusqu'à dix mètres pour des réseaux pluviaux profonds;
- la précision recherchée peut également être très variable : de l'ordre du centimètre pour les faibles amplitudes et pour des utilisations précises comme la gestion en temps réel; par contre, pour certaines études et des amplitudes importantes, on pourra parfois se contenter de la dizaine de centimètres;
- la vitesse de poursuite devra être assez rapide (jusqu'à 1 m/mn) pour pouvoir mesurer les phénomènes particuliers comme les mises en charge pouvant entraîner des coups de bélier ou des dégrillages automatiques entraînant des baisses subites du niveau de l'eau;
- la fréquence d'auscultation dépend de l'objectif de la mesure : par temps sec, la période entre deux mesures peut être de quelques heures; par contre, pour bien mesurer une crue, un pas de temps de l'ordre de 1 à 10 mn est nécessaire;
- le capteur doit pouvoir supporter la mauvaise qualité de l'eau (agressivité chimique etc.) et résister aux chocs;
- l'emplacement du capteur est également très important. En effet, l'implantation est très différente entre un collecteur fermé, un bassin de retenue ou un collecteur à ciel ouvert. De plus, la possibilité ou non de disposer sur place et facilement de l'énergie électrique peut déterminer le choix de l'emplacement. D'autre part, en zone urbaine, certaines perturbations (appel de borne taxi, passage de camion, radio, etc.) peuvent interférer sur des appareils de mesure à composants électroniques.

1.3. La mesure de niveau en milieu rural

Le développement du drainage et de l'assainissement nécessite l'acquisition de références opérationnelles : en particulier, l'installation de réseaux expérimentaux avec limnimètres pour les suivis piézométriques et débitométriques. La mesure de niveau est également utilisée à un degré moindre pour le suivi du comportement des barrages et des digues à usage agricole ainsi que pour les réseaux et systèmes d'irrigation.

En matière de gestion et protection des ressources en eaux, la limnimétrie intéresse en particulier l'aménagement et les suivis des bassins versants, le suivi et l'étude des nappes souterraines, les études d'aménagement des cours d'eau torrentiels et de protection contre l'érosion, les suivis

de qualité des eaux.

Certaines activités de production ont recours aux mesures de hauteur d'eau : l'aménagement du littoral en vue du développement de la production d'animaux marins, les expérimentations en aquaculture et la pisciculture.

La diversité des secteurs intéressés se traduit par des conditions de mesure très disparates :

- les débattements maximaux sont compris entre quelques dizaines de centimètres et plus d'une dizaine de mètres;
- les régimes d'écoulements sont très différents (de l'eau stagnante au régime torrentiel);
- les charges de matière en suspension sont très variables (de l'argile au galet);
- les conditions d'accès aux plans d'eau sont très diverses.

Les seuls points communs sont les sévères contraintes d'environnement auxquelles les équipements sont soumis : intempéries, températures extrêmes, nécessité d'autonomie énergétique, risques de vandalisme.

2. Les appareils de mesure

Malgré la diversité des techniques de mesure de hauteur d'eau, la plupart des appareils existants repose sur l'un des trois grands principes de mesure :

- la mesure directe du niveau d'eau, soit par l'œil, soit par l'intermédiaire d'un système suivant l'évolution de la surface de l'eau;
- la mesure du temps de parcours d'un signal transmis d'un point de référence fixe jusqu'au plan d'eau;
- la mesure de pression.

2.1. La mesure directe de la hauteur [6]

2.1.2. L'échelle limnimétrique

Le premier « capteur de niveau » utilisé reste le limnimètre de référence. la mesure est effectuée par la lecture d'une mire immergée en partie dans l'eau et disposée de telle sorte qu'elle couvre toute l'étendue du marnage de l'écoulement à mesurer. Elle est graduée en unité de mesure de longueur, et subdivisée en sous-multiples de cette unité.

Cette lecture est accompagnée de la lecture d'une montre pour dater la mesure faite.

Cette échelle doit être implantée dans une zone d'eau relativement calme et dépourvue de corps flottants. La précision de lecture est généralement d'un centimètre, sauf cas d'implantation difficile.

Grâce à un système vidéo il est possible de mémoriser des lectures de mire et les temps écoulés. Une visualisation ultérieure permet de relire à la demande des événements enregistrés.

2.1.2. Mesure du déplacement d'une « chaîne » dont l'extrémité suit l'évolution de la surface de l'eau

a) Le flotteur

Un flotteur est installé dans un puits de mesure relié hydrauliquement au niveau d'eau à mesurer par un tuyau ou par l'intermédiaire d'une tranchée remplie de sable et gravier.

Le déplacement du flotteur est transmis à une poulie par l'intermédiaire d'un câble dont la tension est assurée par un contrepoids.

La précision théorique est reliée à plusieurs paramètres du système :

- couple résistant « poulie-enregistreur graphique »;
- diamètre de la poulie (très souvent lié au coefficient de réduction);
- diamètre du flotteur.

Ainsi, une bonne précision sera obtenue en choisissant un appareil à faible couple résistant, avec une grande poulie d'entraînement et en utilisant un gros flotteur. La précision ainsi obtenue descend rarement en-dessous du millimètre. En pratique et en raison des couples résistants constatés sur le terrain, la précision est souvent largement inférieure à la précision théorique (erreur de 1,5 à 2 fois l'erreur escomptée).

La vitesse de poursuite est liée à l'inertie totale du flotteur + poulie + contrepoids;

Le contrepoids doit être choisi pour assurer au câble dans toutes les configurations (montée et descente), un coefficient de frottement suffisant du câble sur la poulie.

Les principales causes d'anomalies rencontrées sur les flotteurs sont :

- saut du câble en dehors de la gorge,
- glissement du câble sur la poulie (évitée par l'utilisation de roue à picots et d'un ruban perforé),
- blocage du flotteur (gel),
- encrassement du puits de pression (et donc erreur de mise en pression),
- couple résistant trop fort (tracé en escaliers).

Le flotteur est un appareil couramment utilisé depuis des décennies pour la limnimétrie en rivière, il n'est pratiquement pas utilisé en réseau d'assainissement.

b) Le palpeur

Le fonctionnement d'un « palpeur » est basé sur l'auscultation continue ou périodique du niveau de l'eau afin d'en suivre les fluctuations. Cette auscultation est généralement assurée par un asservissement électromécanique comprenant le capteur lui-même : le palpeur, le circuit électrique (ouverture ou fermeture de circuit au contact de l'eau, modification de résistance électrique...) le moteur et les poulies pour l'enroulement ou le déroulement du câble supportant le palpeur. Le moteur est piloté par le circuit électrique en fonction des « informations » données par le palpeur.

Ce type d'appareil est peu utilisé en France où seulement deux matériels sont commercialisés, cependant quelques organismes fabriquent « leur palpeur » comme le CEMAGREF, le LROP et EDF.

2.2. La mesure du temps [6], [7]

La hauteur d'eau peut se déduire de la mesure du temps de parcours (t) d'un signal transmis d'un point de référence fixe jusqu'au plan d'eau. En supposant la vitesse de propagation connue (v) et sa direction normale au plan d'eau, la hauteur du plan d'eau au point de référence est alors égale à vt .

Les véhicules les mieux adaptés au transport de signaux sont les ondes acoustiques et les ondes lumineuses qui ont de plus la capacité de se réfléchir sur l'interface air/eau. Cette disposition permet de concevoir des systèmes où les points d'émission et de détection sont confondus. Le temps mesuré correspond alors à l'aller et retour du train d'ondes, d'où :

$$h = vt/2$$

Le principe est le même pour un dispositif aérien avec propagation dans l'air ou immergé avec propagation dans l'eau. Dans le premier cas, si la hauteur entre le point de référence et le niveau zéro du plan d'eau est H , la hauteur d'eau est égale à $H - h$; dans le second, la hauteur d'eau est directement égale à h .

● La propagation des ondes acoustiques est caractérisée par un coefficient d'amortissement d'intensité avec la distance proportionnel au carré de la fréquence d'émission. A fréquences égales, il est 1000 fois plus important dans l'air que dans l'eau. Les célérités du son sont respectivement 330 m/s à 0 °C dans l'air et 1400 m/s à 0 °C dans l'eau. Ces propriétés permettent de définir trois familles d'appareils :

- les systèmes à ondes sonores de fréquence de l'ordre de 10 kHz qui ont une portée de quelques dizaines de mètres dans l'air avec une résolution assez médiocre;
- les systèmes à ondes ultra sonores de fréquence généralement voisine de 50 Hz, ayant une portée d'une dizaine de mètres dans l'air avec une résolution inférieure au centimètre;
- les systèmes à ondes sonores à capteur immergé fonctionnant à des fréquences de plusieurs centaines de kHz avec une résolution très fine, inférieure au millimètre pour une portée de quelques mètres.

Tous les systèmes acoustiques présentent une zone dite « aveugle » à proximité du capteur. Son importance est liée à la fréquence et aux durées d'émission provoquant des échos parasites dans la masse du capteur. La zone « aveugle » varie de quelques centimètres pour les capteurs immergés à quelques dizaines de centimètres pour les capteurs aériens. Il est nécessaire d'en tenir compte lors de l'implantation du capteur.

Les facteurs d'influence affectant la qualité des mesures sont :

- les turbulences dans le milieu de propagation;
- les variations temporelles et spatiales de la température de ce milieu;
- la sédimentation, les émulsions, les bulles d'air, les vaguelettes, les matières en suspension pour le dispositif à capteur immergé;
- le taux d'humidité, les corps flottants et les vaguelettes pour les dispositifs à capteur aérien.

Les variations de pression interviennent peu sur la mesure.

De ces facteurs d'influence, seuls les effets de la variation temporelle de température peuvent être aisément corrigés. Il y a donc lieu de prendre toutes précautions utiles dans la mise en œuvre de cette technique limnimétrique.

● Le principe de mesure du temps au moyen d'ondes lumineuses se différencie du précédent par la vitesse de propagation de l'onde ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Pour de courtes distances, les délais de retour de l'écho étant extrêmement brefs, aucun dispositif électronique n'est assez rapide pour l'évaluer avec précision. On détermine cette fois le nombre d'aller et retour successifs (n) observés dans un intervalle de temps (Δt) défini, chaque réception d'écho déclenchant instantanément une nouvelle émission :

$$h = c \Delta t / 2 n$$

Ces appareils très récents ne sont pas encore appliqués en limnimétrie et sont d'un coût très élevé. leur portée peut atteindre quelques mètres à quelques centaines de mètres dans l'air avec une résolution de l'ordre du centimètre.

2.3. La mesure de pression [6], [14]

2.3.1. La mesure indirecte de la pression par système pneumatique

a) Les systèmes pneumatiques à enceinte fermée : la « cloche » (fig. 1)

Cette technique met en œuvre une enceinte dont une extrémité déformable est immergée dans l'écoulement à mesurer, l'autre extrémité est constituée d'une capsule anéroïde. Cette capsule est soumise extérieurement à la pression atmosphérique. Un stylet d'enregistreur est solidaire de la capsule et toute variation de pression se traduit par un déplacement sur un papier qui défile en fonction du temps. La valeur de la mesure est obtenue après application d'une fonction de mise à l'échelle.

Ces appareils sont robustes, peu coûteux et simples mais peu précis et nécessitent une vérification fréquente de l'étanchéité du circuit pneumatique.

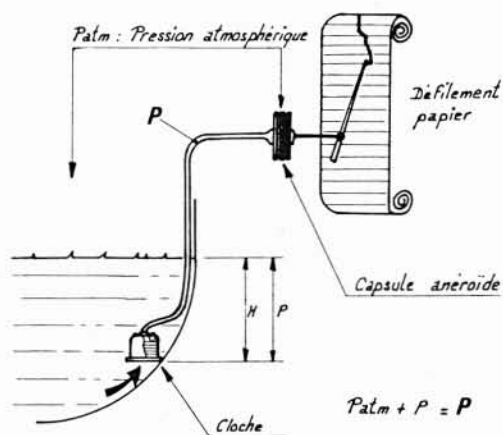
b) Les systèmes pneumatiques à enceinte ouverte : le bulle à bulle (fig. 2)

Cette technique de mesure permet de disposer plus facilement la prise de pression dans l'écoulement. D'une part, ce dispositif limite les perturbations créées par l'appareil : d'autre part il accroît la distance pouvant séparer la prise de pression et le capteur de pression. Cette technique consiste à créer un débit de gaz constant dans une canalisation débouchant dans l'écoulement à mesurer.

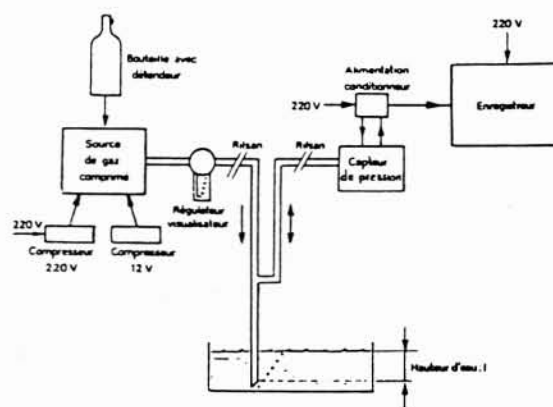
La source de gaz est une bouteille de gaz comprimé (air ou azote) ou un compresseur si l'on dispose d'énergie électrique. Le circuit du gaz comprend, après le détendeur, un régulateur de débit, un visualisateur du débit (à bulles ou à bille flottante) et le tube de mesure muni d'une prise de pression.

La variation de hauteur d'eau au-dessus du débouché correspond à une variation de pression proportionnelle dans le circuit pneumatique.

Les variations de pression peuvent être mesurées, comme dans le cas précédent, par une capsule anéroïde,



1. Enceinte pneumatique fermée (cloche).



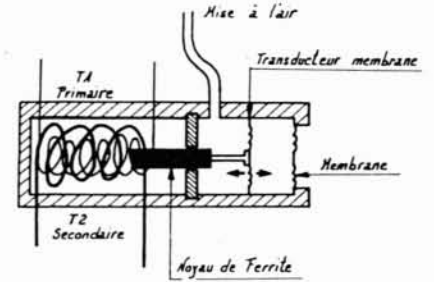
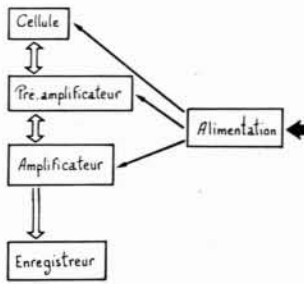
2. Schéma de fonctionnement d'un limnigraph de type « bulle à bulle ».

mais des systèmes plus sophistiqués peuvent être utilisés :

● Le manomètre à mercure : la pression est mesurée par un manomètre à mercure. Une sonde à deux électrodes entraîne la rotation d'un moteur électrique dans un sens ou dans un autre suivant la variation du niveau du mercure, qui agit sur cette sonde de façon qu'une électrode soit toujours en contact avec la surface du mercure.

● La balance de pression : la pression de gaz est convertie en une force par une capsule manométrique agissant sur le fléau d'une balance à poids mobile. Le poids mobile est déplacé par un servomoteur jusqu'à ce que l'équilibre soit atteint.

Ces deux dispositifs sont tels que la rotation de l'arbre de sortie est proportionnelle à la variation du niveau de l'eau (en général 10 cm/tour). L'erreur de mesure est de



T1 Tension constante (A.C.)
T2 Tension variable en fonction de la position du noyau de ferrite

Transformateur différentiel

3. Schéma général d'une chaîne de mesure de pression.

l'ordre du centimètre pour une étendue de mesure de 10 mètres. Leur inconvénient principal étant l'encombrement et la maintenance de l'alimentation en gaz.

Si ces capteurs pneumatiques ont le mérite de ne pas exiger de coûteux travaux de génie civil et de pouvoir être mis à l'abri des crues, ils sont par contre d'un entretien assez délicat. Ils nécessitent :

- l'approvisionnement périodique en gaz comprimé ou l'entretien du compresseur, ainsi que la surveillance de la source d'énergie électrique;
- la purge du circuit pneumatique, la vérification de l'étanchéité et le nettoyage de la prise de pression.

2.3.2. Les capteurs de pression

a) La composition d'une chaîne de mesure de pression

Communément appelée : capteur de pression (fig. 3), peut se décrire en quatre parties (la quatrième, l'enregistreur n'est pas décrite ici) :

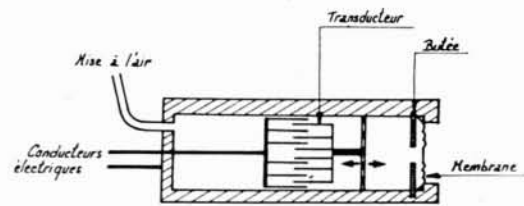
- Le module d'alimentation assure la distribution de l'énergie
- La cellule de mesure, ensemble d'apparence monobloc, contient le transducteur et lui assure un environnement favorable.
- Le conditionneur traite les signaux électriques issus du transducteur.

b) Le transducteur (fig. 4)

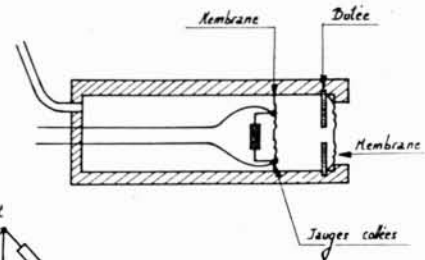
Les capteurs de pression sont basés sur le principe de la déformation, sous l'effet de la pression, d'un élément élastique scellé sur sa périphérie au cours d'épreuve. Cette déformation mécanique est transformée en une grandeur électrique par le transducteur, mettant en œuvre l'une des technologies suivantes :

Variation d'un champ électrique

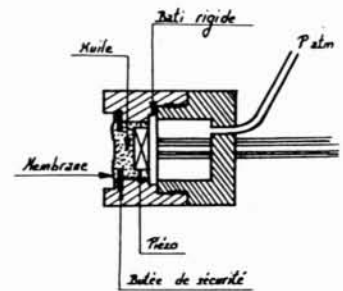
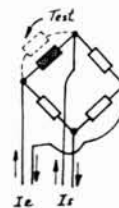
- Le transformateur différentiel : la membrane du transducteur est solidarisée à un noyau de ferrite qui se déplace à l'intérieur du champ électrique d'un transformateur. Ce type de transducteur nécessite une enveloppe relativement encombrante.



Condensateur à air



Jauge de contrainte



Piézo Résistif

4. Capteur de pression. Schéma des cellules de mesure selon les technologies utilisées pour le « transducteur ».

- Le condensateur à air : la membrane du transducteur est solidaire d'une armature d'un condensateur à air. L'autre armature est fixe, et est solidaire du bâti de la cellule. Les déplacements de la membrane entraînent des variations de capacité du condensateur. Ce type de capteur est compact.

Variation de résistivité

- La jauge de contrainte : la membrane du transducteur est dotée par collage de plusieurs jauges de contraintes qui présentent une résistance électrique variable en fonction de l'élongation qu'elles subissent. Ce type de capteur compact peut être immergé dans le fluide à mesurer. Mais il présente une grande fragilité au niveau de transducteur. Les pannes sont très souvent dues au claquage des points de collage des jauges de contrainte.

- Le piézo-résistif : le transducteur ne possède plus de membrane mais se présente comme un bloc composite réalisé par diffusion en couches minces de ponts de résistances dont la résistance varie en fonction de la pression exercée sur le cristal. Ce type de capteur est actuellement le plus utilisé pour la mesure de pression. Sa conception « monolithe » supprime beaucoup de sources de défauts concernant l'interface membrane-électronique.

La piézo-électricité

Les transducteurs utilisant les propriétés de la piézo-électricité ne sont actuellement commercialisés que dans le domaine du laboratoire.

- Le quartz : le transducteur est constitué d'un quartz dont la propriété électrique est que, soumis à une contrainte mécanique, une tension électrique alternative qui le traverse subit une variation. Ce type de capteur reste aujourd'hui le plus précis, mais aussi le plus onéreux.

- La céramique : le transducteur décrit ci-dessus est remplacé par une céramique.

c) Contraintes d'utilisation des capteurs de pression

1. Les éléments déterminant la précision de la mesure

- La présence de membranes sur les cellules de mesure entraîne inévitablement une hystérésis, et à la longue un fluage. L'hystérésis se traduit par la non-linéarité du capteur, le fluage par une dérive du zéro dans le temps.

- Les conditionneurs électroniques : tous les amplificateurs ne sont pas linéaires pour toute leur plage de fonctionnement. C'est surtout dans les premiers 20 % de l'échelle que la linéarité est la moins bonne. Il est possible de minimiser l'influence de ces zones d'imprécisions en effectuant l'étalonnage du capteur entre 20 et de 80 % de sa gamme de mesure.

Le silicium entrant dans la réalisation actuelle de tous les transistors et circuits intégrés est très sensible aux interférences entre 25 et 30 MHz. Un blindage correct et une mise à la terre unique permet de limiter ces interférences.

- La mise à l'air libre du transducteur est souvent assurée par un capillaire. Il peut se former au débouché de celui-ci une goutte d'eau qui va pénétrer dans le tube et s'y immobiliser. De ce fait, le capteur va fonctionner par à-coups et fournir des valeurs de mesure fantaisistes. Pour éviter de tels incidents il faut réaliser la mise à l'air libre du capteur avec du tube de diamètre 4/6 mm.

- Les variations de température ont un effet important sur le fonctionnement des capteurs à membranes métalliques. Un dispositif de compensation de température équipe le transducteur. Mais l'aptitude du transducteur à prendre la température de la membrane en contact avec le milieu extérieur est mal connue.

2. Condition d'implantation

La référence de la mesure de pression étant l'altitude de la membrane du capteur, le dispositif de mise en place doit permettre d'immobiliser la cellule de mesure.

Les capteurs doivent être implantés de façon à ne pas perturber l'écoulement, afin de ne pas engendrer de tourbillons sources de pressions dynamiques faussant la mesure.

3. Saisie sur site [6]

3.1. Caractéristique générale

3.1.1. Datation de la mesure

La mesure de hauteur d'eau n'a de signification que si l'on connaît sa date.

Le choix d'un enregistreur, implique donc le choix de la méthode de datation de la mesure :

- Mesure du temps *par défilement* du papier portant la mesure tracée par un stylet solidaire du transducteur et dont la position varie perpendiculairement au défilement.

- Mouvement d'horlogerie à ressort : Le défilement connaîtra un glissement en fonction de la variation de l'horloge due à la non-linéarité de la force imprimée au mouvement d'horlogerie par le ressort.

- Mouvement d'horlogerie électronique :

- L'horloge est pilotée par la fréquence du courant d'alimentation de la station de mesure (en général 50 Hz). En certaines périodes de la journée cette fréquence de référence peut varier, mais globalement sur une journée EDF garantit le rattrapage...

- L'horloge est pilotée par un générateur de fréquence électronique. La stabilité de ce générateur peut varier en fonction de la qualité des composants et en fonction de la stabilité de l'alimentation électrique de la station.

- L'horloge est pilotée par un quartz dont la stabilité est garantie. La précision de la mesure du temps sera liée à la fréquence caractérisant le quartz, et à l'inertie du moteur assurant le défilement.

- Mesure du temps *par traitement informatique* numérisant la valeur mesurée et la date de sa mémorisation :

- Datation par programme : Cette datation utilise la vitesse de traitement du microprocesseur pour effectuer l'ensemble de la tâche d'acquisition et de rangement de la mesure. Cette horloge, suffisante pour l'organisation des traitements informatiques, n'est pas assez stable pour dater des mesures sur une durée de plusieurs semaines. Le glissement peut être de plusieurs minutes par jour.

- Datation par référence à un quartz : Cette datation nécessite d'adjoindre à l'unité de traitement informatique

une horloge à quartz que le programme de mémorisation va lire au moment du stockage de la mesure. Le glissement dépendra essentiellement de la fréquence de l'horloge utilisée. Ce glissement pourra être inférieur à quelques secondes par jour; encore faut-il y mettre le prix...

Dans tous les cas évoqués l'imprécision sur la mesure du temps peut introduire une imprécision sur la valeur mesurée d'autant plus importante que le phénomène à mesurer évolue rapidement.

3.1.2. Précision de la saisie

Lors du choix d'un système de saisie, il faut tenir compte de l'influence de ce système sur la précision de la mesure.

- pour les enregistreurs graphiques : la dimension du graphe par rapport à l'amplitude de mesure permettra de déterminer la précision sur la hauteur d'eau, la vitesse de défilement permettra d'apprécier la précision sur la datation;

- pour les enregistrements numériques : le choix du pas de temps pour l'acquisition d'une mesure est très important. Actuellement la plupart des enregistreurs numériques permet de modifier ce pas de temps en fonction de l'événement mais cela constitue déjà un prétraitement des données.

3.1.3. Environnement de la saisie

L'environnement doit être pris en compte dans le choix de l'enregistreur. Si l'enregistreur peut être placé dans un local à l'abri des intempéries, du vandalisme et des parasites électroniques, il n'y a pas de restriction au départ, mais dans tous les autres cas des précautions sont nécessaires.

3.2. Adaptation du système de saisie au système de mesure

3.2.1. Généralités

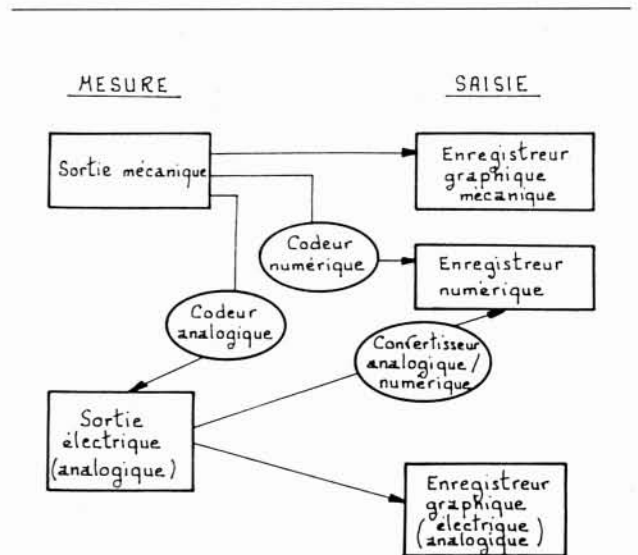
Le schéma de la *figure 5* résume les possibilités d'adaptation entre les différents systèmes de mesure et de saisie.

Certains capteurs sont proposés directement avec un système d'enregistrement, en particulier, les appareils de type ancien sont presque toujours équipés d'enregistreur graphique relié mécaniquement au système de mesure.

Certains constructeurs proposent des chaînes de mesure complètes avec des capteurs de pression ou à ultra-sons. Dans ces deux cas, l'enregistreur est, par construction, adapté au système de mesure. Cependant, la plupart des « nouveaux » capteurs délivrent un signal électrique, auquel il faut adapter un enregistreur. Avec les anciens capteurs, si l'enregistrement graphique devient insuffisant, il est possible d'adapter un enregistreur numérique par l'intermédiaire d'un codeur : ce sera généralement le cas pour les systèmes à sortie mécanique : flotteur, capteur pneumatique...

3.2.2. Les codeurs

Les codeurs ou convertisseurs analogiques-numériques peuvent relever de différents principes :



5. Adaptation du système de saisie à la mesure.

— *codeur absolu* : il fournit la valeur absolue de la grandeur mesurée. Le code binaire réfléchi (Gray) assure une meilleure sécurité dans la transformation.

La réalisation peut être mécanique : ouverture ou fermeture de contacts ou opto-électrique : ouverture ou fermeture de circuits électriques par des diodes photosensibles. Les codeurs mécaniques sont autonomes et robustes mais présentent un couple résistant non négligeable, inconfortable qui n'ont pas les codeurs opto-électriques mais ils nécessitent une source d'énergie électrique.

— *codeur incrémental* : il fournit la valeur numérique de l'écart de la mesure de la grandeur entre deux instants successifs t et $t - 1$.

— *codeur impulsionnel* : il fournit un signal chaque fois que la grandeur varie d'une unité.

L'inconvénient de ces deux derniers types de codeurs numériques est que toute perte d'incrément ou d'impulsion fausse le résultat de la mesure. Les enregistreurs associés à des codeurs ne fournissent donc pas la même information sur la grandeur suivant le type de codeur.

Avec un codeur absolu ou incrémental, la qualité de l'échantillonnage dépend de la fréquence de la mesure. Les codeurs impulsionnels imposent une base de temps précise pour dater l'impulsion, mais fournissent toute l'information possible sur la variation de la grandeur.

Dans le premier cas, la base de temps commande, dans l'autre cas, c'est l'événement qui commande.

— *Capteur-convertisseur à sortie électrique*

Les capteurs à sortie électrique transforment le mouvement vertical du plan d'eau en un signal électrique proportionnel, en général 0/4-20 mA. Ce signal peut être utilisé directement en entrée de système d'enregistrement. L'enregistreur doit être assez rapide pour suivre toute évolution du signal de sortie du capteur, et doit être doté d'une impédance d'entrée compatible avec l'impédance de la sortie. Si l'enregistreur est destiné à faire l'acquisition

sur plusieurs capteurs, ses entrées devront être différentielles. Le mode commun de ces entrées devra être supérieur à la tension d'alimentation la plus élevée utilisée pour les capteurs raccordés.

La définition — soit du graphe, soit de la valeur numérique mémorisée — devra être compatible avec la précision souhaitée pour la mesure. En ce qui concerne le graphique l'acuité visuelle est de $1/10^e$ de millimètre. En ce qui concerne le numérique, il faut choisir un nombre de points suffisant : 1 000 points représentent 1 cm pour une échelle de 10 m.

3.3. Les supports d'enregistrement

3.3.1. Enregistrements graphiques

Les supports graphiques d'enregistrements ont déjà été évoqués pour les problèmes de datation et de précision qui restent un des inconvénients majeurs de ce système. De plus, l'exploitation de ces enregistrements est longue et fastidieuse. Cependant, et malgré l'arrivée massive des enregistreurs numériques, ils conservent un certain nombre d'avantages :

- l'autonomie, la simplicité et le faible coût des enregistreurs graphiques mécaniques (liés au système de mesure);
- la maintenance de tous les types d'appareils sur le terrain est facilitée par la disponibilité d'un graphique qui permet de repérer rapidement les anomalies qui ont pu se produire au cours de la période séparant deux visites.

3.3.2. Enregistrements numériques

Les enregistreurs numériques permettent d'exploiter facilement les données, qui peuvent être directement transmises à un ordinateur. De plus ils permettent souvent un premier traitement des données. Cependant l'enregistrement numérique est beaucoup moins « parlant » que l'enregistrement graphique et la conservation des données « brutes », sans commentaires, peut s'avérer délicate.

Plusieurs supports peuvent être utilisés pour collecter ces données.

- *la bande perforée* a été le premier support utilisé. Un ensemble de matrices de perforation entraîné par le flotteur contre-poids vient, à intervalle de temps déterminé, perforer la bande de papier suivant. Un code binaire décimal ou le code international TELEX. Le même principe a été utilisé, avec impression de la valeur numérique en clair, lisible par un lecteur optique.
- *la bande magnétique* en minicassette a permis de concevoir en code binaire des enregistreurs séquentiels à faible consommation, alimentés par piles avec une autonomie de plus d'une année, et souvent fonctionner en ambiance sévère (-20°C , $+50^{\circ}\text{C}$). Sur ordre de la base de temps, à quartz, permettant diverses cadences d'enregistrement, l'appareil procède à l'enregistrement sur deux pistes de l'information temps-mesure délivrée par le codeur binaire associé.
- L'introduction du *microprocesseur* dans les systèmes de saisie automatique in situ leur confère une architecture interne comparable à celle de microordinateurs. L'utilisation des mémoires pour le stockage des mesures conforte ce schéma qui tend actuellement à se généraliser.

On distingue deux grands principes de stockage et de recueil des données sur site par opérateur basés sur ces mémoires : les cartouches amovibles interchangeables et la mémoire résidente fixe que l'on vient décharger périodiquement à l'aide d'un terminal spécialisé ou d'un ordinateur de terrain.

— les cartouches amovibles conviennent plutôt à la question de réseaux très étendus géographiquement, faisant appel à des opérateurs isolés, le dépouillement des cartouches s'opérant dans un laboratoire central où elles sont envoyées par courrier. Dans cette configuration, le contrôle sur site reste limité et nécessite néanmoins un terminal de dialogue.

— les mémoires résidentes conviennent aux réseaux gérés par un seul opérateur, effectuant des tournées périodiques de collecte des données à partir de chaque centrale de mesures. L'utilisation d'ordinateur portable de forte capacité mémoire permet de suivre un grand nombre de stations avec possibilité de contrôle effectif sur le site au moyen de logiciels adaptés.

Dans les deux cas, les données sont ensuite transférées sur un ordinateur de traitement au moyen d'un lecteur de cartouche muni d'une liaison série pour le premier système et directement par la liaison série de l'ordinateur du portable dans le second. Dans un réseau de stations équipées d'une télétransmission, un stockage de sécurité sur mémoire peut être également prévu.

Les mémoires utilisées sont généralement :

- des EPROM (Mémoire morte programmable électriquement et effaçable par ultra violet) pour les cartouches amovibles car elles conservent l'information sans alimentation électrique;
- des RAM CMOS (Mémoire vive statique à accès aléatoire en technologie faible consommation) pour les mémoires résidentes car elles sont très faciles à interfacer avec le microprocesseur de la centrale et consomment peu d'énergie au repos.

Une nouvelle technologie, l'E²PROM (Mémoire morte programmable et effaçable électriquement) semble prometteuse car elle associe une relative souplesse de procédure d'écriture et d'effacement proche des RAM avec une non volatilité, jusque là propre aux EPROM. Leur coût est cependant encore environ 10 fois supérieur aux autres mémoires.

Les capacités courantes sur ce type d'appareils vont de 15 Koctets à 64 Koctets de données soit plusieurs dizaines de milliers de mesures. A très court terme, une augmentation très sensible de ces capacités est à prévoir.

3.4. Le prétraitement sur sites des données

● *Prétraitement intrinsèque à l'appareil de mesure*

La plupart des capteurs et principalement ceux utilisant des électroniques de mesure réalisent un premier traitement de la mesure. Le plus courant est la présence d'un pas de temps minimum d'acquisition qui peut être constitué soit par un pas de temps d'auscultation, soit par un moyennage de mesures rapprochées sur un pas de temps fixé.

Pour choisir correctement un enregistreur, il est nécessaire de bien connaître ces prétraitements réalisés par

le capteur de mesure.

● *Prétraitement des données par l'enregistreur : logiciel d'acquisition*

Les enregistreurs numériques, munis de microprocesseur, sont utilisés avec un logiciel d'acquisition généralement paramétrable.

Les plus simples proposent uniquement le choix d'un pas de temps d'acquisition ou d'un pas de variation de hauteur (pas de temps variable).

D'autres proposent un mixage de ces deux paramètres avec, en plus, des choix de seuils permettant une évolution de ces paramètres selon les tranches de valeurs mesurées.

Les enregistreurs les plus sophistiqués permettent de programmer entièrement l'acquisition.

4. Comparaison de différents appareils

Un certain nombre d'essais ont été réalisés en France ou sont en cours pour expérimenter différents limnigraphes dans le cadre de la modernisation des systèmes d'annonce des crues ou, pour des besoins particuliers de services tels que les Directions départementales de l'Équipement (DDE), les services régionaux d'aménagement des eaux (SRAE), les services de la navigation...

La plupart de ces essais s'apparentent plus à des tests de bon fonctionnement d'appareils nouveaux qu'à des essais comparatifs et leurs résultats ne font pratiquement jamais l'objet de rapports à diffusion externe.

Il est souvent difficile de tirer des conclusions d'une comparaison de plusieurs appareils de mesure de hauteur d'eau étant donné la diversité des paramètres influençant la mesure : principe de mesure, technologie utilisée, résistance aux intempéries, type d'enregistreur choisi... De plus, pour une utilisation opérationnelle des matériels, les critères de comparaison peuvent être très variés : précision de la mesure, fiabilité et résistance du matériel, coût du matériel, facilité d'implantation, simplicité, fréquence et coût de la maintenance. Enfin, lorsqu'une expérimentation est réalisée sur un site particulier, certains appareils peuvent être mal adaptés à l'environnement et donner de mauvais résultats sans que cela puisse être généralisé à tous les sites pour tous ces types de matériels.

La réalisation d'une expérimentation à but comparatif exige d'être particulièrement rigoureux sur les objectifs recherchés.

A titre d'exemple, nous donnons ici un rapide résumé d'une expérimentation réalisée pour le compte du Ministère de l'Environnement par le Centre d'études techniques de l'Équipement Méditerranée sur une station d'essais comparatifs de limnigraphes aux Milles [8]. Dans le but de fournir des critères de choix aux gestionnaires des réseaux hydrauliques et des réseaux d'annonce de crues.

Le premier site retenu est l'Arc aux Milles : rivière à régime permanent, dont le débit de charriage n'est pas trop important avec un lit stabilisé.

Les tests se sont déroulés durant une année.

Les critères de choix retenus sont :

- le prix de l'ensemble capteur + décodeur;
- leurs limites de fonctionnement;
- la facilité de mise en place de ces appareils (coût de l'installation);
- la fiabilité et la représentativité des mesures quels que soient les facteurs météorologiques;
- la fidélité dans le temps et la maintenance de ces appareils;

Descriptif de la station

Elle est située sur l'Arc à l'aval immédiat du village des Milles avec un bassin versant de l'ordre de 600 km². Le débit d'étiage y est faible mais permanent en subissant des variations journalières perceptibles du fait du rejet d'une station d'épuration située à l'amont.

La valeur de la pleine échelle a été fixée à 4 m du fait de la hauteur des crues observées antérieurement.

En moyenne, les niveaux enregistrés varient entre 10 et 30 cm au droit de ce site. Deux crues ont été enregistrées en janvier et en avril (1,10 m et 2,50 m de hauteur maximum).

Ce site est équipé d'un limnigraphe à flotteur qui a été pris comme référence. Quatre autres limnigraphes y ont été installés :

- 2 limnigraphes piézorésistif, dont l'un à électronique intégrée et l'autre à électronique séparée, dans un tube tranquillisateur de 10 cm de diamètre;
- 1 limnigraphe à injection d'air (bulle à bulle);
- 1 sonde à ultra-son « air/eau ».

Les quatre mesures sont enregistrées sur une centrale d'acquisition. La station a été équipée d'un thermohygromètre à enregistrement graphique.

Traitement effectué et résultat obtenu

Le traitement des données indique, pour chaque appareil, la dérive du zéro, la précision des mesures et l'influence de la température et de l'hygrométrie sur les valeurs mesurées.

Les résultats obtenus montrent que :

- le limnigraphe à ultra son est très peu précis pour les faibles hauteurs d'eau (de 0 à 5 ou 10 % de la pleine échelle). Par contre, en temps de crue, sa précision est tout à fait similaire à celle des autres limnigraphes. L'hygrométrie a une influence non négligeable sur cette mesure.
- le capteur piézorésistif à électronique intégrée donne incontestablement les meilleurs résultats tant en précision qu'en dérive dans le temps et indépendance de la mesure par rapport à la température et à l'hygrométrie;
- la dérive des appareils sur les six mois d'exploitation peut être estimée à environ 2 à 5 cm suivant les types testés sur les six mois d'exploitation.

Les limites de l'expérience sont dues :

- à l'échantillonnage des données observées, constitué de données de hauteur d'eau comprises entre 10 et 30 cm en moyenne pour une pleine échelle de 4 m.
- à la référence utilisée;
- aux caractéristiques de l'écoulement.

5. Perspective

La mesure de hauteur d'eau a considérablement évolué au cours des dix dernières années.

L'évolution des capteurs paraît lente par rapport à celle des moyens informatiques de terrain. Il faut compenser la « faiblesse » du capteur par une gestion « intelligente » de ses capacités.

A défaut de pouvoir définir le capteur « idéal », on

finira par définir des classes d'applications limnimétriques par type de capteur qui permettra de préciser le marché de l'instrumentation limnimétrique.

Les constructeurs commencent à proposer des capteurs intégrés avec leur unité d'acquisition de datation et de mémorisation. Si un tel matériel tient ses promesses, il libérera les utilisateurs des servitudes actuelles concernant l'adaptation de tous les éléments d'une chaîne de mesure.

A court terme, il importe de développer les essais de matériels et le dialogue entre utilisateurs et constructeurs.

Bibliographie

- [1] ANDRÉ H. *et al.*, 1976. — *Hydrométrie pratique des cours d'eau* — Eyrolles.
- [2] ADINET M., Novembre 1963. — Capteurs en Hydrologie, Stage « Annonce des crues » EDF-DTG.
- [3] GUILLON A., Mai 1986. — Introduction de la métrologie dans un service d'assainissement *Stage ENACT*, Métrologie et diagnostic des réseaux en assainissement, ENACT-CFPC/USTL LHM.
- [4] HOC J.P., Décembre 1983. — Mesure de niveau, de vitesse, de débit et de pluie — Expérience du Service d'assainissement des Hauts de Seine. *Colloque ENPC*.
- [5] Réseau d'Ile de France. — Commission Limnimétrie en réseau d'assainissement et milieu naturel, *Les limnigraphes : principes — techniques — problèmes*.
- [6] BOUYE-VIGNEAU, 1985. — *Etude d'un limnimètre enregistreur à énergie solaire*. CEMAGREF.
- [7] CAMBON J.P., Juillet 1985. — *Bassins versants expérimentaux de Draix — Mesure des transports solides, test d'une chaîne de mesure* — CEMAGREF.
- [8] De SAINT SEINE J., Octobre 1986. — *Essais comparatifs de limnigraphes*, Ministère de l'Environnement. CETE Méditerranée — SRAE d'Aix en Provence.

Discussion

Président : M. Cl. GLEIZES

M. GHIO. — M^{lle} GUILLON a parlé de justesse pour la lecture des hauteurs d'eau sur une échelle limnimétrique. Il faut cependant rappeler que la lecture d'une échelle en crue est parfois difficile (différences de niveau entre l'amont et l'aval). Dans des conditions hydrauliques particulières, on peut trouver des différences notables (jusqu'à 10 centimètres) entre les différents points d'une section. (sur des rivières moyennes : 10, 20 m de large).

M^{lle} GUILLON. — Il n'y a pas de justesse absolue, en effet.

M. de SAINT-SEINE. — Sur une crue atteignant 2,50 m à l'échelle, nous avons pu faire des lectures à plus ou moins 2 cm.

M. ANDRÉ. — Quel est le prix des capteurs et du système d'interrogation de la D.T.G. de l'E.D.F. ?

M. AUDINET. — Pour les capteurs seuls, l'ordre de grandeur est de 10 000 F. après étalonnage. Pour les dispositifs d'interrogation, il y a toute une gamme d'appareils : de 250 000 F. à 10 000 F environ. C'est également le prix du petit appareil portable avec affichage visuel que je vous ai présenté.

M. ANDRÉ. — Nous avons fait également des essais avec différents types de capteurs, en particulier pour le contrôle des fuites dans les barrages. Les résultats ont été très divers. Avec des capteurs de pressions Druck, nous en avons un qui donne des résultats satisfaisants, mais auparavant dix autres n'avaient pas fonctionné correctement.

Pour les ultrasons, il est difficile de prononcer un jugement. Les essais que nous avons menés jusque-là ont été encourageants, pour un parcours dans l'air assez faible, de l'ordre de 2 mètres, mais il faut plusieurs années d'essais de plusieurs capteurs pour conclure.

M. de SAINT-SEINE. — En effet la précision de ces appareils est liée à l'échelle de mesure.

M. GREGO. — Nous avons pu constater des erreurs de l'ordre de 15 centimètres avec des ultrasons réfléchis par la neige.

Je veux souligner de plus que l'influence de la température sur les mesures par ultra-sons est importante et pas encore connue. ENEL a un programme de comparaison de différents capteurs (flotteur, ultrasons, piézorésistif, bulle-à-bulle). Les essais seront effectués sur le Pô près de Mantoue, avec une section où les variations de niveau en crue peuvent atteindre 8 à 9 mètres. J'espère pouvoir vous fournir les résultats de cette expérience.

Le Président. — Je vous en remercie.

M. CAMBON. — Nous expérimentons depuis deux ans, un capteur à ultrasons sur le bassin de Draix. Des problèmes se posent d'une part pour le réglage du zéro, qui est lié à l'échelle utilisée, d'autre part en raison de fortes anomalies liées aux gradients de température. Des variations significatives de plusieurs centimètres sont observées quand la réflexion se fait soit sur du béton chauffé, soit sur une couche de glace. Je pense qu'il faut y voir l'effet des variations de température dans les couches d'air proches de la surface de réflexion.

M. de SAINT-SEINE. — Le calage du zéro sur le capteur à ultra-sons est délicat. On peut le faire sur le décodeur, mais par rapport au calage fait en laboratoire, on note des différences. L'avantage du capteur à ultra-sons est qu'il est mieux protégé que les autres contre l'arrachement en crue. Il donne cependant des meilleurs résultats pour les hauts niveaux que pour l'étiage où la précision est plus faible.

M. MEUNIER. — Lorsque la mesure par ultra-sons est mauvaise en raison de la stratification de la température, peut-on envisager de corriger cet effet en mesurant la température avec des capteurs appropriés ?

M. de SAINT-SEINE. — Il peut être préférable alors, pour le même coût, de disposer plusieurs capteurs piézorésistifs pour l'étiage, ultrasons pour les crues.

M. MEIGNEN. — Vous avez parlé de fréquences des ultrasons. Sur les nouveaux systèmes, ces fréquences oscillent entre 40, 50 et 60 kHz. Sur un nouvel appareil, on a utilisé une fréquence variable (45 à 60 kHz) pilotée automatiquement ce qui permet d'optimiser la mesure.

M. HOC. — Le problème principal est celui de la température sur tout le trajet de l'onde et de sa répartition. Plus le trajet est long, plus l'effet se fait sentir. Ce n'est pas vrai qu'en rivière. En milieu fermé et égout, le seul fait d'ouvrir un regard au-dessus du capteur perturbe la mesure. Mais il y a aussi le problème de la dérive du zéro. Il ne faut pas oublier non plus que les capteurs vieillissent et peuvent avoir des « états d'âme ». Il faut chercher des palliatifs appropriés à chaque type de capteur et effectuer des contrôles fréquents.

M. MEUNIER. — Je vous informe que le Centre d'Etude de la Neige utilise un capteur à ultrasons pour mesurer des niveaux de neige. Un capteur de température est utilisé pour effectuer des corrections, mais la position de ce capteur a été spécialement étudiée; il est placé à l'intérieur d'un système de tuyaux en PVC, le tuyau intérieur étant ventilé artificiellement au moment de la mesure.

M. RANDON. — Pourquoi ne pas utiliser une sonde à ultrasons immergée, ce qui permettrait de minimiser les problèmes de températures ?

La Compagnie Générale des Eaux le fait sur la Marne avec des résultats satisfaisants. Il faut prendre des précautions pour protéger la sonde.

M. AUDINET. — Le problème est de bien fixer la sonde ainsi que celui du nettoyage pour les eaux chargées.

M. BOUYÉ. — Pour répondre à la question de M. RANDON, je signale que le CEMAGREF utilise des sondes à ultrasons immergées sur les réseaux expérimentaux de drainage agricole pour les mesures de piézométrie et de débitmétrie avec seuil jaugeur. Les études préalables à leur mise en place et les résultats obtenus sur le terrain montrent qu'en eaux calmes et peu chargées leur fonctionnement est très satisfaisant.

Pour des eaux chargées, il peut cependant y avoir des problèmes.

Les S.R.A.E. Champagne-Ardennes et Rhône-Alpes ont également eu des résultats satisfaisants avec ce même type de sondes pour des mesures en rivières.

M. DODANE. — Je crois utile de signaler, qu'en dehors de la mesure par flotteur, la méthode de bulle-à-bulle donne des résultats très satisfaisants avec une précision du centimètre pour des marnages dépassant 10 mètres, et cela quel que soit le type de capteur utilisé : manomètre à mercure ou balance de pression. Je suis donc étonné des résultats des essais du C.E.T.E. où une imprécision supérieure à 5 cm pour une hauteur de 2,50 mètres a été constatée.

M. de SAINT-SEINE. — L'imprécision est probablement due au décodeur utilisé et non à la méthode elle-même.