

CAPTEUR A FIBRES OPTIQUES POUR LA MESURE DE CONCENTRATION DE MATIERES EN SUSPENSION

L. BERGOUGNOUX, J. MISGUICH-RIPAULT, J-L. FIRPO, J. ANDRE

I. U. S. T. I.* U. M. R. 139, Laboratoire G. I. P. S. E. - Marseille - France

Résumé

Dans le cadre des études, menées sur le bassin versant de Draix[†] concernant l'érosion des terrains de montagne et la mesure des transports solides par les torrents, le Cemagref nous a chargés de concevoir et réaliser un appareil de mesure en continu de fortes concentrations de matières en suspension. Nous avons mis au point un capteur à fibres optiques dont le principe est le suivant : une fibre optique est destinée à l'émission de la lumière dans la suspension; une autre fibre optique capte le flux lumineux rétrodiffusé par les particules. Le flux lumineux capté est fonction de la concentration de la suspension, de la taille des particules, de leur indice de réfraction complexe, et de la longueur d'onde du faisceau incident.

Depuis juillet 1995, deux capteurs sont installés sur les bassins versants du Moulin et du Laval. Ils suivent l'évolution de la concentration en marnes lors des crues dans une gamme de 10 à 800 g/l avec une reproductibilité de ± 5 g/l. Nous avons pu comparer nos mesures aux mesures effectuées par prélèvement d'échantillons. Ces points de comparaison, plus de 150 sur chaque site, s'alignent sur une droite passant par l'origine et de pente 1. Les écarts à cette droite indiquent les variations de la granulométrie des suspensions.

Mots-Clés : Capteur à fibres optiques, Mesure de concentration, Transports solides.

Abstract

Within studies, on Draix erosional research basin, relating to mountain soils erosion and solid transports measurements by torrential swelling, Cemagref instructed us to study and realize a continuous measurement technique of high particles concentrations. We designed an optical-fiber sensor of which principle is : one optical-fiber is used for the emission of light in suspension; an other one received backscattered light by particles. The received intensity is function of suspension concentration, particle size distribution, complex refraction index and wavelength of incident light.

Since July 1995, two sensors are installed on basin of Moulin and Laval. Sensors follow marls concentration fluctuations at the time of swelling in a range of 10 to 800 g/l, with a ± 5 g/l measurement precision. We have compared ours measurements to concentrations gained by direct sampling in the flow. These comparison points, more than 150 for each basin, fall into a line passing by the origin with a 1 slope. The differences between points and line show variations of particle size distribution.

Keywords : Optical-fiber sensor, Concentration measurement, Solids transports.

* Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels.

† 04 Alpes de Haute Provence (France).

INTRODUCTION

L'étude des phénomènes d'érosion liés aux crues torrentielles est un axe de recherche du Cemagref*. Le site expérimental de Draix, dans les environs de Digne, est destiné à l'étude de ces phénomènes. Il est représentatif d'une zone de marnes noires sujette à une érosion intense difficile à maîtriser avec les moyens classiques de la RTM†. Ce site est composé de plusieurs bassins versants n'ayant pas tous les mêmes particularités, qui sont équipés d'instruments permettant la mesure de divers paramètres hydrologiques décrits dans le *Compte-rendu de recherche n°3 BVRE de Draix* (Cemagref 1995).

Comme le notait le rapport *Les bassins versants expérimentaux de Draix* (Cemagref 1988) : "La mesure des matières en suspension à partir de prélèvements est lourde et difficile; en outre elle présente l'inconvénient de donner des mesures discontinues. Il est nécessaire de mettre au point des instruments nouveaux permettant une mesure en continu des transports".

Pour cela, le Cemagref a pris contact avec l'IUSTI, en vue de mettre au point un prototype pour la mesure des transports solides. C'est ainsi qu'une convention entre le Cemagref et l'Université de Provence-IUSTI a été signée le 7 décembre 1992. La région PACA* s'est associée financièrement pour contribuer au succès de ces études dans le cadre des subventions au secteur technologie-recherche.

Le cahier des charges pour les caractéristiques de deux prototypes à installer sur site était : *un appareil non intrusif avec une étendue de mesure de 30 à 1000 g/l de matières sèches; cet appareil devant de plus être robuste, de mise en oeuvre simple, nécessitant peu de maintenance, de faible consommation d'énergie et respectant l'environnement*. La solution retenue est un capteur à fibres optiques fonctionnant sur le principe de la lumière rétrodiffusée par les particules en suspension.

Les deux prototypes, que nous avons construits, sont installés l'un sur le bassin du Laval, d'une superficie de 86 ha, et l'autre sur le bassin du Moulin d'une superficie de 8 ha.

1. LE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR A FIBRES OPTIQUES

Lorsqu'un rayon lumineux vient frapper une particule (fig. 1), celle-ci va, selon sa nature et ses caractéristiques géométriques, absorber et diffuser le rayon lumineux.

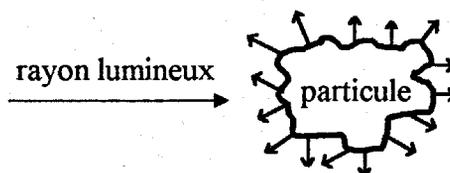


Figure 1 - Interaction lumière / particule

1.1. Le principe de la mesure (Figure 2)

Une fibre optique est destinée à l'émission d'un faisceau lumineux, de longueur d'onde λ , vers les particules en suspension dans l'eau. La fibre adjacente reçoit la lumière rétrodiffusée par les particules éclairées. Le flux lumineux capté est fonction de la concentration de la suspension C , de la distribution en taille des particules, de leur forme, de leur indice de réfraction complexe

* Centre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural et des Eaux et Forêts

† Restauration des Terrains de Montagne

* Provence Alpes Côte d'Azur

(qui traduit la capacité d'une particule à absorber et à diffuser la lumière incidente), de la longueur d'onde du faisceau incident et du dimensionnement du capteur. Le capteur comporte en fait plusieurs fibres optiques réparties entre l'émission et la réception de la lumière.

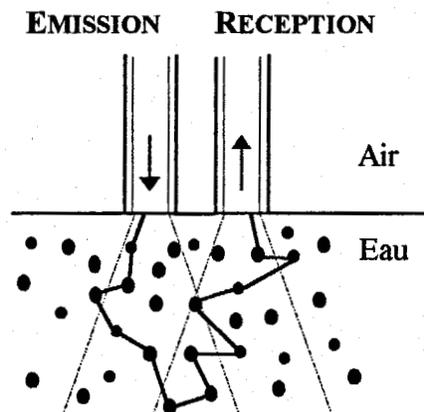


Figure 2 - Principe du capteur à fibres optiques (en pointillé les cônes d'ouverture numérique des deux fibres)

La conception, la mise au point ainsi que les différents champs d'application du capteur sont abordés dans la thèse de BERGOUGNOUX (1995).

1.2. Les marnes noires

Les marnes noires formant le substrat des bassins versants de Draix sont attribuées au Callovo-Oxfordien. Elles se présentent en masse compacte avec une puissance de plusieurs centaines de mètres. A l'affleurement, elles sont fortement érodées sur une épaisseur variable. C'est le produit de cette érosion, entraîné par le ruissellement vers le chenal, qui est l'objet de la mesure. Ce matériau a une masse volumique d'environ 2500 kg/m^3 .

Le Cemagref s'est intéressé à plusieurs aspects de la composition de ces marnes noires : leurs caractéristiques minéralogiques ainsi que leurs conditions d'altération, SIMONNET *et al.* (1995).

1.3. L'analyse granulométrique de l'échantillon de Draix (Figure 3)

Pour caractériser la granulométrie des marnes de Draix en suspension lors des crues, nous avons utilisé un granulomètre laser. Cet appareil délivre la distribution en volume d'un échantillon, en supposant les particules sphériques.

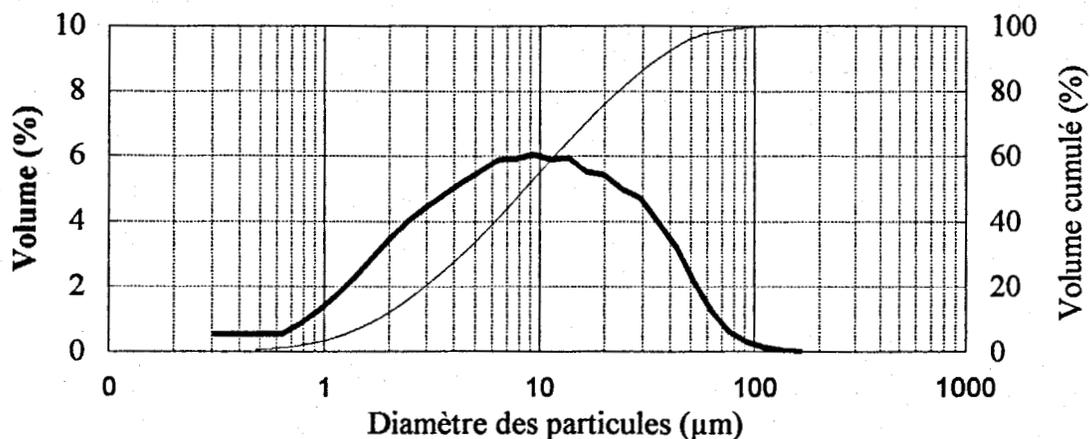


Figure 3 - Analyse granulométrique de l'échantillon de Draix

Les caractéristiques granulométriques données par l'analyse (fig. 3) de l'échantillon* de Draix sont les suivantes :

Surface spécifique (m ² /cm ³)	d3,2 (µm)	d10% (µm)	d50% (µm)	d90% (µm)	dmoy (µm)
1,43	4,2	1,8	8,5	34,9	14,2

Tableau 1 - Résumé des caractéristiques granulométriques des marnes de Draix

1.4. La diffusion de la lumière par une suspension de particules

L'étude de l'absorption et de la diffusion de la lumière par une particule fait l'objet de plusieurs ouvrages tels que VAN DE HULST (1957) et BOHREN *et al.* (1983), où est abordée l'influence de la forme de la particule (sphérique ou cylindrique) et de ses caractéristiques optiques (± absorbante et diffusante).

L'absorption et la diffusion de la lumière par une suspension de particules dépendent de la concentration de la suspension. Lorsque le milieu est très peu concentré, après la rencontre entre le faisceau incident et la particule, on peut supposer que la radiation diffusée traverse le milieu sans rencontrer d'autre particule; c'est la **diffusion simple**. Cependant lorsque la concentration volumique augmente, la radiation diffusée rencontre d'autres particules qui, à leur tour, vont diffuser ou absorber cette radiation. Cet effet de **diffusions multiples** devient très important avec la concentration.

Ce problème complexe des diffusions multiples accompagnées d'absorption n'est pas sans rapport avec ceux rencontrés dans la diffusion de la lumière par les poussières interstellaires. Dans ce cadre, un nombre important de travaux théoriques a vu le jour, notamment les ouvrages de CHANDRASEKHAR (1960) et de RYTOV *et al.* (1989).

Afin de prévoir la réponse du capteur pour une suspension donnée à une concentration donnée, nous avons réalisé une simulation numérique, qui s'appuie sur une méthode de Monte Carlo détaillée dans BERGOUGNOUX *et al.* (1996). Lorsqu'on connaît précisément les caractéristiques de la suspension, c'est à dire la granulométrie et l'indice de réfraction complexe†, la comparaison entre les résultats expérimentaux et ceux de la simulation est excellente.

2. LES ESSAIS EN LABORATOIRE

Pour mener à bien cette étude, 17 capteurs de géométries différentes ont été réalisés en laboratoire et testés suivant une procédure exposée dans l'article BERGOUGNOUX *et al.* (1995).

2.1. L'étalonnage en laboratoire

Lors d'un étalonnage, il est essentiel d'obtenir un milieu "homogène". Comme l'ont montré des essais‡ en canal au Cemagref de Grenoble, il est nécessaire d'étalonner le capteur avec des marnes dont la granulométrie et la couleur sont représentatives des suspensions circulant dans

* Prélèvement n°1 du 26/06/1994 au Moulin C = 93g/l, analysé avec le granulomètre laser Malvern MasterSizerE, IUSTI.

† Ce qui n'est malheureusement pas le cas pour les marnes vu leur forte absorption et leur forme très irrégulière.

‡ Effectués en février 1994.

le canal. C'est pourquoi les derniers étalonnages (fig. 4), réalisés en laboratoire en juillet 1995, ont été effectués avec des marnes issues des prélèvements présents sur bassins du Moulin (◆) et du Laval (■). Des granulométries préalables n'ont pas montré de différences entre les marnes prélevées lors de crues au Moulin et au Laval. Les caractéristiques granulométriques des marnes sont résumées dans le tableau 1.

La concentration de matières sèches, C_{marnes} , est calculée à partir de la masse totale de marnes M_T présentes dans la suspension au moment de la mesure et du volume total v_T (eau + marnes) :

$$C_{marnes} (g/l) = \frac{M_T (g)}{v_T (l)}$$

La masse volumique des marnes étant $\rho \sim 2500 \text{ kg/m}^3$, la fraction volumique C est égale à :

$$C (\%) = \frac{M_T}{v_T \cdot \rho}$$

La figure 4 montre les courbes d'étalonnage, obtenues en laboratoire, des deux prototypes: celui du Laval (■) et celui du Moulin (◆). Ces courbes d'étalonnage permettent de déduire la concentration de matières en suspension en mesurant la tension en sortie du conditionneur, associé à chaque capteur. Ces deux courbes d'étalonnage peuvent être ajustées numériquement pour des concentrations $\geq 10 \text{ g/l}$. La tension V en sortie du conditionneur, associé au capteur, est en mV.

Ces deux prototypes n'ont pas la même réponse en fonction de la concentration, car ils sont différents dans leur réalisation. En effet, la tête d'un capteur comporte plusieurs fibres optiques (cf. 1.1) réparties entre l'émission et la réception de la lumière. Le nombre total de fibres optiques est le même pour les deux prototypes, à savoir 19; celui du Moulin a 6 fibres à l'émission tandis que celui du Laval n'en a qu'une. Ceci modifie la réponse de l'appareil. Le prototype du Moulin est plus sensible entre 100 et 800 g/l que celui du Laval mais qui couvre néanmoins toute l'étendue de mesure de 10 à 800 g/l.

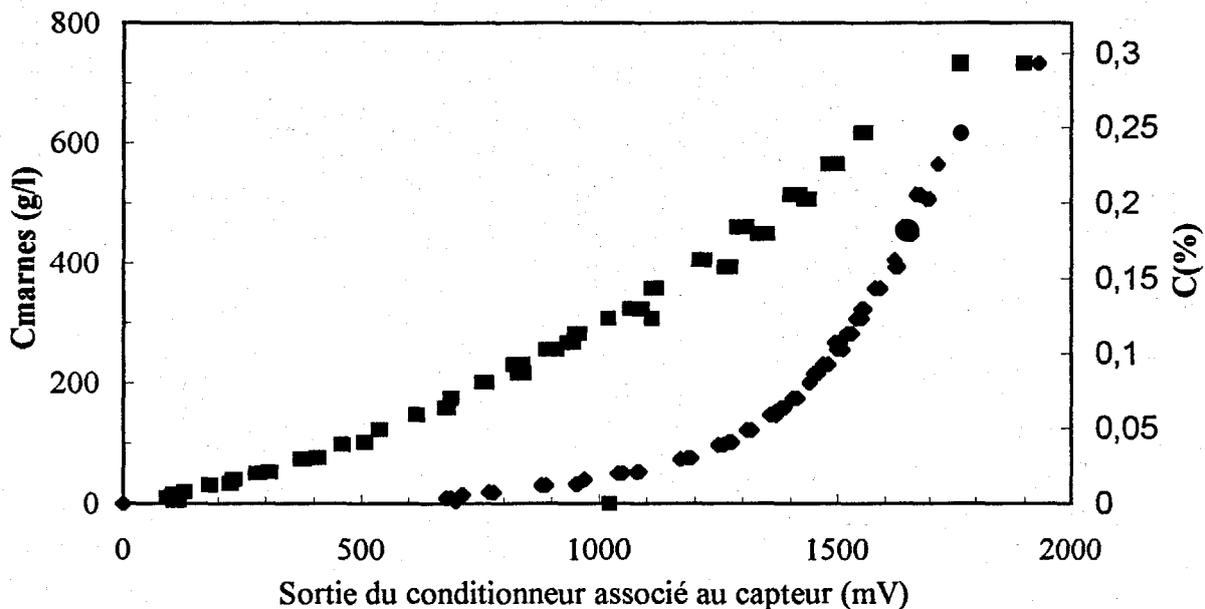


Figure 4 - Courbes d'étalonnage pour les prototypes installés en juillet 1995 au Laval (■) et au Moulin (◆).

2.2. La précision des mesures

Expérimentalement, nous avons constaté que la gamme de mesure de ces deux prototypes est comprise entre 10 et 800 g/l (c'est à dire en fraction volumique de $4 \cdot 10^{-3}$ à 0,32). La précision des mesures est estimée à partir de la reproductibilité des résultats obtenus lors de l'étalonnage au laboratoire. La reproductibilité est limitée par la difficulté d'obtenir une suspension homogène et par la dispersion granulométrique des divers échantillons.

Aux faibles concentrations ≤ 100 g/l, la précision est de ± 1 g/l. Cependant, en dessous de 10 g/l, la réponse du capteur est sensible à l'éclairage ambiant, qui modifie la réponse du capteur. C'est ce qui explique le point ■ aux coordonnées (1000 mV, 0 g/l).

Aux concentrations élevées > 100 g/l, la précision est estimée à ± 5 g/l.

3. LES MESURES IN SITU

3.1. La mesure de la concentration lors d'une crue

Une centrale d'acquisition, SAB 600 HDL, fournie par le Cemagref permet l'alimentation du capteur et la mesure de tension en sortie du conditionneur toutes les minutes. Les mesures sont sauvegardées puis exploitées par la division du Cemagref de Grenoble. Pour chaque crue sur les bassins du Moulin et du Laval, les mesures sont corrélées avec :

- les mesures de niveau délivrées par le capteur Ellan, dont le principe est décrit par OLIVIER *et al.* (1995a),
- et les concentrations des échantillons prélevés mesurées suivant la méthode décrite par MATHYS (1995).

La concentration de matières en suspension est déduite à partir de la courbe d'étalonnage de chaque capteur (fig. 4), en vérifiant préalablement que le niveau de la crue assure l'immersion de la tête du capteur. Il en est de même pour le débit de la crue à partir des mesures de niveau.

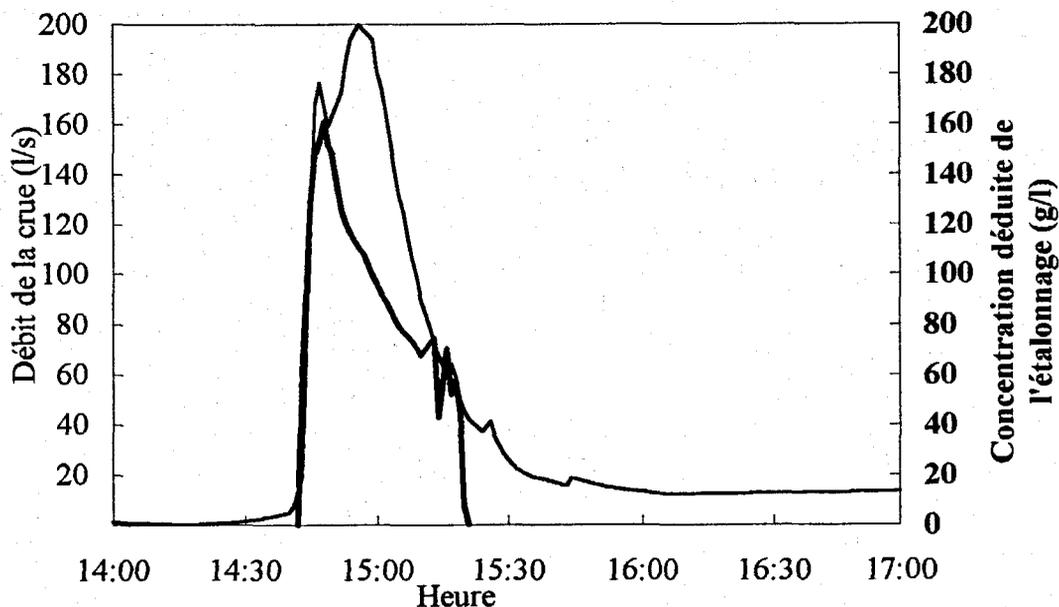


Figure 5 - Crue du 14/06/1996 au Moulin avec le débit (—) et la concentration (—■)

Ceci permet de suivre l'évolution au cours d'une crue de la concentration en matières en suspension en fonction du débit, sur les bassins du Moulin (fig. 5) et du Laval (fig. 6).

La figure 5 montre une crue au Moulin, où au début de la crue, l'augmentation brutale du débit est corrélée à celle de la concentration. En 10 mn, la concentration passe de 0 à 165 g/l et le débit de 10 à 180 l/s. Au Laval (fig. 6), on note des débits et des concentrations beaucoup plus importants, jusqu'à 4000 l/s pour le débit et 475 g/l pour la concentration. Le décrochage observé sur la variation de la concentration indique que, pendant 10 mn, le niveau de la crue ne permettait pas l'immersion de la tête du capteur à fibres optiques.

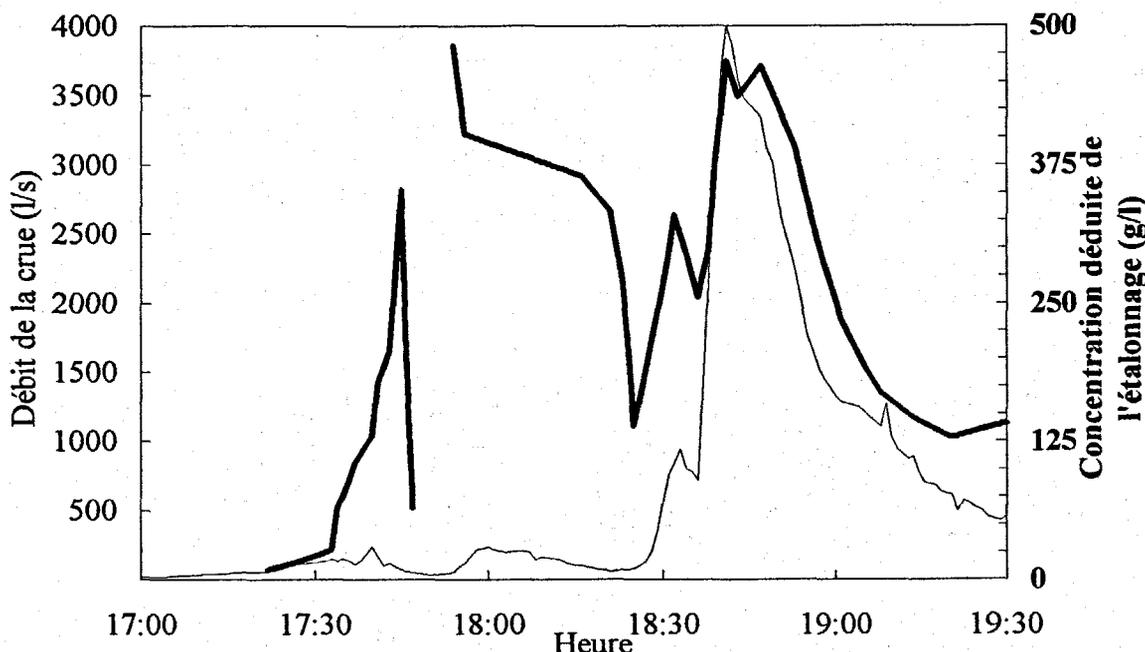


Figure 6 - Crue du 19/05/1996 au Laval avec le débit (—) et la concentration (—)

Nous laissons aux spécialistes des phénomènes d'érosion le soin d'interpréter ces mesures, que nous avons validées ponctuellement par la comparaison avec les données des prélèvements.

3.2. La validation des résultats

Depuis juillet 1995, date de l'installation définitive des deux prototypes sur le site de Draix, nous avons obtenu plus de 150 points de comparaison capteur à fibres optiques/préleveur sur chaque site : le Moulin (fig. 7) et le Laval (fig. 8).

Une régression linéaire sur les points expérimentaux montre qu'ils se répartissent autour d'une droite de pente 1 passant par l'origine avec un écart type estimé à 25 g/l. La pente unité indique que les échantillons utilisés pour l'étalonnage en laboratoire sont représentatifs des marnes mises en suspension lors des crues.

La dispersion des points expérimentaux par rapport à la droite moyenne a plusieurs causes :

- Les préleveurs mesurent la valeur moyenne de la concentration pendant 20 s, alors que le capteur optique mesure une valeur instantanée (temps de réponse inférieur à 1 s). Compte-tenu des temps caractéristiques d'évolution de la concentration au cours d'une crue, le décalage temporel des deux mesures peut conduire à des écarts allant jusqu'à 10 g/l.
- La variation constatée par analyse granulométrique, de la taille des marnes suivant les crues. En effet si les points sont au-dessus de la droite, les marnes sont plus "fines" que celles utilisées pour l'étalonnage et inversement.

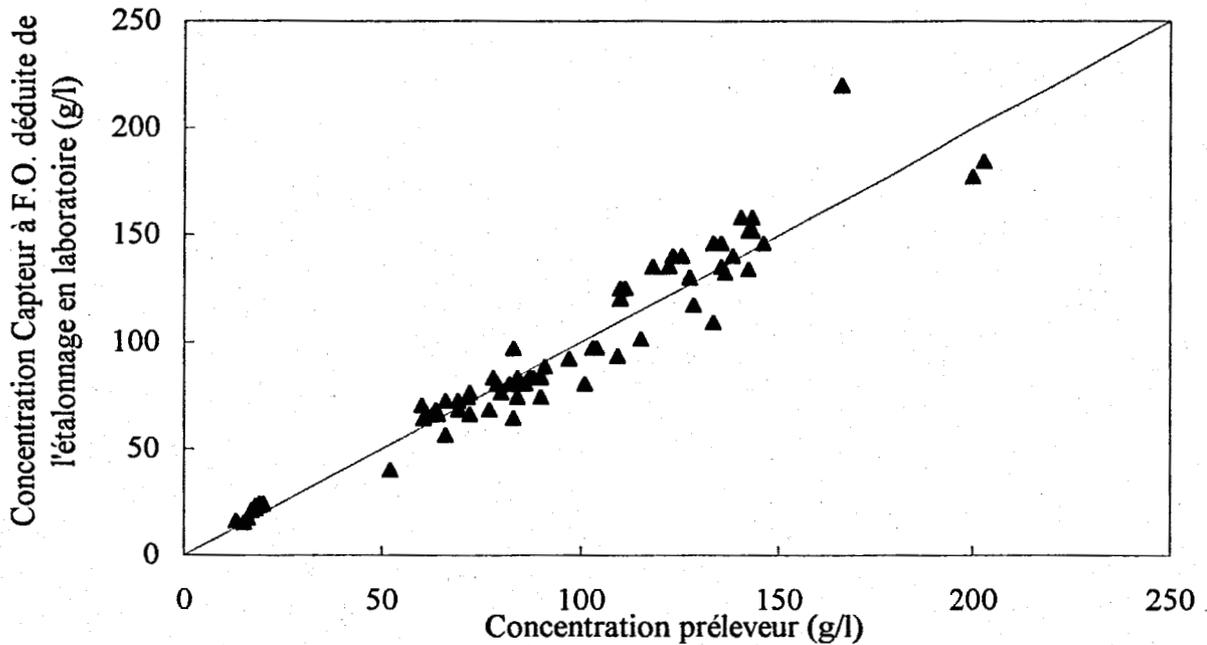


Fig. 7 - Comparaison capteur à fibres optiques/préleveur au Moulin depuis juillet 1995.

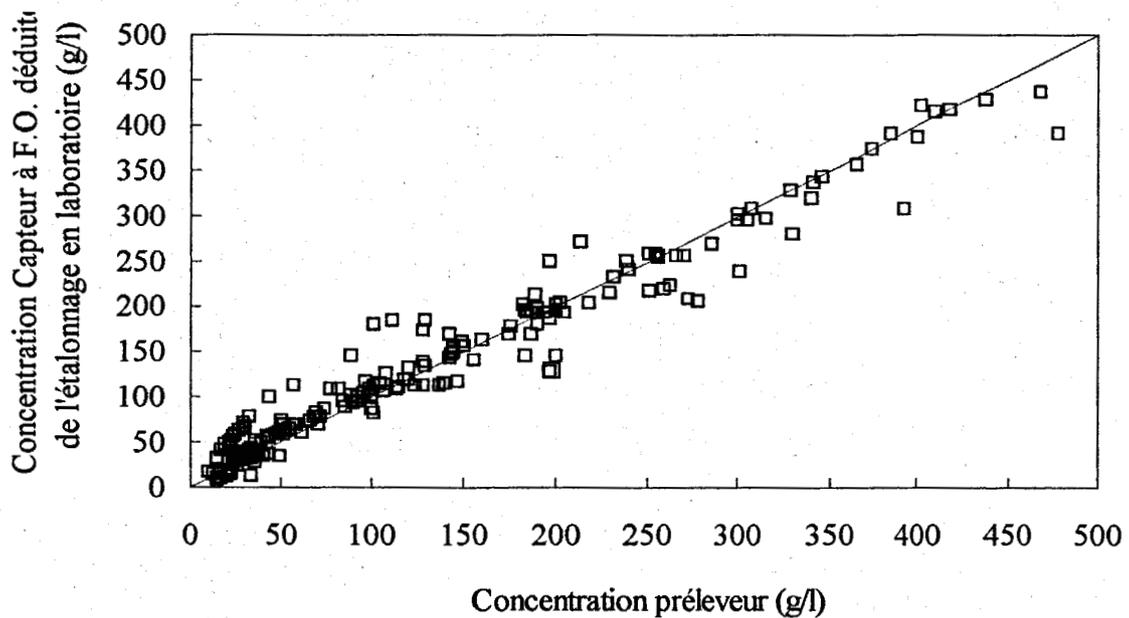


Figure 8 - Comparaison capteur à fibres optiques/préleveur au Laval depuis juillet 1995.

CONCLUSION

Une des caractéristiques des capteurs, basés sur le principe de la diffusion de la lumière, est que leur réponse dépend à la fois de la concentration, de la granulométrie et des propriétés optiques des particules en suspension. Cette multiplicité de facteurs peut faire préférer d'autres types de mesures plus directes telles que l'absorption de rayonnement gamma décrit par MEYER *et al.* (1995), les méthodes ultrasonores exposées par BENECKE (1997) ou les capteurs de pression différentielle étudiés par OLIVIER *et al.* (1995b).

Cependant, les capteurs basés sur la rétrodiffusion de la lumière sont robustes, de mise en oeuvre simple. De plus une bonne tenue dans le temps et une faible consommation électrique 2,5 W en font de bons capteurs de terrains pour la mesure en continu de concentrations de matières en suspension supérieures à 10 g/l.

Pour obtenir une mesure de concentration, il est indispensable de procéder à un étalonnage en laboratoire avec des matériaux représentatifs de ceux présents sur le site, notamment en ce qui concerne la granulométrie des particules. Dans ces conditions, les deux prototypes définitifs, installés depuis juillet 1995, ont une étendue de mesure de 10 à 800 g/l avec une reproductibilité de ± 5 g/l, pour des marnes de densité égale environ à 2,5 et dont le diamètre moyen volume/surface $d_{3,2}$ est 4,2 μm .

Dans les conditions réelles d'exploitation, l'écart type entre les données des préleveurs et notre capteur est de 25 g/l. Pour tester la durabilité des capteurs, nous poursuivons ces comparaisons entre nos mesures et celles des préleveurs, en collaboration avec le Cemagref.

La validation des résultats du capteur optique pourrait être affinée:

- d'une part en comparant la valeur moyenne de la concentration pendant 20 s à celle donnée par les préleveurs et en s'assurant de la simultanéité des mesures,
- d'autre part la comparaison des mesures optiques aux mesures en continu de concentration par capteur de pression différentielle devrait donner une estimation de la surface spécifique de la suspension. Estimation à comparer aux résultats de l'analyse granulométrique des échantillons prélevés.

L'expérience acquise à Draix montre que de tels capteurs fonctionnent de manière satisfaisante dans des conditions sévères. Ils peuvent donc être installés sur d'autres sites où le transport solide est important. Des capteurs, basés sur le même principe physique (rétrodiffusion), permettant des mesures de concentrations inférieures à 30 g/l peuvent être développés moyennant de légères modifications de la géométrie des capteurs et de l'électronique associée.

BIBLIOGRAPHIE

- BENECKE I., 1997 - "Mesures de concentration. Les ultrasons mesurent en ligne des concentrations," MESURES n°695, 87-89.
- BERGOUGNOUX L., MISGUICH-RIPAULT J., FIRPO J.-L., ANDRE J., 1996 - "Monte Carlo calculation of backscattered light intensity by suspension : comparison with experimental data," Applied Optics n°10, 1735-1741.
- BERGOUGNOUX L., 1995 - Diagnostic optique pour la mesure de concentration de matières en suspension. Thèse de l'Université de Provence, Marseille, 173 p.
- BERGOUGNOUX L., MISGUICH-RIPAULT J., FIRPO J.-L., ANDRE J., 1995 - "Mesure in situ de la concentration des matières en suspension : mise au point d'une sonde optique," dans *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 63-77.
- BOHREN C. F., HUFFMAN D. R., 1983 - *Absorption and scattering of light by small particles*, (Wiley, New York), 530 p.
- CEMAGREF, 1988 - *Les bassins versants de Draix, Présentation et synthèse*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 37 p.

- CEMAGREF, 1995 - *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 247 p.
- CHANDRASEKHAR S., 1960 - *Radiative transfer*, (Dover Publications, New York), 1-53.
- MATHYS N., 1995 - "Caractérisation des matières en suspension. Mise au point d'une méthode rapide d'estimation des concentrations des prélèvements," dans *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 25-41.
- MEYER G., MEUNIER M., OLIVIER J. E., 1995 - "Mesure du débit solide des écoulements hyperconcentrés en matériaux fins par une jauge à absorption du rayonnement gamma," dans *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 79-93.
- OLIVIER J.E., PEBAY PEYROULA J.C., 1995a - "L'Ellan, un limnigraphe adapté aux mesures en conditions difficiles," dans *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 13-24.
- OLIVIER J.E., JUGE M., 1995b - "Matériel de mesure de matières en suspension : préleveur d'échantillon et capteur de pression différentielle. Test et étalonnage en canal," dans *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 43-61.
- RYTOV J. M., KRAVSTOV Yu. A., TATARSKII V. I., 1989 - *Principles of Statistical Radiophysics*, (Springer Verlag, Berlin), Vol. 4, 117-131.
- SIMONNET J.P., RICHY P., PARRON C., 1995 - "Contribution à l'étude des mécanismes et bilans de l'érosion chimique des terres noires du bassin de la Durance. Exemple des BVRE de Draix," dans *Compte rendu de recherches n°3 en érosion et hydraulique torrentielle*, (Cemagref ONF-RTM, Grenoble), 189-199.
- VAN DE HULST H. C., 1957 - *Light scattering by small particles*, (Wiley, New York), 453p.

**RESEAU
EROSION**



Référence bibliographique Bulletin du RESEAU EROSION

Pour citer cet article / How to cite this article

Bergognoux, L.; Misguich-Ripault, J.; Firpo, J. L.; André, J. - Capteur à fibres optiques pour la mesure de concentration de matières en suspension, pp. 229-238, Bulletin du RESEAU EROSION n° 17, 1997.

Contact Bulletin du RESEAU EROSION : beep@ird.fr