

---

# Développement d'un système de caractérisation des agrégats et flocs (SCAF)

**Bernard Mercier, Valentin Wendling, Catherine Coulaud, Cédric Legout, Nicolas Gratiot**

*Université Grenoble Alpes/CNRS/IRD, LTHE - UMR 5564, 38041 Grenoble, France*

---

*RÉSUMÉ. L'étude du transport des matières en suspension dans les cours d'eau pour en déterminer les impacts revêt un intérêt grandissant. Il n'existe cependant pas d'instrument capable d'effectuer des mesures de vitesse de sédimentation en temps réel et pour des régimes très concentrés, a fortiori en situation de crue. Pour répondre à ce besoin, un système de caractérisation des agrégats et flocs (SCAF) a été développé. L'appareil a été conçu pour s'intégrer dans un préleveur automatique, d'usage courant en hydrologie. L'une des difficultés principales a consisté à intégrer l'électronique de mesure aux flacons des préleveurs automatiques. Lors de ses évaluations, le SCAF a permis des mesures dans des gammes de concentrations allant jusqu'à plusieurs dizaines de g/l, valeurs courantes pour des cours d'eau de montagne. Outre la détermination des vitesses de dépôt, la méthode de traitement des données permet de calculer un « indice de floculation » caractérisant l'aptitude des particules à s'agglomérer.*

*ABSTRACT. We know little regarding the processes that govern the evolution of suspended particle characteristics during their transport through a river basin. Up to now, no measurement method allows measuring continuously the suspended sediment properties in highly concentrated fluid flows, such as those observed in headwater catchments during runoff events or near bed in muddy estuaries. The Aggregate and Flocculation Characterization System (SCAF) has been developed in order to measure suspended sediment properties for a wide range of concentrations. It has been designed to be easily incorporated into automatic water samplers.*

*MOTS-CLÉS : matières en suspension, floculation, vitesse de chute, absorbance, dispositif intégré, diode émettrice de lumière infrarouge, phototransistor, microcontrôleur.*

*KEYWORDS: suspended solids, flocculation, settling velocity, absorbance, integrated device, infrared light emitting diode, phototransistor, microcontroller.*

---

DOI:10.3166/I2M.15.3-4.45-55 © 2016 Lavoisier

## 1. Introduction

Les cours d'eau transportent en suspension de nombreux matériaux micrométriques à millimétriques d'origine minérale et biologique qui affectent les installations hydrauliques, les écosystèmes et la qualité de l'eau. Ces matières en suspension (MES) sont majoritairement constituées d'agrégats de particules élémentaires pouvant subir de la désagrégation ou de la floculation au cours de leur transport en fonction des conditions hydrodynamiques. Les vitesses de sédimentation des agrégats ou floccs, qui diffèrent significativement de celles des particules élémentaires les constituant, jouent un rôle clé dans la dynamique sédimentaire avec un effet important sur les zones de dépôt. Une bonne connaissance des agrégats et floccs est également essentielle pour des problématiques de qualité des milieux, les polluants pouvant être incorporés aux particules et ainsi être transportés et déposés avec elles. Pour comprendre et modéliser le devenir des sédiments et des polluants associés, les scientifiques, mais aussi les aménageurs ou les opérateurs d'installations hydrauliques doivent pouvoir mesurer les vitesses de sédimentation des particules.

Des techniques de mesure *in-situ* de grandeurs caractérisant les vitesses de sédimentation des MES existent pour les zones côtières, fluviales et estuariennes (Mantovanelli *et al.*, 2006). Ces techniques ne sont toutefois pas transposables aux petits bassins versants de montagne, où les concentrations varient rapidement et peuvent fréquemment atteindre plusieurs dizaines de grammes par litre. Par ailleurs, l'étude de la floculation est difficile lors d'une mesure directe dans une rivière en crue sous l'effet de la turbulence. Afin de mesurer sur site les vitesses de sédimentation et la propension des MES à flocculer immédiatement après leur prélèvement, un système de caractérisation des agrégats et floccs (SCAF) a été conçu et développé au LTHE à Grenoble. Nous présentons ici ce développement.

## 2. Principaux éléments du cahier des charges

Le principe de l'instrument repose sur l'étude de la décantation des MES directement après prélèvement d'échantillons en mesurant l'évolution spatio-temporelle de la turbidité. Pour ce faire, des couples d'émetteurs/récepteurs de lumière sont répartis le long d'une colonne contenant la suspension. Il s'agit de mesurer l'intensité de la lumière reçue par chaque capteur après interaction avec la solution et la variation de cette intensité selon la verticale au cours du temps. La mesure a lieu sur site pendant toute la durée de la décantation. *A priori*, une mesure en transmission (absorbance) ou en rétrodiffusion est possible, déterminée par les positions relatives des émetteurs et des détecteurs. Les signaux lumineux doivent être détectés dans des milieux à forte concentration en MES, typiquement quelques dizaines de grammes par litres.

Le second point important du cahier des charges est de placer le système de mesure dans un préleveur automatique, fréquemment employé dans les stations de

suivi hydro-sédimentaire. En effet, de nombreux scientifiques et opérateurs possèdent déjà de tels appareils pour prélever des échantillons d'eau en rivière ou en lac puis déterminer en laboratoire les concentrations de MES. Ainsi, il sera possible à ces utilisateurs, sur la base de l'existant, d'accéder également et à moindre coût, aux vitesses de sédimentation et propensions à flocculer des MES immédiatement après leur prélèvement.

Les préleveurs automatiques sont équipés de flacons en plastique (24 sur notre modèle) d'une contenance d'environ 1 litre, disposés en corolle. Les échantillons sont recueillis dans les flacons au moyen d'une douchette d'injection décrivant un cercle pour passer d'un flacon à l'autre après remplissage. L'idée est d'incorporer un dispositif de mesure dans chacun des flacons que l'on souhaite équiper. Cette demande du cahier des charges constitue une contrainte en termes de miniaturisation de l'électronique et d'étanchéité. Il est possible de mixer un nombre quelconque de flacons instrumentés avec le complément en flacons d'origine. Dans le contexte d'un dispositif prototype, il a été décidé de ne pas modifier mécaniquement l'appareil commercial de prélèvement ni d'intervenir sur ses fonctions électroniques et logicielles initiales.

### **3. Description du système de mesure**

Les principes de mesure et la configuration générale étant donnés, les principales questions qui se posent sont les suivantes :

- Comment intégrer l'électronique de mesure d'un dispositif dans le flacon d'origine ?
- Un système de pilotage et acquisition étant requis, celui-ci doit-il être centralisé ou propre à chaque dispositif de mesure ?
- Doit-on travailler en transmission ou en rétrodiffusion ?

Ces questions interagissent et la réponse à chacune d'elle a des implications sur celles apportées aux autres.

#### **3.1. Choix de l'architecture du système**

Concernant le premier point, l'électronique du système de mesure étant incluse dans le flacon qui fait office de boîtier, il n'est plus possible de remplir le flacon lui-même. La solution qui a été retenue consiste à utiliser un récipient intermédiaire logeable facilement dans le flacon. Le choix s'est porté sur un tube en verre cylindrique à fond plat d'un diamètre extérieur égal à l'embouchure du flacon et d'une hauteur telle qu'il affleure celle-ci (respectivement 40 mm et 24 cm sur notre modèle). Le tube est en verre pour une transmission optimale et durable du signal lumineux (possibilité de lavage après extraction). Du point de vue du phénomène physique étudié, la réduction du volume recueilli peut altérer la dynamique de

décantation lorsqu'on a affaire à des particules cohésives. Ceci ne semble pas être observé avec un diamètre intérieur de tube de 35 mm.

Un support mécanique a été conçu pour y fixer les cartes électroniques et maintenir le tube. Le flacon a été modifié pour insérer l'ensemble du dispositif (support, cartes et tube de décantation). le fond a été découpé et la base du support constitue le nouveau fond du flacon. Un joint plat étanchéifie cette nouvelle base. Un second joint, torique, placé au niveau de l'embouchure réalise l'étanchéité au sommet du tube. Un connecteur étanche est placé sur la surface supérieure du flacon pour permettre l'alimentation électrique et la communication des données.

La réponse à la deuxième question, concernant le système de pilotage et d'acquisition, est plus simple. D'une part, le nombre de connexions à réaliser vers un système de pilotage et d'acquisition centralisé serait prohibitif. D'autre part, le niveau d'intégration et le coût réduit des composants permettent aujourd'hui d'implanter cette fonction sur chaque dispositif unitaire. La solution mécanique retenue laisse un espace suffisant pour la loger. En contrepartie, il est nécessaire de disposer, en plus des dispositifs de mesure, d'une fonction commune pour leur configuration et le recueil des données, gérant un lien de communication avec eux d'une part, et l'extérieur, d'autre part.

La troisième question relative à la transmission ou rétrodiffusion a été traitée lors de l'étude de faisabilité réalisée hors contexte d'intégration dans un préleveur (thèse V. Wendling, 2015). Un support autonome réalisé à cette occasion permettait de modifier la position angulaire d'une barrette de récepteurs par rapport à une barrette émettrice relativement à l'axe du tube. Les modes transmission et rétrodiffusion ont ainsi été testés. C'est finalement le mode transmission, c'est-à-dire la mesure de l'absorbance de la lumière par les MES, qui a donné les meilleurs résultats. Ceci est principalement dû au fait que, le système ayant été conçu pour étudier les solutions à hautes concentrations, l'intensité lumineuse détectée devient rapidement insuffisante en mode rétrodiffusion.

### ***3.2. Description fonctionnelle d'un dispositif de mesure***

Un dispositif de mesure unitaire comprend 3 fonctions : émission, réception et commande-acquisition, qui vont être présentées. Dans toute cette section, on se référera à la figure 1.

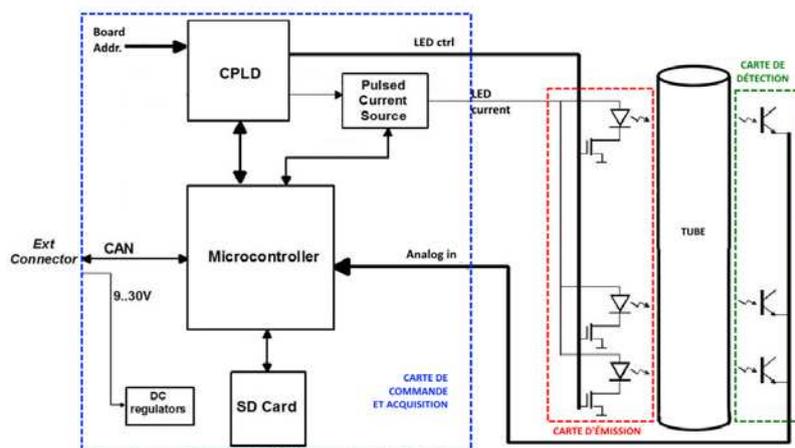


Figure 1. Diagramme du système électronique de mesure et son tube de décantation

### 3.2.1. Fonctions émission/réception

S'agissant de mesurer l'absorption d'un signal lumineux transmis, deux cartes séparées sont nécessaires. La première est équipée d'émetteurs de lumière et la seconde de photo-détecteurs. Les couples émetteurs/récepteurs sont disposés en vis-à-vis selon un diamètre du tube recueil. Ces cartes sont disposées verticalement et affleurent la paroi externe du tube. Les composants optoélectroniques sont à montage de surface (CMS) inverse, c'est-à-dire soudés sur la face arrière des cartes et dirigés vers la surface du tube au travers d'un perçage des circuits imprimés, de sorte que leur partie sensible soit au plus près de cette surface.

Une résolution spatiale de 10 mm a été jugée réaliste, ce qui, compte tenu de la hauteur des flacons et des convenances techniques a conduit au choix de l'utilisation de 16 couples de composants optoélectroniques. Le premier couple étant lui-même placé à 10 mm du fond du tube, la hauteur d'analyse de chute est de 16 cm.

Les émetteurs sont des diodes électroluminescentes (LED) à haute intensité lumineuse (40 mW/sr) et faible angle d'émission ( $\pm 12^\circ$ ), dont le rayonnement est centré sur 850 nm. Chaque LED est dotée d'un dispositif de commutation (transistor MOS) qui leur permet d'être allumées en séquence (figure 2). On élimine ainsi toute ambiguïté sur l'origine du signal lumineux détecté à un instant donné. De plus, cela permet de respecter les valeurs maximales données par le constructeur relatives à la durée d'éclairement et la période de répétition des impulsions pour le courant le plus fort sous lequel les LED sont amenées à être alimentées. Comme le montre la figure 2, il existe un temps d'extinction totale entre les périodes d'émission de deux LED consécutives, qui sera mis à profit lors de la mesure. Dans notre cas, la durée d'éclairement d'une LED est de 100  $\mu$ s, le temps séparant les allumages de deux

diodes successives est de 625  $\mu$ s, soit un balayage de la barrette complète en 10 ms. L'alimentation des LED est commune et s'effectue en courant, dont la valeur est programmable.

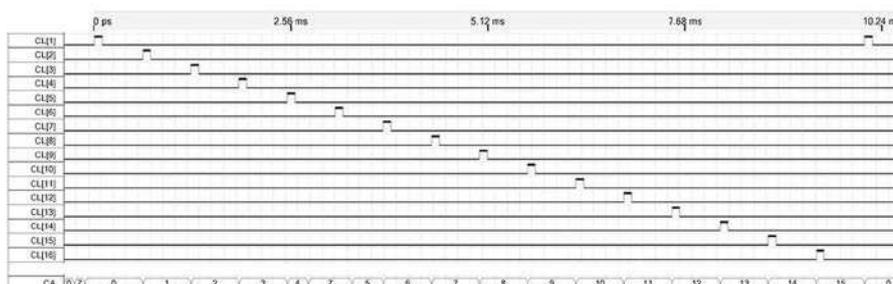


Figure 2. Séquence d'allumage des LED

Les détecteurs sont des phototransistors dont la bande passante va de 730 à 1000 nm, avec un pic de sensibilité à la longueur d'onde émise par les LED. Ils sont insensibles aux longueurs d'onde visibles, ce qui améliore le rapport signal à bruit de la mesure. Chaque phototransistor est suivi d'un amplificateur adaptant le signal à l'entrée des convertisseurs analogiques/numériques utilisés pour l'acquisition.

### 3.2.2. Partie pilotage-acquisition

C'est la troisième carte du dispositif. Ses quatre fonctions essentielles sont :

- la génération des signaux de commande des commutateurs de LED ;
- l'acquisition des signaux analogiques de mesure en les convertissant en valeurs numériques ;
- le stockage des valeurs dans une mémoire électronique sous forme de fichiers de données, après prétraitement des signaux de mesure numérisés ;
- la communication avec l'extérieur pour paramétrer le dispositif ou envoyer les fichiers de mesure.

Cette carte accueille aussi les fonctions : régulation de tension et source de courant programmable des LED.

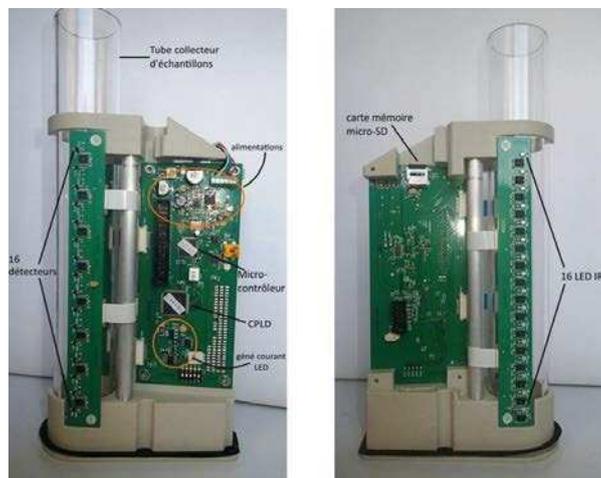
La présence de fonctions telles que le stockage de données en mémoire et de communication implique l'utilisation d'un microcontrôleur. Il est apparu judicieux de choisir un modèle intégrant un convertisseur analogique-numérique et un multiplexeur doté de 16 entrées. Cette fonctionnalité n'est pas très courante mais elle a pu être satisfaite avec un microcontrôleur de la famille STM32 qui dispose des 16 entrées analogiques et d'un convertisseur analogique/numérique d'une résolution de 12 bits. Il dispose par ailleurs de toutes les autres fonctions nécessaires, tel le

pilotage d'un bus SPI utilisé pour la mémorisation des données dans une carte micro-SD, et de bus de communication type USB ou CAN (*Controller Area Network*).

La donnée de mesure de chaque détecteur est obtenue à chaque pas de temps par différence des valeurs des signaux lumineux reçus pendant la période d'allumage et pendant la période d'extinction pour s'affranchir d'éventuels signaux parasites. Le balayage de la barrette de détecteurs requiert, on l'a vu, 10 ms. La période entre deux balayages successifs ainsi que le nombre de cycles de mesure successifs sur lesquels on peut réaliser une moyenne pour constituer la donnée mémorisée sont tous deux paramétrables.

Le pilotage des commutateurs de LED est assuré par un circuit logique programmable (CPLD), pour ne pas avoir à solliciter trop de broches d'entrées/sorties du microcontrôleur ni surcharger son programme. On assure ainsi une régularité absolue des temps. Un mécanisme de synchronisation est en place entre les deux circuits.

Concernant la communication vers l'extérieur, on a opté pour le bus CAN, bus série à deux fils bien adapté pour gérer les 24 flacons instrumentés. Le microcontrôleur choisi possède une interface pour ce type de bus. Une adresse est affectée à chaque carte, permettant de reconnaître le flacon.



*Figure 3. Cartes électroniques montée sur support  
a) carte de détection (à gauche) et face dessus de la carte de contrôle (à droite)  
b) face dessous de la carte de contrôle (à gauche) et carte d'émission (à droite)*

L'alimentation est commune à tous les dispositifs unitaires et fournie depuis l'extérieur de ces dispositifs. Celle utilisée pour le préleveur automatique (batterie12

ou 24 V) peut être employée à cet effet. La puissance consommée par un flacon est de 1 W.

La figure 3 donne un aperçu de la réalisation, avec les trois cartes montées sur le support interne. La liaison des deux cartes optoélectroniques avec la carte de commande s'effectue par nappe flexible. Le dispositif une fois intégré au bidon est montré figure 4a.

L'appareil complet nécessite un dispositif supplémentaire. Ce dispositif commun a une fonction de contrôleur de bus CAN et d'interface USB pour la connexion à un ordinateur lors des phases de paramétrage des dispositifs et de récupération des données (figure 4b).



Figure 4. a) Flacon instrumenté, b) base de préleveur dotée de flacons instrumentés et de l'interface CAN-USB

#### 4. Traitement des données

Le système fournit les variations temporelles de l'éclairement reçu par les 16 photo-détecteurs sous la forme de valeurs de tension. Un exemple d'allure des courbes de mesure des tensions pour 7 des 16 capteurs est donnée en figure 5. L'absorbance à un instant  $t$  et à une hauteur  $h$ , donnée par la loi de Beer-Lambert :

$$A(t, h) = -\log\left(\frac{I_m(t, h)}{I_0}\right) \quad (1)$$

où  $I_m(t, h)$  est l'intensité lumineuse mesurée à cet instant et  $I_0$  celle de l'eau pure (pour le détecteur à la hauteur  $h$ ), se redéfinit à partir des tensions mesurées  $V_m$ , de sorte que :

$$A(t, h) = -\log\left(\frac{V_m(t, h)}{V_0}\right) \quad (2)$$

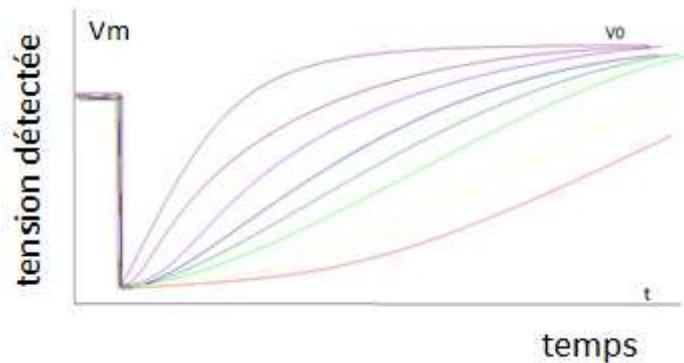


Figure 5. Allure des courbes de mesure de tension des photo-détecteurs au cours du temps (7 représentés sur les 16 présents dans le dispositif)

À partir des valeurs d'absorbances reportées dans une matrice [hauteur, temps], on trace  $n$  courbes d'iso-absorbance ( $A_n$ ),  $n$  étant défini par l'utilisateur en fonction de la résolution souhaitée pour décrire les différentes populations de particules (figure 6). La méthode appliquée aux iso-concentrations présentée dans (Piro *et al.*, 2011) a été étendue aux iso-absorbances (Wendling *et al.*, 2015) afin de suivre la disparition progressive des populations de particules chutant les plus vite de la colonne de sédimentation. Pour chaque iso-absorbance, les vitesses de sédimentation à la surface ( $W_{surface}$ ) et au fond du tube ( $W_{fond}$ ) correspondent aux pentes des droites ajustées (figure 6b). En effectuant ces ajustements pour chaque iso-absorbance, on en déduit une distribution des vitesses de sédimentation caractérisant les différentes populations de particules de la suspension. Pour des matériaux non cohésifs tels les sables, les particules chutent à vitesse constante et les courbes d'iso-absorbance sont linéaires (Figure 6a). Lorsque les particules s'agrègent pendant leur dépôt, leur vitesse de sédimentation augmente au cours du temps (Figure 6b). Le rapport entre les vitesses au fond du tube et celles à la surface fournit un indice (IF) caractérisant la propension du matériau à flocculer et défini comme suit :

$$IF(A_n) = \frac{W(A_n)_{fond} - W(A_n)_{surface}}{W(A_n)_{surface}} \quad (3)$$

Cet indice varie de 0 pour des matériaux non cohésifs comme dans la figure 6a à des valeurs pouvant atteindre 50 pour des MES très cohésives.

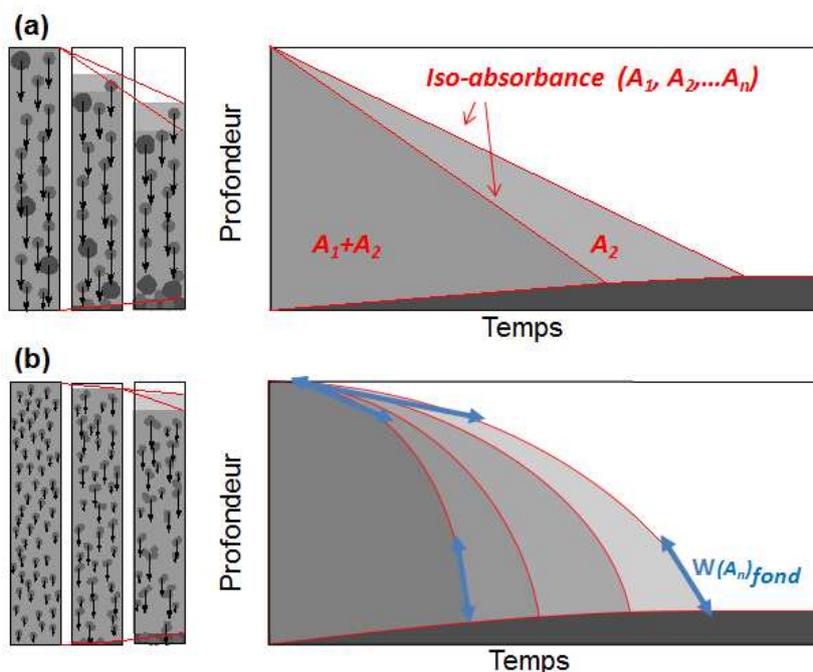


Figure 6. Représentation schématique de l'évolution des absorbances pour des suspensions composées de : a) 2 types de particules non cohésives et b) particules qui flocculent au cours de leur sédimentation. Les iso-absorbances  $A_n$  sont tracées en rouge. Pour chacune de ces iso-absorbances, des droites peuvent être ajustées à la surface et au fond du tube comme indiqué en bleu dans (b). Les pentes de ces droites correspondent aux vitesses de sédimentation des particules, respectivement à la surface ( $W_{surface}$ ) et au fond du tube ( $W_{fond}$ )

Lors de son utilisation, le SCAF a montré sa capacité à traiter des solutions dans des gammes de concentrations allant de quelques dizaines de milligrammes par litre à plusieurs dizaines de grammes par litre, ce qui répond au besoin initial. Au-delà d'une dizaine de grammes par litre, le faisceau lumineux n'est plus détecté, et c'est la descente de l'interface eau claire-sédiments qui est suivie. Les essais ont toutefois montré la nécessité de prendre en compte la dispersion des caractéristiques des couples optoélectroniques. Ceci est actuellement réalisé par une intercalibration préalable des capteurs.

## 5. Conclusion et perspectives

Un système de caractérisation des agrégats et floccs a été développé pour mesurer sur site les vitesses de sédimentation et la propension à flocculer des MES immédiatement après leur prélèvement.

Des prototypes autonomes non intégrés en station de suivi hydro-sédimentaire ont été réalisés en plusieurs exemplaires. Ils sont utilisés par des chercheurs et des ingénieurs (EDF) pour caractériser la dynamique des rivières turbides lors de campagnes de terrain en complément des mesures de concentration en MES. Une méthode de traitement et d'analyse des données a été développée au cours d'un travail de thèse (Wendling, 2015). Les mesures ont montré la capacité de l'appareil à caractériser des solutions dans de larges gammes de concentration.

Forts de ces résultats, la version intégrée dans un préleveur automatique a été développée. Son fonctionnement, autonome, sur le terrain fera l'objet des prochaines validations.

À cette étape du développement, le SCAF démontre un grand potentiel pour une caractérisation des vitesses de sédimentation et de la propension à flocculer des MES dans des conditions hydro-sédimentaires extrêmes. L'intérêt des scientifiques pour ces nouvelles mesures nous incitent maintenant à rechercher des coopérations en vue d'un transfert technologique.

#### *Remerciements*

*Ce dispositif a bénéficié de financements de l'INSU (EC2CO BIOHEFECT), de l'ANR dans le cadre d'un projet Jeunes Chercheurs (ANR-12-JS06-0006) et du soutien d'EDF.*

#### **Bibliographie**

- Mantovanelli A., Ridd P.V. (2006). Devices to measure settling velocities of cohesive sediment aggregates: A review of the in situ technology. *Journal of Sea Research*, vol. 56, n° 3, p. 199-226
- Piro P., Carbone M., Penna N., Marsalek J. (2011). Characterization of the settling process for wastewater from a combined sewer system. *Water Research*, vol. 45, n° 20, p. 6615-6624
- Wendling W., Gratiot N., Legout C., Droppo I. G., Coulaud C., Mercier B. (2015). Using an optical settling column to assess suspension characteristics within the free, flocculation, and hindered settling regimes. *J. of Soils & Sediments*, vol. 15, n° 9, p. 1991-2003

