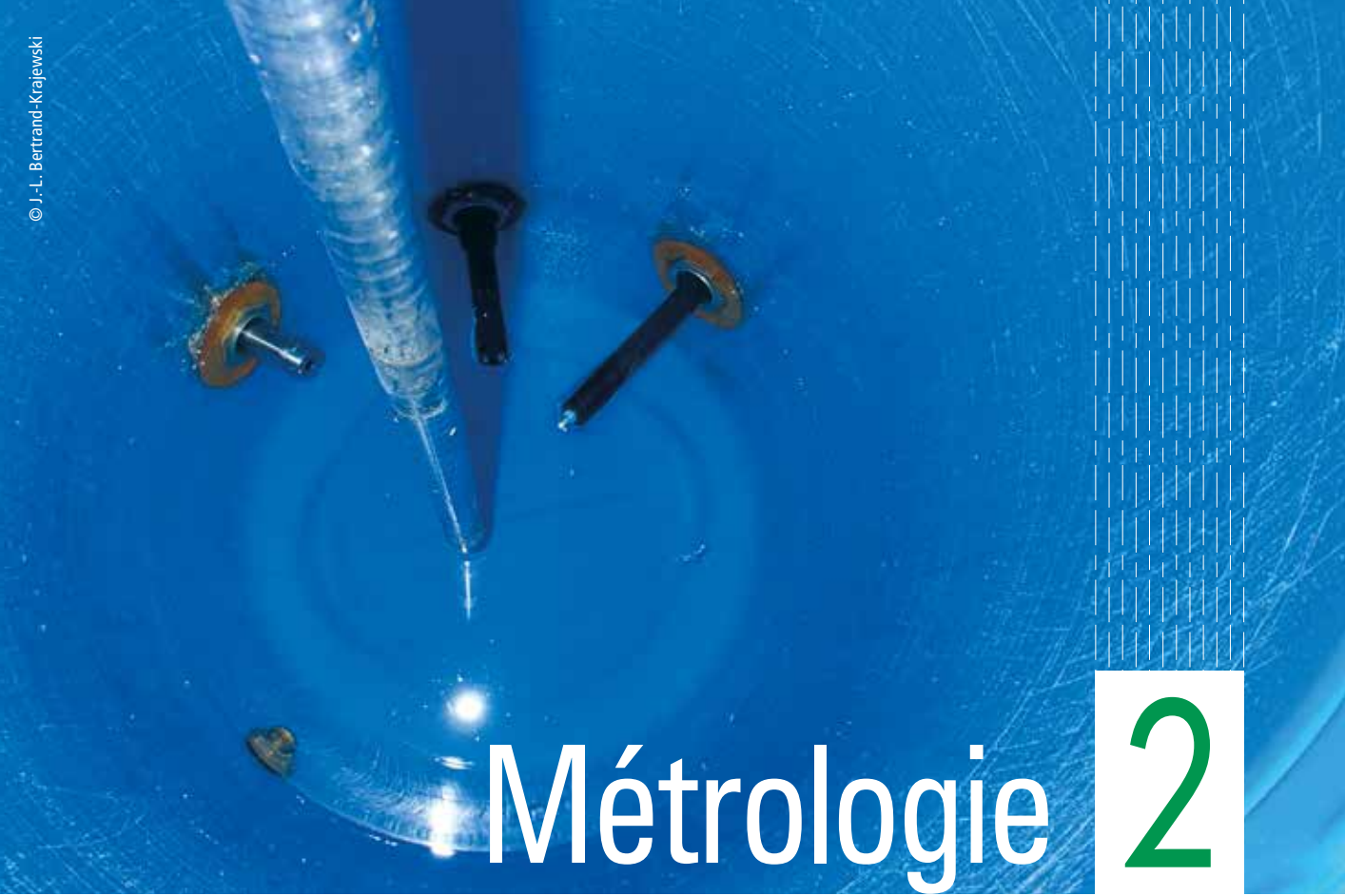




Métrologie 2

L'OTHU est un observatoire. Observer nécessite des dispositifs métrologiques spécifiques pour mesurer les grandeurs auxquelles s'intéresse l'observateur, avec des exigences définies quant à la qualité et la disponibilité des données. En hydrologie urbaine, les échelles spatiales d'observation vont de quelques dizaines de m^2 pour les techniques de gestion à la source des eaux pluviales à quelques km^2 pour les bassins versants urbains séparatifs ou unitaires. Les échelles de temps vont de la minute pour mesurer l'intensité des précipitations au pluriannuel pour évaluer avec fiabilité l'efficacité des ouvrages de gestion et de traitement des rejets urbains de temps de pluie (RUTP).

Les travaux de l'OTHU ont permis de progresser en métrologie sur de nombreux aspects, dont certains sont présentés dans ce chapitre. Il s'agit en premier lieu d'adapter les dispositifs métrologiques aux échelles de temps et d'espace pertinentes pour chaque site de mesure, ainsi qu'aux gammes des grandeurs à mesurer. Il s'agit ensuite de les faire évoluer régulièrement grâce aux connaissances et à l'expérience acquises, tant en réseau et sur les déversoirs d'orage que pour les techniques de gestion à la source. Les observations ayant montré l'extrême variabilité des rejets urbains de temps de pluie, il faut envisager les mesurages sur des longues durées pour obtenir des résultats représentatifs. Le mesurage en continu par des capteurs apporte une meilleure compréhension de la dynamique des phénomènes que les analyses sur échantillons qui restent néanmoins encore indispensables pour de nombreux polluants. Les grandeurs physico-chimiques ne donnant qu'une vision partielle des impacts des RUTP sur les milieux aquatiques, le monitoring biologique *in situ* est un complément indispensable. Enfin, adopter des pratiques métrologiques rigoureuses est nécessaire pour assurer la qualité et la disponibilité des données, de l'étalonnage des capteurs jusqu'à l'estimation des incertitudes.

Pourquoi, quoi et comment mesurer pour mieux comprendre le fonctionnement d'un bassin versant ?

Flora Branger, INRAE Lyon - Bernard Chocat, INSA Lyon

Les bassins versants urbains et périurbains sont des systèmes particulièrement complexes où se mêlent des composantes naturelles (cours d'eau, nappe, végétation) et artificielles (réseaux d'assainissement, ouvrages) du cycle de l'eau. Connaître, comprendre et modéliser les flux d'eau et de polluants nécessite donc de construire un réseau d'observations hydrologiques adapté dans le temps et dans l'espace ainsi que dans le choix des variables mesurées.

Le bassin versant, une notion fondamentale en hydrologie

Des phénomènes hydrologiques extrêmement complexes

Les phénomènes hydrologiques observables, par exemple les flux d'eau et de polluants observés en un point particulier suite à un événement pluvieux, constituent la résultante d'un très grand nombre de phénomènes élémentaires qui se déroulent simultanément et/ou séquentiellement et qui interagissent les uns avec les autres. Une pluie est constituée d'une multitude de gouttes et, en théorie, il devrait être possible de suivre individuellement chacune des molécules d'eau qui les composent de façon à comprendre comment elles interagissent entre elles et avec les autres composantes du milieu pour produire ces flux.

Les forces en jeu, du moins en hydrologie quantitative, c'est à dire pour les flux d'eau, sont relativement peu nombreuses : ce sont principalement celles dues à la gravité, aux interactions entre l'eau et l'atmosphère (condensation et évapotranspiration), et aux interactions entre l'eau et l'air dans les sols. Les hydrologues sont cependant confrontés à une difficulté irréductible : la complexité extrême du milieu physique où ces forces s'appliquent. En pratique, la surface et les couches de plus en plus profondes du sol ne peuvent en effet pas être décrites avec une précision suffisante pour pouvoir expliciter la genèse des flux comme une résultante de l'ensemble des forces élémentaires appliquées à des molécules d'eau.

Le bassin versant est l'échelle d'étude pertinente pour comprendre et modéliser

Il est donc nécessaire de raisonner à une échelle d'espace plus grande, conventionnellement celle d'un bassin versant élémentaire, généralement défini comme une portion de territoire de quelques hectares à quelques kilomètres carrés, possédant un ou plusieurs exutoire(s) vers le(s)quel(s)

converge(nt) les flux étudiés. À cette échelle on peut alors appliquer une modélisation holistique (c'est à dire une modélisation globale) des phénomènes, sans nécessairement tenter de relier explicitement cette modélisation aux lois élémentaires qui régissent les écoulements à l'échelle microscopique. Ce n'est que lorsque les flux commencent à se concentrer dans un milieu suffisamment homogène pour être décrit simplement (une rivière, une conduite, une nappe...) que l'on peut utiliser efficacement un modèle dit à base physique. Le bassin versant est donc l'échelle à laquelle on souhaite connaître, comprendre et modéliser les flux d'eau et de polluants.

Pourquoi observer les bassins versants en milieu urbain et périurbain ?

Les bassins versants peuvent avoir des surfaces très variables. En milieu urbain et périurbain, on s'intéresse en général à des bassins de quelques dizaines de mètres carrés à plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Souvent, selon les besoins de la recherche ou de l'étude, ils sont imbriqués les uns dans les autres. Le bassin versant le plus grand peut ainsi être décomposé en sous bassins versants, qui peuvent eux-mêmes être décomposés en sous-sous-bassins versants, etc. Dans tous les cas, il s'agit de systèmes complexes dans lesquels l'ensemble des composantes du cycle de l'eau sont en interaction, qu'elles soient naturelles (nappe, cours d'eau, végétation) ou artificielles (réseaux d'assainissement, ouvrages de gestion des eaux pluviales). La diversité de l'occupation des sols, allant de l'urbain dense aux zones agricoles et forestières dans le cas des bassins versants périurbains, ajoute encore de la complexité. C'est au niveau du bassin versant que l'on étudie les impacts sur le milieu, cours d'eau ou nappe, aussi bien d'un point de vue quantitatif (inondations, assèchement de cours d'eau, baisse de la nappe, érosion, incision, etc.) que qualitatif (concentrations et flux de polluants, qualité écologique du milieu). C'est aussi l'échelle à laquelle la gestion des eaux pluviales est réalisée, que les ouvrages de gestion soient centralisés ou qu'ils soient disséminés à travers le bassin.

Bien observer pour bien modéliser

La notion de bassin versant est toujours liée, de façon plus ou moins explicite, à celle de modélisation, que ce soit pour mieux comprendre les phénomènes et/ou pour mieux gérer le fonctionnement d'un ouvrage. La modélisation permet en particulier de quantifier les flux des différents compartiments hydrologiques du bassin (pluie, évapotranspiration, infiltration vers la nappe, ruissellement, écoulement dans le cours d'eau, etc.), utiles pour le dimensionnement d'ouvrages et/ou pour la réalisation d'études prospectives (changement climatique, évolution de l'occupation du sol, etc.). Ces modèles requièrent obligatoirement d'être construits, calés et vérifiés avec des données d'observation. C'est pourquoi il est important de

bien construire les réseaux d'observation hydrologiques à une échelle spatiale compatible avec celle à laquelle on souhaite construire les modèles de représentation des bassins versants. Les recherches de l'OTHU ont principalement porté sur la connaissance des flux d'eau produits par les bassins périurbains et sur les flux d'eau et de polluants produits par des bassins versants plus urbanisés.

Quelles variables mesurer ?

Si l'on s'intéresse uniquement aux flux d'eau, la démarche à adopter consiste à considérer le bilan hydrologique d'un bassin versant: entrées et sorties d'eau (figure 1). Les entrées principales sont la pluie et parfois les eaux usées dans le cas des réseaux unitaires. Les sorties principales sont l'évapotranspiration (qui regroupe l'évaporation de l'eau sur les surfaces et la transpiration des végétaux), et le débit à l'exutoire ou aux exutoires naturel(s) et artificiel(s) du bassin: cours d'eau, nappes souterraines et réseaux d'assainissement.

La pluie et les débits sont des variables que l'on peut mesurer à l'aide d'appareils d'usage courant (pluviomètres, capteurs de hauteur d'eau, débitmètres). Le mesurage de l'évapotranspiration est plus délicat et nécessite une instrumentation coûteuse qui n'est pas à la portée de collectivités ou de laboratoires non spécialistes. Cependant il est possible d'obtenir des chroniques d'évapotranspiration, issues de modèles spécialisés et disponibles sur l'ensemble du territoire français, auprès de Météo-France. Le mesurage d'autres variables hydrologiques est utile pour avoir une idée plus précise de la répartition des flux à l'intérieur du bassin versant. On peut par exemple mesurer l'humidité du sol, à l'aide de sondes dédiées, et/ou la profondeur de la nappe, au moyen de sondes piézométriques. À la différence des variables précédentes, il ne s'agit pas de variables de bilan, mais de variables ponctuelles, la valeur mesurée à un endroit donné n'étant pas représentative de l'ensemble du bassin versant. Plusieurs points de mesure peuvent donc s'avérer nécessaires.

Le mesurage des flux de polluants est beaucoup plus difficile. Différentes grandeurs physiques (en particulier conductivité, pH, turbidité et température de l'eau) peuvent être mesurées

assez facilement en continu à l'exutoire du bassin versant. Certaines autres grandeurs (MES, voire la DCO et l'azote) peuvent dans certains cas en être déduites. Cependant, dans la plupart des cas, il est nécessaire d'effectuer des prélèvements d'échantillons d'eau et de les analyser pour déterminer la concentration des polluants que l'on souhaite suivre. Ces prélèvements, ainsi que leur conservation et leur analyse, doivent être effectués dans des conditions rigoureuses si l'on veut être capable d'estimer les flux avec une incertitude acceptable.

À ces mesurages des flux sortant du bassin versant il est également nécessaire d'associer d'autres mesurages ponctuels:

- pour identifier l'origine des flux: composition de l'eau de pluie, contribution des retombées sèches ou des différents types de surfaces urbaines;
- ou pour connaître l'efficacité des ouvrages de gestion: analyse des sédiments décantés ou de la qualité des eaux sous les ouvrages d'infiltration par exemple.

Comment mesurer ?

Dans le temps

Si l'on veut suivre le fonctionnement d'un bassin versant sur la durée et notamment réaliser des bilans, il est important de réaliser un suivi en continu, c'est-à-dire même par temps sec. Il convient donc de s'assurer de la possibilité et de la qualité des mesures même lorsqu'il ne pleut pas. Que ce soit en cours d'eau ou en réseau, cela conduit à l'installation de dispositifs métrologiques permettant de mesurer de manière fiable les débits de temps sec, même lorsqu'ils sont faibles (photo 1). Un autre aspect important est le pas de temps d'acquisition de la donnée, qui doit être adapté à la taille et à la réactivité du bassin versant. Les bassins urbains ont en général des temps de réaction très courts, il faut donc être capable de descendre à la minute pour mesurer la pluie et les débits.

Dans l'espace

La stratégie de déploiement des mesurages dans l'espace doit avant tout tenir compte de la taille du bassin versant. Au-delà de quelques kilomètres carrés, il faut en général plusieurs

Figure 1 : Schéma synthétique des principaux termes du bilan hydrologique sur un bassin versant urbain ou périurbain.
(Source : F. Branger, INRAE)

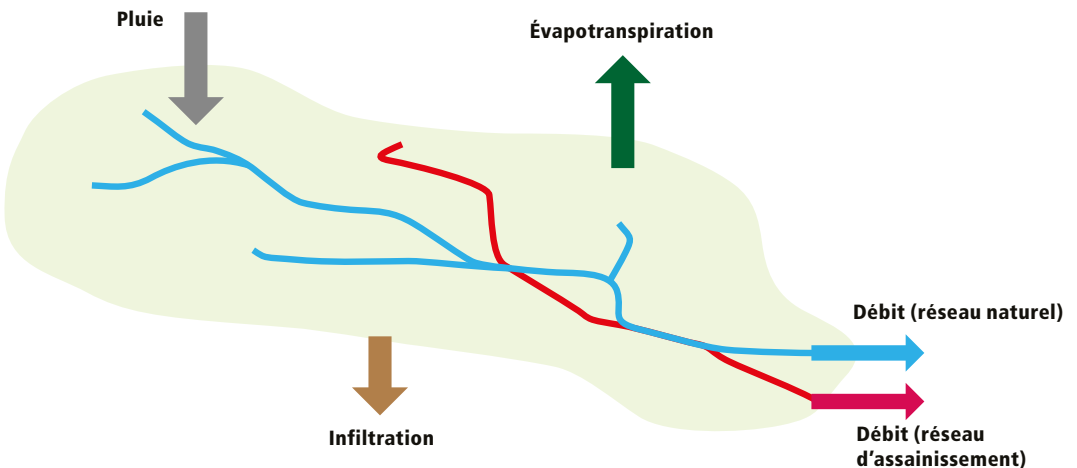


Photo 1 : Station hydrométrique du Ratier à Saint-Genis les Ollières sur le site OTHU du bassin versant de l'Yzeron. La station est équipée d'un seuil béton et d'un déversoir triangulaire pour une bonne qualité de mesure des bas débits (source : Mickaël Lagouy, INRAE, 2011).



pluviomètres de façon à tenir compte de la variabilité spatiale de la pluie, surtout pour les événements convectifs de type orages d'été qui peuvent être très localisés. De ce point de vue, les radars météorologiques apportent une information spatialement distribuée très intéressante, en complément des pluviomètres au sol. Au niveau des débits, l'idée est aussi d'estimer la répartition des flux à l'intérieur du bassin versant, en déployant des mesures au niveau de différents sous-bassins. Ces sous-bassins peuvent être aussi choisis pour échantillonner différentes occupations du sol d'intérêt (rural/urbain, ou zone résidentielle/zone industrielle). Il faut également inclure les réseaux d'assainissement souterrains et

instrumenter les principaux exutoires ou points de séparation des réseaux lorsque cela est possible.

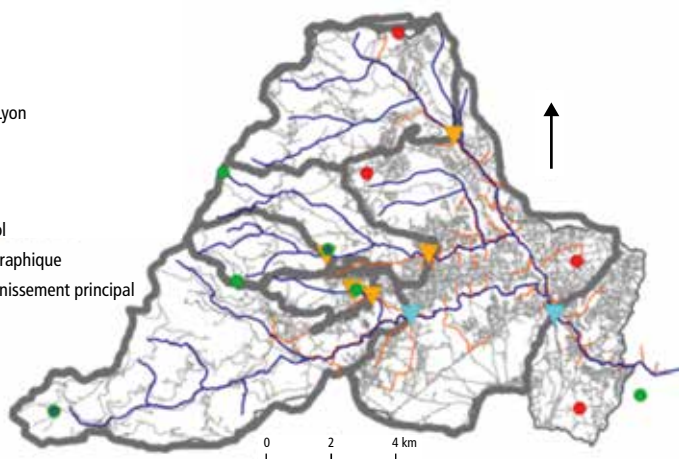
L'instrumentation des bassins versants suivis par l'OTHU

Bassin périurbain de l'Yzeron: une meilleure connaissance des flux d'eau

20 ans d'observation par l'OTHU ont permis de mettre au point une stratégie de mesure adaptée sur le bassin versant

Figure 2 : Instrumentation en 2020 pour le suivi des flux d'eau sur le site OTHU du bassin versant de l'Yzeron. Les décalages dans les contours des sous-bassins sont dus à la modification des zones drainées par le réseau d'assainissement.

- Légende**
- Pluie**
- INRAE
 - Métropole de Lyon
- Débit**
- ▼ INRAE
 - ▼ DRÉAL
 - ★ Humidité du sol
 - Réseau hydrographique
 - Réseau d'assainissement principal
 - ▭ Sous-bassins



périurbain de l'Yzeron (150 km²). Plusieurs petits bassins versants, aux occupations du sol contrastées, ont été instrumentés, comme les sous-bassins du Mercier (forêt et cultures) et de la Chaudanne (cultures et périurbain). Puis les autres stations ont été positionnées de façon à instrumenter les principaux affluents de l'Yzeron (Ratier, Charbonnières) et à emboîter les bassins versants les uns dans les autres (figure 2). Six pluviomètres de recherche, complétés par quatre pluviomètres de la métropole de Lyon, fournissent une vision spatialisée de la pluie sur le bassin. Ces données sont utilisées pour alimenter et évaluer des modèles hydrologiques distribués, représentant la variabilité spatiale des occupations du sol, des sols et des réseaux.

Bassins urbains: une meilleure connaissance des flux de polluants

Dans le cas des bassins versants urbains, les travaux de l'OTHU ont principalement apporté une bien meilleure connaissance des flux de polluants produits par temps de pluie: concentrations, flux événementiels ou annuels, origines, devenir dans le réseau et dans les ouvrages. Au-delà des indicateurs classiques (MES, DCO, DBO, hydrocarbures, azote, etc.), des avancées très importantes ont été faites sur de nombreux micropolluants (métaux, HAPs, pesticides, etc.). Les approches mises en œuvre ont permis d'obtenir des valeurs moyennes et d'évaluer les incertitudes.

Point de vocabulaire:

- Mesurage:** Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.
- Mesurande:** Grandeur particulière soumise à un mesurage.

En Bref...

Il est important de disposer d'un réseau de mesure fiable pour étudier le fonctionnement des bassins versants. Le mesurage de la pluie et des débits en continu à des pas de temps adaptés est indispensable. Le mesurage en continu de grandeurs physiques, comme la turbidité, permet de réduire les incertitudes sur les flux de nombreux polluants. Il faut également prendre en compte la dimension spatiale, notamment en installant si nécessaire plusieurs pluviomètres et en déployant une stratégie de sous-bassins emboîtés pour le mesurage des débits et des flux polluants.

POUR ALLER PLUS LOIN

- **Perrault P.** (1674). *De l'origine des fontaines* – Pierre Le Petit, Imprimeur, Paris, 1674, 59 p. (Référence historique : le premier bilan hydrologique connu sur le bassin de la Seine) - [lc.cx/perrault1674](#)
- **Braud I., Breil P., Thollet F., Lagouy M., Branger F., Jacqueminet C., Kermadi S. & Michel K.** (2013). *Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a medium-sized periurban catchment in France*. Journal of Hydrology, 485, 5-23, doi:10.1016/j.jhydrol.2012.04.049 - [lc.cx/braud2013](#)

Pourquoi le suivi métrologique de long terme de la qualité des rejets urbains par temps de pluie est-il nécessaire ?

Jean-Luc Bertrand-Krajewski, INSA Lyon

En milieu urbanisé, les rejets des réseaux séparatifs d'eau pluviale et des déversoirs des réseaux unitaires sont une source de contamination importante des eaux de surface. De nombreux exploitants de réseau d'assainissement et gestionnaires de milieux naturels réalisent des campagnes de mesures afin de quantifier et qualifier ces rejets polluants. Mais, contrairement aux pratiques bien ancrées, le mesurage de quelques événements pluvieux pris au hasard ne suffit pas pour caractériser de manière fiable et représentative les flux polluants, et peut même aboutir à des conclusions biaisées.

Les faits

Les concentrations et flux de polluants par temps de pluie sont très variables et imprévisibles

La qualité des rejets urbains de temps de pluie, c'est-à-dire les concentrations et flux de polluants qu'ils transportent, est caractérisée par sa très grande variabilité, à la fois d'un événement pluvieux à un autre, et au sein même des événements pluvieux. Ils se différencient ainsi des eaux usées domestiques qui, dans la plupart des cas, présentent une régularité marquée des débits et des concentrations à l'échelle journalière.

En effet, d'un événement pluvieux à l'autre, les propriétés de la pluie (durée, intensité, période sèche précédente,

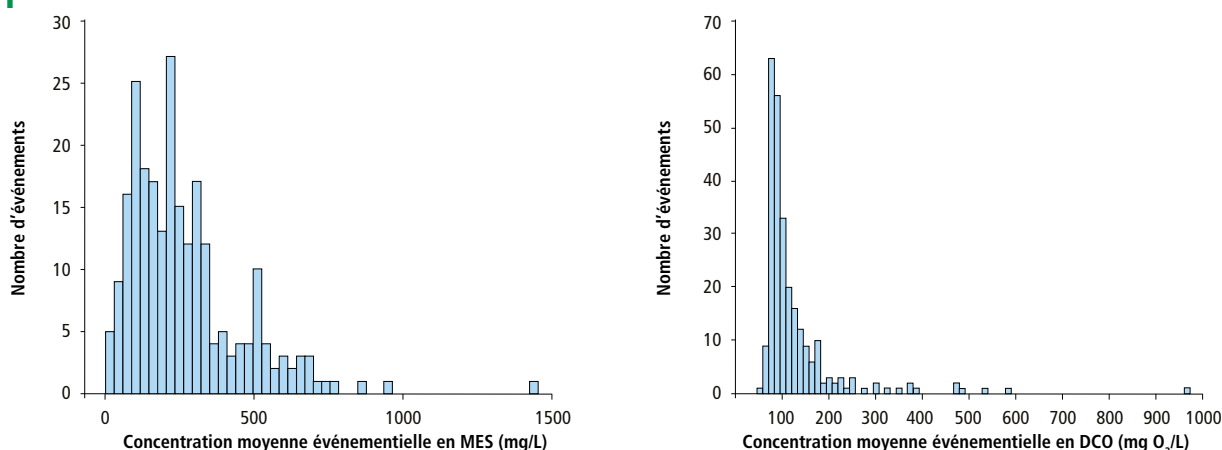
historique des événements antérieurs) varient de façon aléatoire. Le transport des polluants par les gouttes de pluie et le lavage de l'atmosphère lié à la chute des gouttes sont des facteurs également très variables. De même, l'accumulation et la disponibilité des polluants sur les surfaces du bassin versant et dans les collecteurs et ouvrages des réseaux d'assainissement au moment où la pluie survient présentent une forte variabilité. Il en résulte nécessairement que les concentrations moyennes événementielles en polluants et les flux correspondants sont, dans une large mesure, imprévisibles d'une pluie à l'autre et très fluctuants.

La figure 1 illustre les concentrations moyennes événementielles (CME) mesurées sur deux bassins versants de l'OTHU pour deux polluants différents (MES et DCO). Sur le bassin versant unitaire d'Ecully, les CME en MES mesurées sur 239 événements pluvieux varient de 13 à 1 433 mg/L, avec une moyenne pondérée par les volumes écoulés de 168 mg/L. Sur le bassin versant séparatif de Chassieu, les CME en DCO mesurées sur 263 événements varient de 54 à 966 mg O₂/L, avec une moyenne pondérée par les volumes écoulés de 118 mg O₂/L. Dans les deux cas, la distribution des valeurs des CME est très étendue et suit une distribution très approximativement log-normale. Cette forte variabilité des CME est également observée pour les masses événementielles de polluants (Métadier et Bertrand-Krajewski, 2012).

Il n'existe aucune relation entre les caractéristiques d'une pluie et les concentrations moyennes de polluants

Par ailleurs, il n'existe aucune relation entre les caractéristiques des événements pluvieux (par exemple la hauteur précipitée ou le volume ruisselé) et les valeurs des CME. Dans le cas

Figure 1 : Distribution des concentrations moyennes événementielles. À gauche, CME en MES pour 239 événements pluvieux à Ecully (réseau unitaire) ; à droite CME en DCO pour 263 événements à Chassieu (réseau séparatif).



du bassin versant séparatif de Chassieu (figure 2, gauche), des volumes ruisselés d'environ 1000 m³ présentent des CME allant de moins de 20 à plus de 1400 mg/L selon les événements pluvieux. Réciproquement, une CME d'environ 150 mg/L a été observée dans des volumes ruisselés événementiels de quelques milliers de m³ à plus de 40 000 m³. Nul doute que le suivi d'événements plus nombreux sur ce site aurait conduit à des plages de valeurs plus étendues encore.

La relation entre volume ruisselé et masse événementielle est moins dispersée (figure 2, droite) : une masse événementielle de 1400 à 1500 kg peut toutefois être transportée dans des volumes variant de 1 000 à 30 000 m³. Réciproquement, des volumes ruisselés d'environ 29 000 m³ peuvent transporter des masses événementielles de MES de 1500 à 4200 kg. Cette moindre dispersion et cette tendance globale à observer

des masses plus élevées lorsque les volumes ruisselés augmentent sont largement dues au fait que la masse est corrélée au volume puisqu'elle est égale à la somme des concentrations instantanées multipliées par les volumes instantanés... Volumes et concentrations sont des variables indépendantes, mais pas les volumes et les masses.

Des analyses des données de l'OTHU et d'autres sites expérimentaux montrent également qu'il n'y a pas de lien par exemple entre la période de retour des événements pluvieux et celle des CME ou des masses événementielles.

Les concentrations de polluants varient significativement durant un événement pluvieux

Au cours des événements pluvieux eux-mêmes, les concentrations en polluants évoluent de manière extrêmement

Figure 2 : Concentrations moyennes événementielles (à gauche) et masses événementielles (à droite) de MES en fonction du volume ruisselé (m³) pour 263 événements à Chassieu.

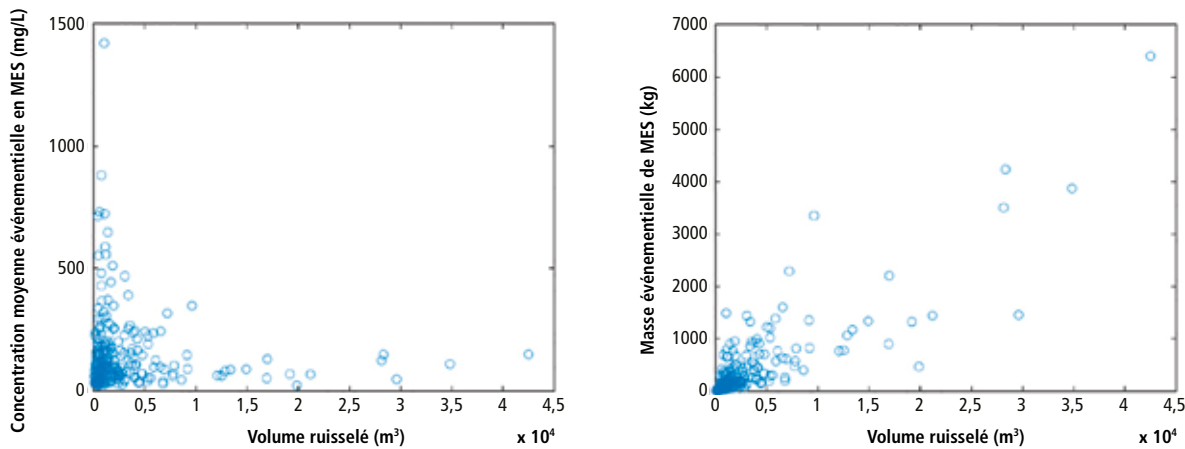
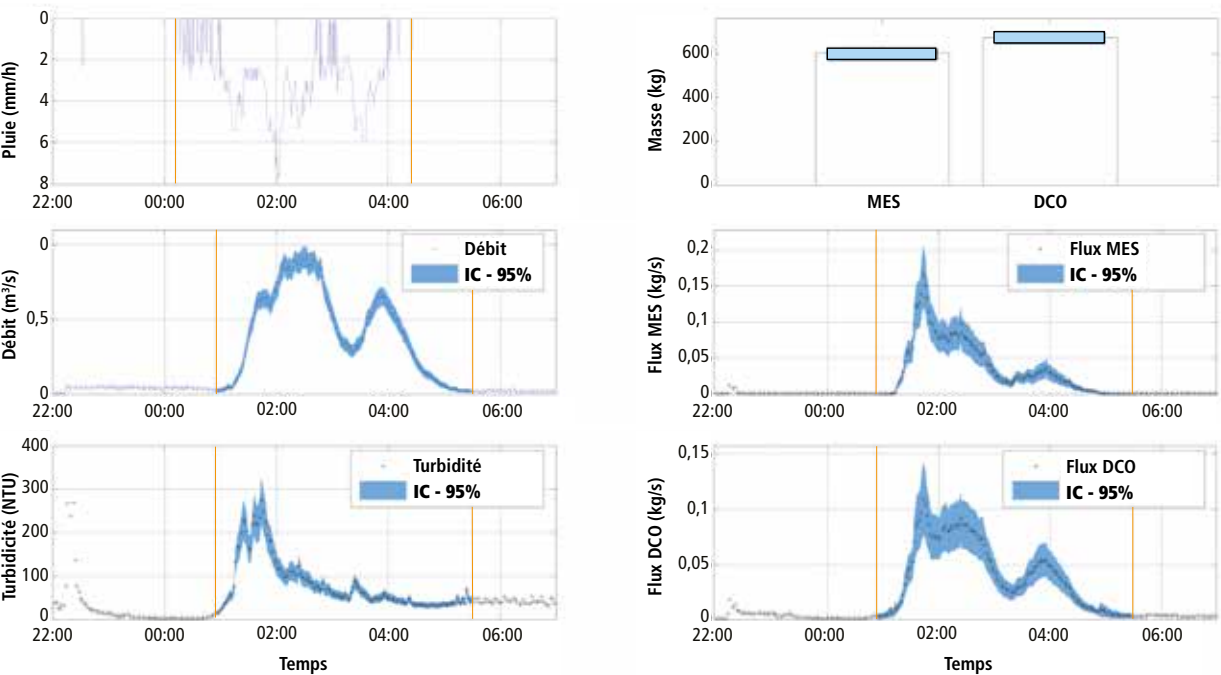


Figure 3 : Évolutions de l'intensité de la pluie, du débit, de la turbidité et des flux massiques en MES et DCO au cours de l'événement pluvieux du 17 mai 2008 à Chassieu. À gauche, de haut en bas : intensité de la pluie, débit à l'exutoire et turbidité ; à droite, de bas en haut : flux massique de DCO, flux massique de MES et masse événementielle de MES et DCO. Les bandes bleues représentent les intervalles de couverture à 95 % des incertitudes sur les valeurs mesurées et calculées des débits, des concentrations, des flux et des masses.



importante, à des échelles de temps de quelques minutes, souvent avec un ou plusieurs pics, et des ordres de grandeur très variables. La figure 3 en donne un exemple pour l'événement du 17 mai 2008 à Chassieu. La turbidité, mesurée au pas de temps de 2 minutes, est proportionnelle à la concentration en MES (en première approximation) et varie de quelques NTU (Nephelometric Turbidity Unit) à 300 NTU au cours de l'événement. La variabilité des débits et des concentrations au cours des événements pluvieux peut être représentée de manière synthétique par les courbes masses-volumes (courbes MV). Les courbes MV permettent de quantifier le phénomène de premier flot : elles montrent que ce phénomène n'est pas le cas le plus fréquent, et de loin (voir Question 5.2 : *Est-il judicieux de baser une stratégie de traitement des RUTP sur le principe du premier flot ?*).

Les conséquences pratiques en métrologie

Un très grand nombre de mesurages est nécessaire

Lorsque qu'un processus ou une grandeur est très variable et aléatoire, il faut procéder à un grand nombre de mesurages pour estimer correctement sa plage de variation et un ordre de grandeur fiable de sa valeur moyenne.

Reprenons l'exemple de Chassieu et des concentrations moyennes événementielles en DCO. La CME moyenne pondérée par les volumes est de 118 mg O₂/L, à partir des valeurs mesurées sur 263 événements. On suppose pour la suite que cette valeur est bien connue (alors qu'elle pourrait évoluer si on mesurait davantage d'événements). Quelle serait la valeur de la CME moyenne si on mesurait moins de 263 événements ? Par exemple, si on mesurait seulement 5 événements, choisis au hasard parmi les 263 disponibles ? Si on simule dix millions de tirages différents de 5 événements parmi les 263, la CME moyenne calculée varie de 66 à 652 mg O₂/L selon le tirage. Pour des tirages de 50 événements parmi les 263, la CME moyenne calculée varie de 87 à 186 mg O₂/L.

Ces résultats sont généralisés sur la figure 4 qui montre la plage dans laquelle varie l'estimation de la CME moyenne en fonction du nombre n d'événements pluvieux mesurés. Si par exemple on veut connaître la CME moyenne à plus ou moins 20 % près (c'est-à-dire entre 94 et 142 mg O₂/L), la figure 4 indique qu'il faudrait mesurer entre 80 et 125 événements sur 263. En effet, la distribution n'est pas symétrique : pour un nombre n d'événements pluvieux mesurés donné, la probabilité de surestimer la CME moyenne est plus élevée que de la sous-estimer.

Mesurer les flux polluants sur un petit nombre d'événements pluvieux, par exemple 3 à 5, n'apportera pas une information fiable et exploitable, compte tenu de l'énorme variabilité des rejets de temps de pluie (en volume, en concentration et en masse rejetée). C'est donc assurément prendre le risque de croire (puisque qu'on n'aura pas d'autre information, on remplacera une information incomplète par une croyance) que tous les événements pluvieux seront comme ces trois à cinq-là qui auront été obtenus par hasard, et dont on n'aura aucune garantie de représentativité.

Privilégier le nombre d'événements mesurés, plutôt qu'une faible incertitude de mesure

D'autres analyses montrent qu'il est largement préférable de mesurer un grand nombre d'événements pluvieux avec des incertitudes métrologiques un peu élevées que de mesurer quelques événements seulement avec des incertitudes métrologiques très faibles. Considérons le cas d'un ouvrage de retenue-décantation des eaux pluviales situé à l'aval d'un bassin versant séparatif, dont on cherche à évaluer la performance d'interception annuelle (voir les détails dans Bertrand-Krajewski *et al.*, 2002). Si le volume écoulé pendant l'événement pluvieux est inférieur au volume de l'ouvrage, le volume écoulé est intégralement intercepté par l'ouvrage et soumis à décantation. Si le volume écoulé est supérieur au volume de l'ouvrage, l'excédent est déversé directement au milieu aquatique. On considère qu'il y a $N = 80$ événements pluvieux par an susceptibles de générer un ruissellement significatif. Parmi ces 80 événements, on admet qu'on

Fig. 4 : Plage de variation de la CME moyenne en DCO estimée en fonction du nombre n d'événements mesurés parmi 263 disponibles, pour le bassin versant séparatif de Chassieu. En bleu : les courbes enveloppes minimum et maximum ; en gris : la moyenne.

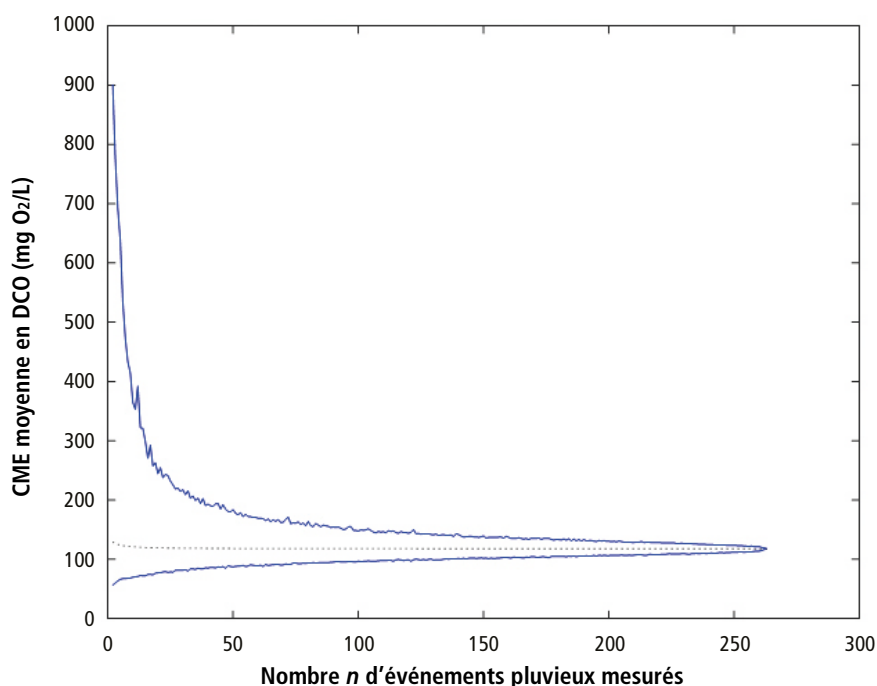
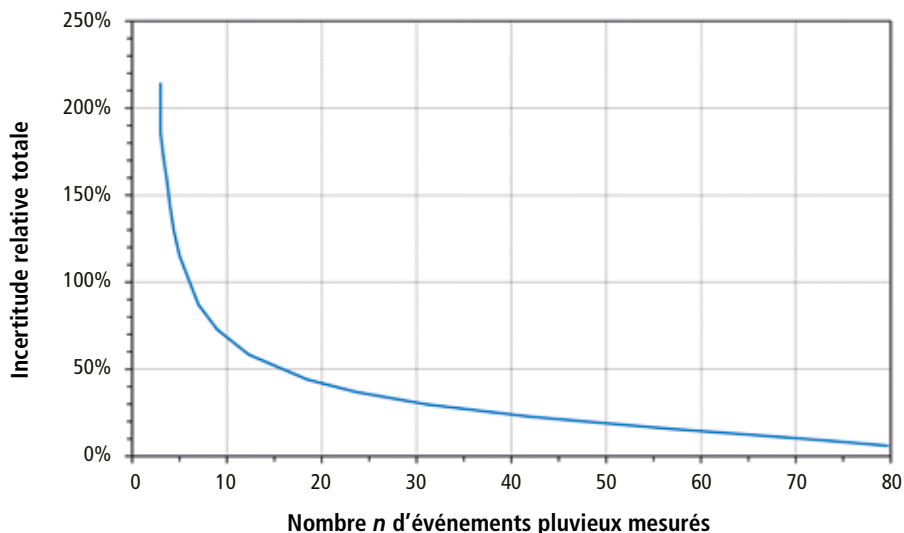


Figure 5 : Incertitude relative totale sur l'efficacité d'interception annuelle d'un ouvrage de retenue-décantation des eaux pluviales en fonction du nombre n d'événements pluvieux mesurés parmi $N = 80$ événements en moyenne par an.



en mesure un nombre $n \leq N$. On s'intéresse à l'efficacité d'interception, c'est-à-dire au rapport entre la masse de polluants entrant dans l'ouvrage et la masse de polluants rejetée à l'aval du bassin versant, à l'échelle annuelle pour les 80 événements pluvieux. En combinant l'analyse de données expérimentales sur différents bassins versants réels et des simulations numériques, et en tenant compte d'une part des incertitudes météorologiques (mesurage des débits, des concentrations, nombre de prélèvements effectués et couverture des événements échantillonnés) et d'autre part des incertitudes de représentativité des événements échantillonnés, on peut estimer l'incertitude avec laquelle on connaît l'efficacité d'interception annuelle de l'ouvrage en fonction du nombre n d'événements échantillonnés. Les résultats sont présentés sur la figure 5. Si on ne mesure que 5 événements par an, le rendement annuel d'interception de l'ouvrage sera connu avec une incertitude de 115 %. Et si on ne mesure que 3 événements, l'incertitude atteint 180 %... Autant dire qu'on ne sait vraiment pas quelle est l'efficacité de l'ouvrage dans de telles conditions. Si on veut connaître son efficacité annuelle à 30 % près par exemple, il faudrait mesurer 30 événements par an sur 80.

Cet exemple montre comment on peut tirer des conclusions totalement incertaines lorsqu'on ne mesure que quelques événements pluvieux. La source majeure d'incertitude est en effet liée au nombre n d'événements pluvieux mesurés, d'autant plus grande que n est petit. Les incertitudes de mesure sur les débits et les concentrations sont moins critiques. Ce problème de sous-représentativité de la diversité des événements pluvieux et de leurs flux polluants existe également pour estimer les flux rejetés ou les impacts sur le milieu aquatique.

En Bref...

Il ne faut pas compter sur le hasard pour obtenir des données fiables et représentatives des flux d'eau et de polluants des rejets urbains par temps de pluie, compte tenu de leur très grande variabilité. Or c'est ce qui se passe lorsque les campagnes de mesure ne comportent que quelques événements pluvieux, dont on tire ensuite des conclusions qui peuvent s'avérer infondées ou biaisées. La précaution de langage indiquant qu'on « choisira quelques événements pluvieux représentatifs » n'y change rien. Il faut donc envisager des campagnes portant sur quelques dizaines d'événements pour bien caractériser un site, ce qui nécessite une planification des moyens techniques et financiers sur le moyen terme. Que ce soit au moyen de prélèvements d'échantillons classiques ou, mieux, de mesurages en continu par capteurs fournissant une information plus riche, l'enjeu majeur est celui du nombre d'événements pluvieux mesurés.

POUR ALLER PLUS LOIN

- **Bertrand-Krajewski J.-L., Barraud S., Bardin J.-P.** (2002). *Uncertainties, performance indicators and decision aid applied to stormwater facilities* - Urban Water, 4(2), 163-179. doi:10.1016/S1462-0758(02)00016-X - lc.cx/bertrand2002
- **Métadier M., Bertrand-Krajewski J.-L.** (2012). *The use of long-term on-line turbidity measurements for the calculation of urban stormwater pollutant concentrations, loads, pollutographs and intra-event fluxes*. Water Research, 46(20), 6836-6856 - doi:10.1016/j.watres.2011.12.030 - lc.cx/metadier2012

Comment les stations de mesure de l'OTHU ont-elles fait progresser les pratiques métrologiques ?

Nicolas Walcker, INSA Lyon – Laëtitia Bacot, GRAIE – Jean-Luc Bertrand-Krajewski, INSA Lyon

Réduire les rejets urbains de temps de pluie (RUTP) et leurs impacts environnementaux et sanitaires nécessite de bien les connaître. Cette connaissance, aussi bien quantitative (pluies, débits, volumes) que qualitative (concentrations et flux de polluants) est obtenue par des dispositifs métrologiques adaptés permettant de conduire des campagnes de mesure dans la durée. Fort de ses 20 années d'expérience dans la mise en œuvre et la gestion de stations de mesure de terrain, l'OTHU partage quelques enseignements et préconisations pour une instrumentation performante et un suivi réussi des RUTP.

La démarche de suivi des RUTP

La définition d'objectifs est un préalable indispensable

Avant tout projet d'instrumentation, il est important de fixer des objectifs clairs en termes de données et de connaissances à acquérir, et de périmètre sur lequel on veut les obtenir.

Une connaissance préalable du site retenu et des conditions hydrauliques au point de mesure est également indispensable (identification des entrées/sorties, mises en charge, débordements, influence aval, ensablement, etc.). Les retours d'expériences des différents acteurs (professionnels et usagers) et les études déjà réalisées sur le territoire (schéma directeur, modélisation, campagnes antérieures, etc.) sont des moyens efficaces pour répondre à ce besoin préalable.

Les suivis quantitatif et qualitatif sont complémentaires

La seconde étape consiste à positionner les points de mesure aux endroits appropriés du bassin versant en fonction des objectifs fixés (voir Question 2.1 : *Pourquoi, quoi et comment mesurer pour mieux comprendre le fonctionnement d'un bassin versant ?*). Pour cela, il est généralement nécessaire de débiter l'instrumentation par le suivi quantitatif des effluents. L'estimation des débits est souvent réalisée à l'aide de capteurs de niveau d'eau et/ou de vitesse d'écoulement (d'autres techniques de mesure sont possibles). Les données produites permettent de connaître le fonctionnement du système en fournissant de précieuses informations sur les débits et volumes. Couplées à des mesurages de la pluie, elles permettent de comprendre la réponse par temps de pluie du bassin versant à l'amont du point de mesure.

Le suivi qualitatif des effluents est un moyen complémentaire de compréhension du système et permet d'estimer les flux polluants transportés par les RUTP et leurs impacts sur les milieux aquatiques. De nombreuses grandeurs physico-chimiques peuvent être mesurées en continu dans les RUTP : température, conductivité électrique, pH, turbidité/MES, oxygène dissous... Le choix des grandeurs mesurées est fait en fonction des objectifs fixés, des obligations réglementaires et des ressources financières mobilisables. L'utilisation de préleveurs automatiques est nécessaire pour collecter des échantillons nécessitant une analyse en laboratoire des polluants (métaux, micropolluants, etc.) dont les concentrations ne peuvent pas être estimées au moyen de capteurs en continu.

Retour sur 20 ans d'expérience des stations de mesure de l'OTHU

La nécessité de considérer l'ensemble de la chaîne de mesure

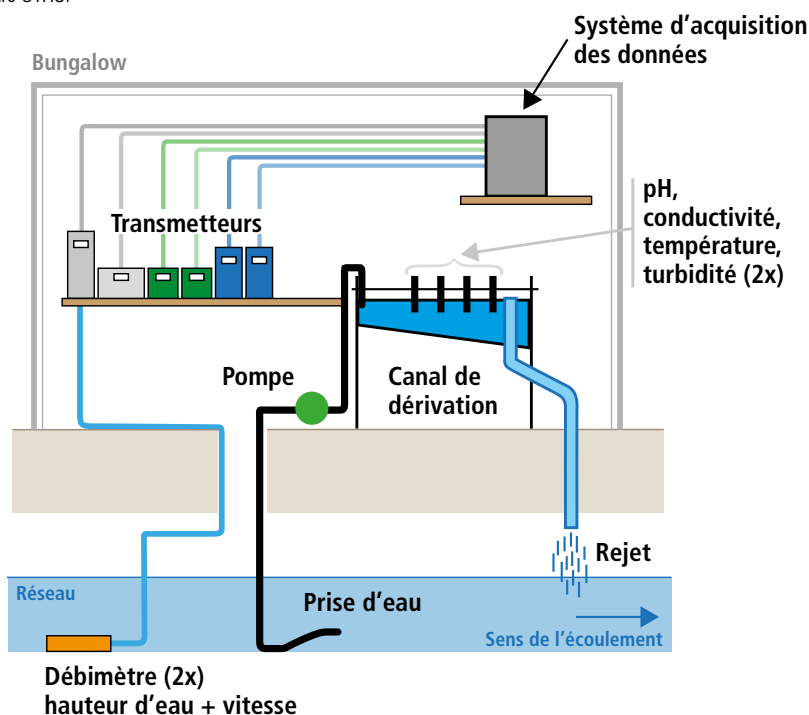
Au cours des 20 dernières années, la variété des sites, des intervenants et des sujets de recherche a apporté à l'OTHU une expérience significative dans l'instrumentation des sites et le mesurage des RUTP, expérience qui permet aujourd'hui de produire de nombreux résultats fondés sur de longues séries de données.

Pour tout projet d'instrumentation, il est indispensable de mener une réflexion préliminaire complète sur la globalité de la chaîne de mesure : du choix du capteur au traitement des données, en passant par la gestion du parc métrologique. Négliger cette démarche conduit fréquemment à une perte de temps et d'argent et à la collecte de données médiocres ou inexploitable. Naturellement cette réflexion requiert du personnel compétent et qualifié en métrologie.

Le choix des capteurs et de leur implantation

Pour le suivi quantitatif, ces années d'expérience ont montré l'efficacité des capteurs sans contact avec les effluents (types ultrasons ou radars). Ces solutions éprouvées et robustes offrent l'avantage d'une maintenance réduite, d'un contrôle simplifié ainsi que d'une durée de vie adaptée. Le coût des capteurs de niveau, réduit par le développement des technologies et la concurrence entre fabricants, encourage l'utilisation de ces solutions. Ce constat ne s'applique pas aux capteurs de vitesse sans contact dont le coût encore dissuasif conduit à utiliser des capteurs immergés ou des relations hauteur-débit. L'utilisation de capteurs de vitesse n'est pas systématiquement nécessaire, mais dépend des conditions hydrauliques observées sur chaque point de mesure.

Figure 1 : Station de mesure OTHU.



Une démarche d'amélioration continue

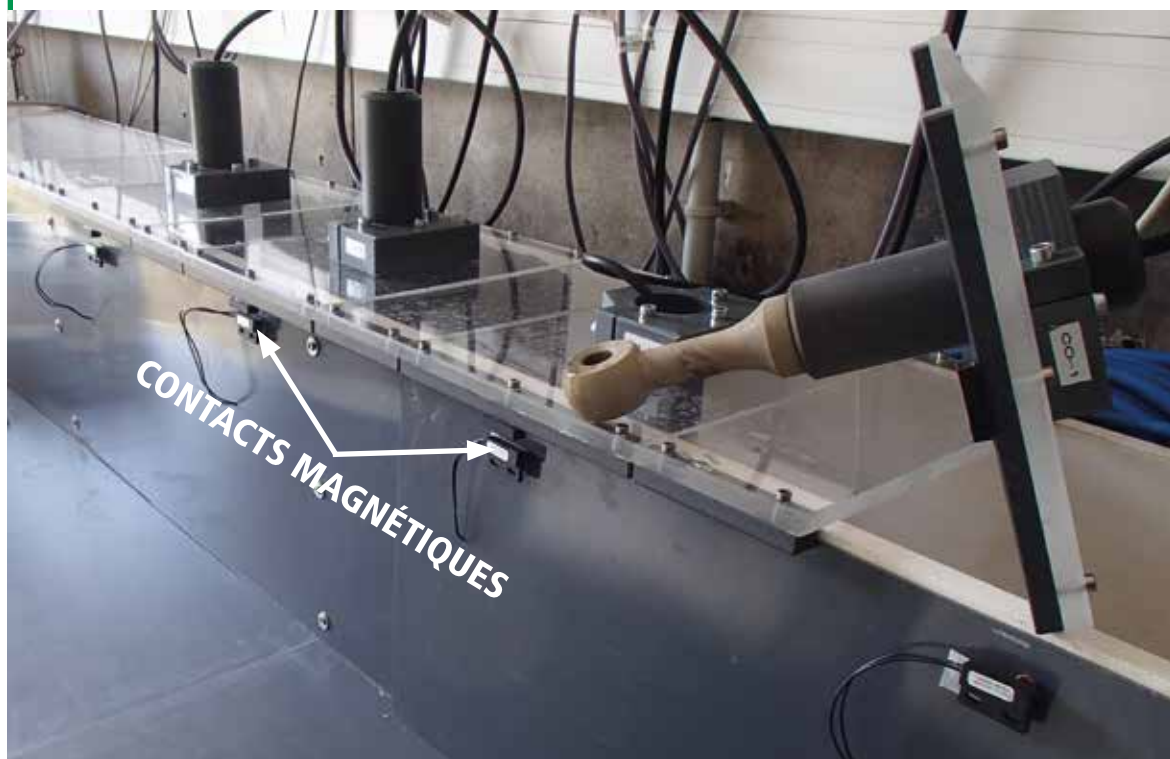
Après plusieurs années d'exploitation quotidienne des stations de mesure, de nombreuses améliorations, tant matérielles que méthodologiques, ont été apportées par les équipes de l'OTHU :

- **Canal de dérivation** : un canal moulé sur mesure de section ovoïde et muni de buses assurant son nettoyage automatique à l'eau potable permet de réduire la décantation de sédiments dans le système afin d'optimiser la représentativité de l'échantillon mesuré.
- **Des capots pour les capteurs (figure 2)** : des capots transparents équipés d'un système de fixation rapide des capteurs permettent de s'assurer de la bonne mise en place du matériel. Ces capots améliorent la reproductibilité des

mesurages en réduisant les différences de pratique des différents intervenants sur les stations. Ils comportent des contacts magnétiques afin d'identifier automatiquement les ouvertures et fermetures des capots lors des opérations de maintenance des capteurs.

- **Ordinateur et cartes d'acquisition** : l'utilisation d'un ordinateur avec des cartes d'acquisition accroît considérablement les possibilités par rapport aux centrales d'acquisition classiques (capacité de stockage accrue, stockage local et cloud, prétraitement des données en temps réel, taille et format des données, logiciels, webcam, ajout de matériels, etc.).
- **IHM et réseau internet** : la mise en place d'une IHM (Interface Homme-Machine) sur un ordinateur connecté

Figure 2 : Capots pour capteurs et contacts magnétiques.



à internet facilite considérablement la prise en main de la station. Cette dernière devient ainsi pilotable en tout lieu et à toute heure (pompe, buses de nettoyage, vidange du canal, éclairage, déclenchement de préleveurs, etc.).

- **Prétraitement des données en temps réel :** l'utilisation d'un logiciel de programmation pour la collecte des données et le pilotage de la station offre de nombreuses possibilités. Les données aberrantes et/ou non représentatives (ex : capteur en maintenance, nettoyage du bac, défaut de pompage, etc.) peuvent être détectées et supprimées avant d'effectuer des moyennes sur les données restantes. On peut ainsi calculer une moyenne toutes les deux minutes à partir des données non aberrantes échantillonnées à haute fréquence, par exemple à la seconde, afin d'atténuer les erreurs aléatoires.
- **Asservissement des préleveurs :** le calcul du débit (par hauteur/vitesse, loi hauteur/débit ou divers modèles) étant instantanément réalisé au sein du programme pilotant la station, il devient possible de déclencher les préleveurs et d'effectuer des prélèvements en fonction des conditions hydrauliques observées en temps réel (prélèvements proportionnels au temps, au volume ou au débit).

Du personnel qualifié et une critique permanente des données collectées

Malgré l'efficacité de l'ensemble de ces outils et des innovations apportées, les années d'expérience de l'OTHU confirment la nécessité d'un suivi régulier et rigoureux des stations de mesure par du personnel qualifié. Du choix du matériel à son exploitation, en passant par son installation et sa maintenance, les compétences des utilisateurs restent indispensables afin d'assurer une instrumentation pérenne et pertinente.

Enfin, les conditions particulières et difficiles en hydrologie urbaine nécessitent une évaluation critique permanente des données collectées. Des méthodes et outils ont été développés dans l'OTHU pour faciliter cette gestion des données, notamment les données d'étalonnage des capteurs, l'évaluation des incertitudes et la validation des données qui ont été intégrées dans le logiciel Evohé (voir Question 2.8 : *Comment produire des données de qualité et exploitables durablement ?*).

Vers une ville connectée à sa déconnexion des eaux pluviales

L'émergence du concept de « Smart City » engendre depuis quelques années de nouvelles approches et de nouveaux outils. Le développement de l'IoT (Internet of Things) ainsi que l'apparition de nouvelles technologies (capteurs low cost) apportent des solutions toujours plus connectées et autonomes (de l'autonomie énergétique des capteurs à l'hébergement des données en passant par leur collecte).

À l'avenir, la disponibilité de ces technologies et la réduction de leurs coûts d'achat devraient encourager l'instrumentation de nombreux ouvrages afin de répondre toujours mieux aux besoins d'une approche globale de l'assainissement fondée sur des données mesurées fiables et représentatives.



POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Walcker N., Bertrand-Krajewski J.-L., Vacherie S., Lepot M., Castebrunet H., Barraud S., Lipeme Kouyi G.** (2018). *Une nouvelle station de mesure pour l'acquisition de séries chronologiques en hydrologie urbaine*. TSM, 3, 55-64. doi 10.1051/tsm/201803055 – [lc.cx/walcker2018](https://ic.cx/walcker2018)
- ▶ **Bertrand-Krajewski J.-L.** (2013). *Auto-surveillance des réseaux d'assainissement: fiabiliser la métrologie, les données et leur exploitation*. L'eau, l'industrie, les nuisances, 362, 84-89 – [lc.cx/bertrand2013](https://ic.cx/bertrand2013)

Mesurage en continu et échantillonnage : pourquoi faut-il aller au-delà de la réglementation ?

Jean-Luc Bertrand-Krajewski, INSA Lyon

Le mesurage en continu des flux polluants par capteurs *in situ* est à ce jour encore peu pratiqué par les collectivités, bureaux d'études et gestionnaires privés. Pourtant, se limiter à l'analyse de quelques échantillons collectés pour quelques événements pluvieux pris au hasard ne peut donner qu'une version partielle et biaisée des flux polluants des rejets urbains par temps de pluie...

Le cinéphile et l'hydrologue : trois histoires courtes et parallèles

PREMIÈRE HISTOIRE

Dominique, un cinéphile en herbe en visite chez son oncle (ou son grand-père, son cousin, un voisin, je ne me souviens plus), souhaite découvrir les films policiers. Son oncle (ou son grand-père, etc.) lui suggère d'aller au cinéma du quartier : « *Il y a toujours une des salles qui en projette à un moment ou un autre, tu vas bien tomber sur quelque chose d'intéressant* ». Et

Dominique, une jeune hydrologue urbaine employée par la ville (ou un bureau d'études, un gestionnaire privé, un organisme public, je ne me souviens plus), souhaite connaître les flux polluants des rejets urbains de temps de pluie. Son directeur lui suggère de mettre en place une campagne de mesure sur un bassin versant proche : « *Il pleut toujours à un*

Photo 1 : Image du film *Le Troisième homme*, de Carol Reed (1948), tourné dans les égouts de Vienne en Autriche.



il ajoute : « *Prends l’enveloppe sur le meuble près de la porte, il doit rester quelques euros pour te payer une séance* ».

Sur le trajet, Dominique constate que l’enveloppe ne contient plus que quelques pièces de menue monnaie. Au cinéma, le caissier, un peu bizarre, lui propose, en échange de ses quelques pièces, une expérience originale : regarder le film avec un masque spécial. Ce masque spécial lui permettra de voir jusqu’à 24 fois une séquence de quelques secondes au centre de l’écran. Il peut le régler de deux manières : soit il voit une séquence toutes les 5 minutes, soit il voit une séquence chaque fois qu’on entend le thème musical du film dans la bande son. Dominique accepte de tenter l’expérience. Comme il ne connaît pas la bande originale du film qu’il va voir, il choisit l’option d’une courte séquence toutes les 5 minutes et entre dans la salle.

Quand il en ressort deux heures et demie plus tard, il est très perplexe. Le film était plus long que prévu, il ne sait rien de la dernière demi-heure ni de la manière dont se termine l’histoire. De plus, la séquence 8 n’a pas fonctionné et la séquence 12 était floue. Il a bien vu celui qu’il considère comme l’assassin, il a cru voir au moins une victime, mais il n’est absolument pas sûr d’avoir compris le mobile du crime. Des personnages secondaires apparaissaient ou disparaissaient d’une séquence à l’autre sans qu’il sache leurs rôles dans l’affaire. Il a entendu la musique, depuis le générique et tout au long du film, ce qui lui a permis de reconnaître des ambiances différentes, des moments de tension et des moments plus calmes. Mais ça ne l’aide pas vraiment à démêler les fils du scénario. Finalement, bien qu’il ait vu des séquences du film comme prévu, il n’a pas compris grand-chose à l’histoire. Il se demande si tous les films policiers ressemblent à celui-ci (en tout cas à ce qu’il en a vaguement compris) et rentre chez lui très déçu.

Quelque temps plus tard, il entend dire qu’il a eu de la chance, car beaucoup d’autres cinéphiles débutants n’ont souvent vu qu’un tout petit nombre de séquences au cours de la projection. Quelle frustration !

moment ou un autre, vous allez bien trouver un événement pluvieux représentatif ». Et il ajoute : « *Il y a un reliquat de budget disponible dans votre service, pour mesurer au moins un événement pluvieux* ».

En préparant sa campagne de mesure, Dominique constate que le reliquat est plutôt maigre. Sur site, un exploitant, un peu bizarre, lui dit qu’avec ce montant elle peut faire une expérience originale : collecter des échantillons avec un préleveur. Ce préleveur lui permettra de collecter jusqu’à 24 échantillons instantanés à l’exutoire du bassin versant. Elle peut le régler de deux manières : soit elle prend un échantillon toutes les 5 minutes, soit elle prend un échantillon chaque fois que 200 m³ se sont écoulés. Dominique accepte de tenter l’expérience. Comme elle ne connaît pas les débits qui vont s’écouler, elle choisit l’option d’un échantillon toutes les 5 minutes et lance sa campagne.

Quand l’événement pluvieux se termine au bout de deux heures et demie, elle est très perplexe. La durée de l’événement était plus longue que prévu, elle n’a aucun échantillon pendant la dernière demi-heure et ne pourra pas calculer la masse totale de polluant rejetée. De plus, la pompe n’a pas fonctionné pour l’échantillon 8 et l’échantillon 12 n’a même pas la moitié du volume nécessaire aux analyses. Elle a bien vu qu’il y avait des rejets polluants, probablement au moins une surverse de déversoir d’orage, mais elle n’est absolument pas sûr d’avoir compris comment ces flux ont été générés. Des polluants sont présents dans certains échantillons et pas dans d’autres sans qu’on sache si c’est lié à des remises en suspension sporadiques. Elle dispose des données hydrologiques, le hyétogramme qui génère le ruissellement et l’enregistrement complet du débit à l’exutoire, ce qui lui a permis d’identifier des phases différentes dans l’événement, avec des pics et des interruptions. Mais ça ne l’aide pas vraiment à estimer les concentrations au cours du temps. Finalement, bien qu’elle ait obtenu des échantillons de l’événement comme prévu, elle n’a pas compris grand-chose aux processus en jeu. Elle se demande si tous les événements pluvieux ressemblent à celui-ci (en tout cas à ce qu’elle en a vaguement compris) et rentre au bureau très déçu.

Quelque temps plus tard, elle entend dire qu’elle a eu de la chance, car beaucoup d’autres hydrologues débutants n’obtiennent souvent que quelques échantillons par événement. Quelle frustration !

DEUXIÈME HISTOIRE

Malgré cette première expérience décevante, Dominique a décidé de persévérer. Mais plus question de masque spécial, il veut voir son prochain film policier en continu ! Ayant obtenu de son oncle, non sans mal, l’argent nécessaire pour une nouvelle séance dans un cinéma plus chic, il repart enthousiaste.

Et là, c’est la révélation ! Le son et l’image en continu, à 24 images/seconde, du début à la fin. Enfin il peut tout suivre, tout comprendre, être sûr du coupable, des victimes (il y en avait deux dans ce film), il a une idée claire du mobile. Il lui reste bien quelques hypothèses non vérifiées échafaudées durant la projection, mais elles ne portent que sur des aspects mineurs de l’histoire.

Dominique veut maintenant voir d’autres films policiers du même réalisateur, il sait qu’il en a fait des dizaines. Les revues spécialisées en parlent en effet comme d’un cinéaste prolifique à l’imagination foisonnante, capable de tout réinventer et de surprendre le spectateur à chaque film, même en partant de quelques éléments apparemment assez similaires. Il a hâte de voir toute sa filmographie.

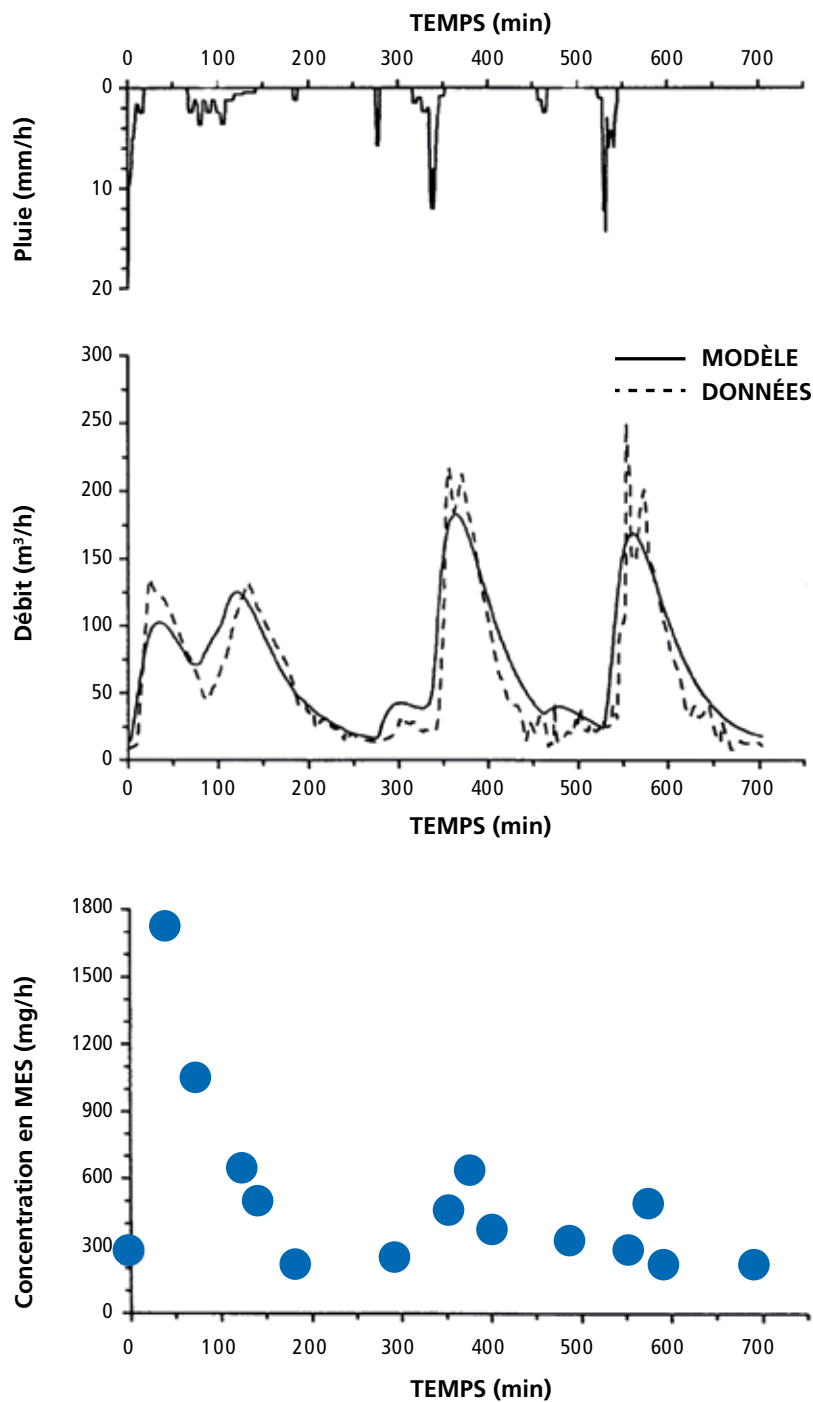
Malgré cette première expérience décevante, Dominique a décidé de persévérer. Mais plus question de préleveur, elle veut mesurer les flux polluants du prochain événement pluvieux en continu ! Ayant obtenu de son directeur, non sans mal, le budget nécessaire pour étalonner et installer des capteurs de qualité des eaux sur un nouveau bassin versant, elle repart enthousiaste. Et là, c’est la révélation ! Les débits et les flux polluants, en continu au pas de la minute, sur toute la durée de l’événement. Enfin elle peut tout suivre, tout analyser, quantifier correctement les rejets polluants, les surverses (il y en a eu deux durant cet événement), elle se fait une idée assez précise des processus en jeu. Elle a estimé ses incertitudes de mesure : un peu élevées parfois, elles ne remettent toutefois pas en cause ses conclusions. Dominique veut maintenant mesurer les flux polluants d’autres événements pluvieux sur son bassin versant, elle sait que les pluies ne manquent pas. La bibliographie spécialisée indique en effet que les flux polluants rejetés varient énormément d’un événement à un autre, de manière très difficilement prévisible, bien que les processus élémentaires en jeu soient toujours les mêmes. Elle est motivée pour augmenter sa base de données.

TROISIÈME HISTOIRE

Quelque temps plus tard, Dominique se dit qu'il y a sûrement plein d'autres réalisateurs de talent qu'il ne connaît pas encore. Son cinéma de quartier ne lui suffit plus, il veut en voir plus. Il rêve qu'il se rend au tout nouveau festival international du film policier, dans des salles avec écrans sur 360 degrés, films en 3D, sièges dynamiques, diffusion d'odeurs en lien avec l'histoire. Et là, surprise ! Il assiste à la projection en avant-première mondiale d'une version entièrement restaurée et

Quelque temps plus tard, Dominique se dit qu'il y a des polluants qu'elle n'a pas encore mesurés. Son bassin versant urbain résidentiel ne lui suffit plus, elle veut aussi mesurer les rejets sur d'autres sites. Elle rêve d'une nouvelle base de données internationale sur les rejets urbains de temps de pluie, sur des centaines de bassins versants aux caractéristiques variées, avec des données en continu pour tous les polluants émergents qui l'intéressent, en phases dis-

Figure 1 : Suivi d'un événement pluvieux par prélèvement d'échantillons : pluie et débit re-calculés au pas de temps de 1 minute, concentrations en MES (points bleus) déterminées sur 15 échantillons collectés proportionnellement au volume écoulé (prélèvements au pas de 50 m³) par un préleveur automatique, Entzheim (Bas-Rhin), événement du 3 mai 1987 (source : adapté de Bertrand-Krajewski, 1992).



numérisée en haute définition, en couleurs, sur écran 360 degrés, et en langue originale, d'un film qu'il avait déjà vu il y a longtemps en noir en blanc sur un écran 4/3 étriqué. Il voit enfin l'intégralité de l'action, les scènes coupées, les dialogues manquants, toute l'intrigue s'explique et s'enchaîne parfaitement. La version en langue originale révèle des explications que la version française mal traduite avait rendues confuses. Quelle imagination dans le scénario, plein de rebondissements et d'actions périphériques, alors qu'il se souvenait d'une histoire terriblement simplifiée que son cerveau avait élaborée autrefois avec les éléments limités qu'il avait alors à sa disposition.

Et une nouvelle idée jaillit dans son esprit: après tous les films des nombreux réalisateurs qu'il a vus dans des centaines de salles, il se sent prêt à écrire le scénario ultime et parfait de tous les films policiers existants et à venir, celui qui les représenterait tous dans leur infinie diversité.

soute et particulaire, et même gazeuse, pour boucler entièrement les bilans de masse. Elle s'imagine mesurer à nouveau d'anciens événements dans ces conditions: finis les échantillons en nombre insuffisant péniblement collectés au seul exutoire du bassin versant, remplacés par des dizaines de capteurs performants et low-cost spatialement distribués à travers les sous-bassins versants et les ouvrages, fournissant des données en continu transmises et validées en temps réel. Elle comprend enfin l'ensemble des processus en jeu et leurs interactions, le rôle des surverses sur les bilans de masse jusqu'à présent demeurés incomplets, les contributions de chaque sous-bassin versant et des remises en suspension dans les ouvrages. L'ensemble des contributions devient quantifiable et interprétable. L'étalonnage systématique des capteurs rend les données fiables. Elle parvient à appréhender toute la complexité des phénomènes, et même leurs aspects aléatoires, tandis qu'elle se souvient des hypothèses et interprétations simplistes et invérifiables qu'elle avait échafaudées autrefois à partir des rares échantillons collectés.

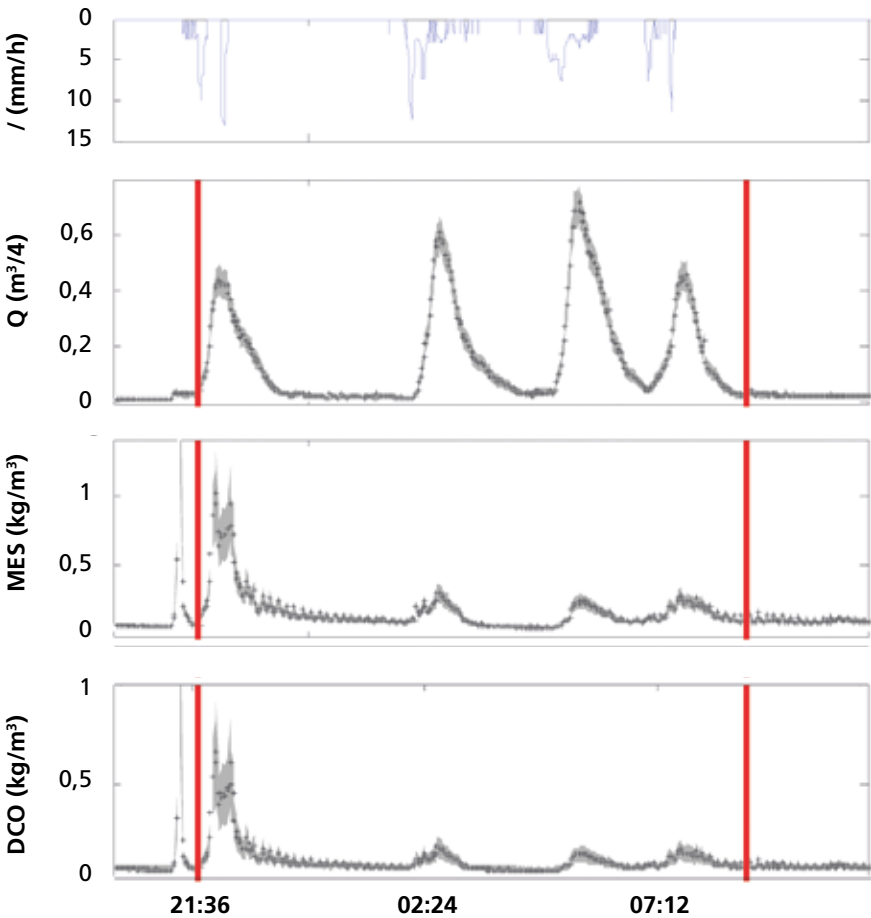
Et une nouvelle idée jaillit dans son esprit: avec toutes les données et connaissances accumulées dans sa base de données, elle se sent prête à créer le modèle numérique ultime et parfait de tous les rejets urbains de temps de pluie de tous les événements pluvieux passés et à venir, celui qui les représenterait tous dans leur infinie diversité.

Retour à la réalité

La figure 1 montre un exemple de suivi des concentrations en MES mesurées sur des échantillons prélevés à l'exutoire d'un bassin versant unitaire au cours d'un événement pluvieux.

Dans ce cas particulier, on dispose de 15 échantillons sur 700 minutes, ce qui correspond à un délai moyen de 50 minutes entre deux données... Le cerveau a naturellement tendance

Figure 2 : Exemple de suivi d'un événement pluvieux par mesurage en continu de la pluie, du débit et des concentrations au pas de temps de 2 minutes, Chassieu (Rhône), événement du 29 mai 2008.



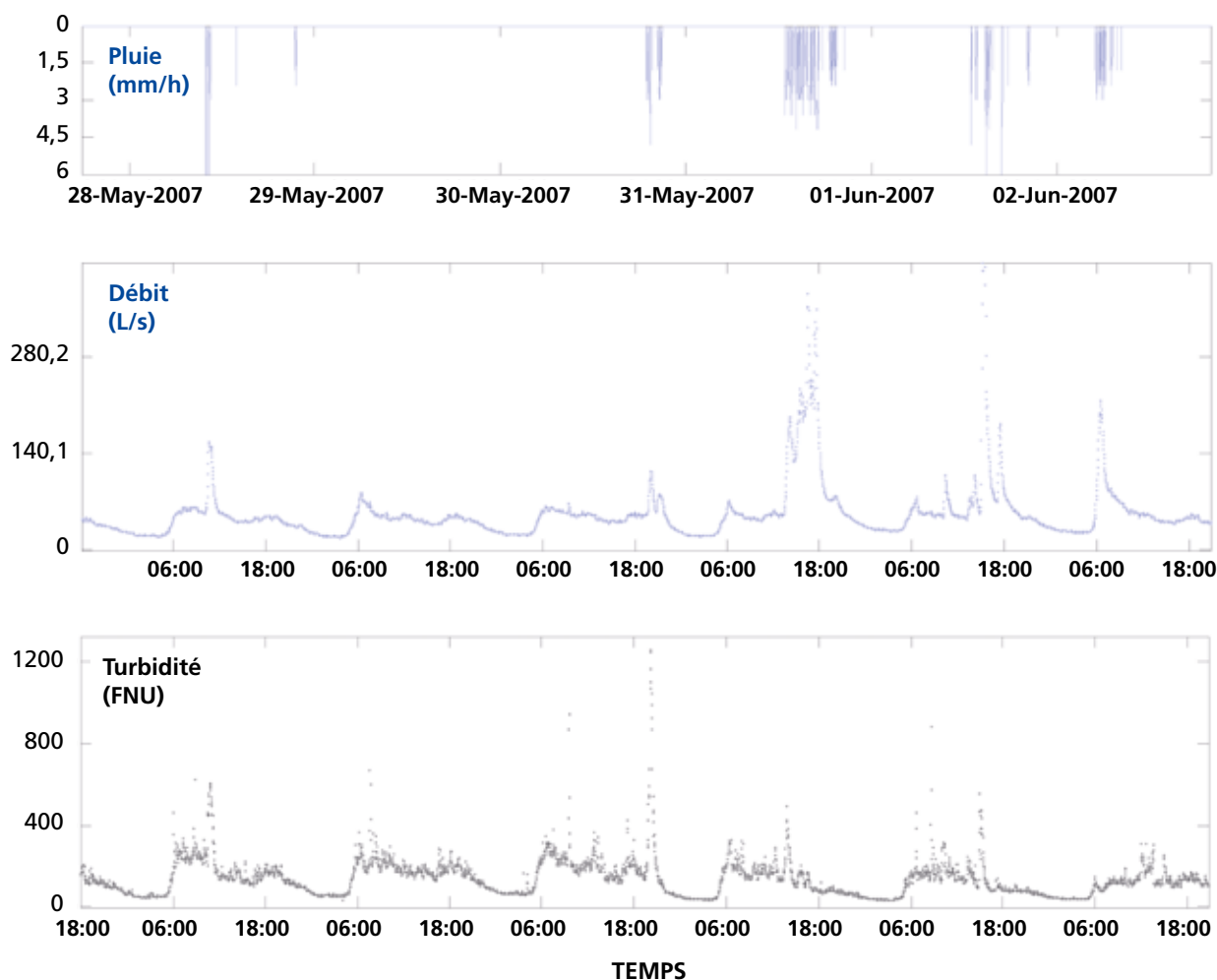
à interpoler linéairement entre deux valeurs successives de concentration pour reconstituer la continuité absente des données, et à prendre cette interpolation pour la réalité. Cet exemple n'est pas le plus mauvais, il existe en effet de nombreux cas où le nombre d'échantillons collectés est largement inférieur à 15. Ce type d'information a longtemps constitué la source principale de connaissance sur les flux polluants des rejets urbains de temps de pluie.

À titre de comparaison, la figure 2 montre un exemple de suivi des concentrations en MES et DCO estimées à partir de la turbidité mesurée en continu à l'exutoire du bassin versant séparatif de Chassieu. On dispose dans cet exemple d'une information toutes les 2 minutes, qui représente la dynamique réelle (et non pas imaginée) des processus, avec une estimation systématique des incertitudes. On peut ensuite calculer des bilans de masse ou des flux rejetés de manière beaucoup plus fiable (voir Question 2.2 : *Pourquoi le suivi métrologique de long terme de la qualité des RUTP est-il nécessaire ?*). Le mesurage en continu permet de s'affranchir des limites temporelles arbitraires du découpage en événements pluvieux séparés et des limites technologiques

liées aux capacités extrêmement limitées des préleveurs. Des séries chronologiques de données de longue durée (voir figure 3) permettent ainsi d'accéder à des informations et des connaissances nouvelles, de tester des modèles, de mieux gérer les ouvrages, etc.

Pour les bassins versants unitaires, le mesurage en continu permet, à partir d'une base de données sur les flux de temps sec, d'estimer, pour chaque événement pluvieux, la contribution des eaux usées au volume total écoulé et au flux polluant rejeté (voir Métadier et Bertrand-Krajewski, 2011). Il permet également de mieux gérer les ouvrages et de répondre pour partie à l'obligation réglementaire d'autosurveillance. Ainsi que l'ont montré Lombard *et al.* (2010), il est possible d'estimer les concentrations en MES, en DCO totale et dissoute, et en sulfures dissous en entrée d'une station d'épuration urbaine en combinant des données de turbidité, de spectrométrie UV-visible et de conductivité mesurées en continu. Enfin, le mesurage en continu permet d'établir des bilans journaliers avec des incertitudes plus faibles qu'avec les échantillons classiques. De nombreuses perspectives s'ouvrent donc avec sa généralisation (Eggimann *et al.*, 2017).

Figure 3 : Extrait d'une série chronologique pluie, débit et turbidité, Écully (Rhône), 28 mai-2 juin 2007.



En Bref...

Le mesurage en continu des flux polluants par capteurs *in situ* apporte une information bien plus riche et pertinente que celle obtenue par les prélèvements classiques, chaque fois que les concentrations en polluants peuvent être estimées au moyen de capteurs (pH, conductivité, turbidité, spectrométrie UV-visible, sondes spécifiques, etc.). Les protocoles et les bonnes pratiques à mettre en œuvre (étalonnages réguliers, vérifications périodiques, validation de données, estimation des incertitudes) sont connus et disponibles depuis plusieurs années maintenant. La pratique du mesurage en continu pourrait bien davantage, si le poids des habitudes et le maintien d'exigences réglementaires dépassées ou dissuasives fondées quasi exclusivement sur les analyses normalisées sur échantillons ne constituaient pas des freins puissants.

POUR ALLER PLUS LOIN

- **Lombard V., Toloméo S., Bertrand-Krajewski J.-L., Debray R., Comte C., de Bénédictis J.** (2010). *Conception et mise en place de stations de mesure des flux polluants dédiées à la gestion intégrée d'un système d'assainissement*. Actes de Novatech 2010, Lyon, France, 27 juin-1^{er} juillet, 10 p. - Disponible sur <http://documents.irevues.inist.fr/handle/2042/35668> visité le 2 septembre 2020).
- **Métadier M. & Bertrand-Krajewski J.-L.** (2011). *Assessing dry weather flow contribution in TSS and COD storm event loads in combined sewer systems*. Water Science and Technology, 63(12), 2983-2991. doi:10.2166/wst.2011.185. – ic.cx/metadier2011
- Et pour concilier cinéphilie et hydrologie urbaine, le film *Le Troisième homme*, de Carol Reed, Grand Prix du Festival de Cannes 1949, scénario de Graham Green, musique originale d'Anton Karas, avec une intrigue policière, des espions, des crimes, des victimes, une enquête, des fausses pistes, et plusieurs scènes avec Orson Welles dans les égouts de Vienne en Autriche. Complément indispensable : Timmermann B. & Baker F. (2002). *Der dritte Man* [le troisième homme]. Wien (Austria) : Czernin Verlag, 288 p. ISBN 978-3-7076-0143-9. (en allemand) – ic.cx/troisiemehomme

Mesurer les performances des techniques alternatives à la source est-ce si facile ?

Sylvie Barraud et Hélène Castebrunet, INSA Lyon

La diminution du ruissellement et de la contamination des eaux pluviales est régulièrement mise en avant pour promouvoir les techniques alternatives à la source. En effet, la gestion des flux polluants y est favorisée par la limitation des volumes d'eaux qui ruissellent, réduisant du même coup les quantités de rejets polluants associés, ainsi que par le piégeage d'une partie des polluants dans les ouvrages. Mais seule une instrumentation fiable et ambitieuse peut permettre de connaître leur réelle efficacité hydrologique et épuratoire. Or, instrumenter ces ouvrages n'est pas aisé et demande une réelle expertise.

Les questions autour de l'efficacité des ouvrages de gestion à la source

Les solutions alternatives de gestion des eaux pluviales à la source (noues, chaussées réservoirs, toitures végétalisées, puits, biofiltres, tranchées, etc.) sont désormais largement

promues car elles sont censées diminuer les flux d'eau et réduire leur contamination par limitation du lessivage, piégeage ou filtration/décantation. En outre, elles sont souvent plurifonctionnelles et intégrées aux aménagements urbains en termes architecturaux et paysagers.

Mais sont-elles réellement efficaces des points de vue hydrologique et épuratoire ? Comment peut-on suivre ces dispositifs ?

Répondre à ces questions requiert de s'en poser plusieurs autres :

- Quelles performances cherche-t-on à mesurer connaissant la multifonctionnalité des ouvrages (lutte contre les inondations, aptitude à limiter les rejets polluants, bonne intégration à l'aménagement) ? Quels sont les indicateurs à définir et pour quels objectifs ? Quelles sont les grandeurs à suivre ?
- À quelles échelles d'espace et de temps évalue-t-on ces performances : locale ou à l'échelle du bassin versant muni de techniques alternatives ? événementielle ou annuelle ?

Est traitée ici la question de la performance locale d'un ouvrage ou d'un élément d'aménagement local vis-à-vis de la limitation des flux d'eau (débits et volumes) et des polluants à l'échelle des événements pluvieux.

Photo 1 : Noue végétalisée drainant les eaux d'un parking du campus de la Doua à Villeurbanne.



Photo 2 : Vue des trois systèmes instrumentés (de gauche à droite : parking muni d'une noue, parking muni d'une tranchée, parking en chaussée réservoir et enrobé en béton drainant) – Ecocampus Villeurbanne.



L'instrumentation de ces ouvrages se heurte à plusieurs difficultés

Les solutions de gestion à la source sont basées sur des principes de rétention/stockage, d'infiltration (dans les substrats formant les ouvrages et/ou dans le sol sous-jacent) ou encore d'évapotranspiration. Lorsque l'on instrumente de tels ouvrages, les difficultés sont liées à :

- ▶ la variabilité forte des flux d'eau d'un événement à l'autre : le volume est nul en sortie pour de petites pluies et important pour des pluies de fortes hauteurs précipitées.
- ▶ la diversité des dispositifs d'entrée d'eau (par ruissellement de surface, conduite...) ou de sortie (drain, infiltration dans le sol, surverse...).
- ▶ la nécessité, lorsque l'on prélève les eaux pour quantifier leur niveau de contamination, de disposer d'une zone de référence pour la comparaison des grandeurs avec celles observées en sortie. En effet, les volumes d'entrée des dispositifs à la source étant souvent faibles (les surfaces drainées sont petites), tout prélèvement d'eau en entrée à des fins analytiques fausse les mesurages en sortie. Il faut donc trouver un artifice qui permet de s'affranchir de ce biais majeur.
- ▶ la place nécessaire pour implanter le dispositif métrologique sur des sites plurifonctionnels et de petites tailles.

Le dispositif de suivi mis en place dans le cadre de l'OTHU

Trois ouvrages et une zone de référence

Le campus Lyon tech La Doua à Villeurbanne est le site OTHU dédié à l'étude des techniques alternatives à la source. Dans le cadre du Plan Campus, il a été décidé de rénover les espaces publics avec une gestion alternative et intégrée des eaux pluviales. L'OTHU s'est saisi de cette opportunité pour implanter des équipements au moment des travaux, ce qui a facilité la mise en place d'une métrologie adaptée pour un suivi pérenne. L'objectif visé était de mesurer l'efficacité des systèmes alternatifs de gestion à la source en termes de limitation des rejets d'eau et de micropolluants (métaux, pesticides, retardateurs de flammes, HAP et alkylphénols). L'étude s'appuie sur le suivi *in situ* de trois systèmes drainant des eaux de ruissellement de parking (photo 2). Deux sont

des parkings similaires de 290 m² et 270 m² présentant une partie en stabilisé¹ et une partie en béton bitumineux, dont les eaux sont évacuées respectivement par une noue végétalisée et une tranchée de graves. Le troisième système est un parking en chaussée à structure réservoir (CSR) et revêtement drainant de 90 m². Les ouvrages ont été étanchés en fond de fouille pour les besoins expérimentaux.

Une zone de référence en chaussée traditionnelle imperméable de 90 m² contigue à la chaussée réservoir permet une comparaison des flux d'eau et de polluants entre un système classique de parking imperméable et des systèmes alternatifs de gestion à la source.

Le choix des indicateurs de performance et de la métrologie associée

Pour évaluer les performances épuratoires et hydrologiques des ouvrages, plusieurs indicateurs majeurs ont été choisis, et permettent de comparer la sortie de l'ouvrage et la sortie de la zone de référence. Ces indicateurs sont l'abattement des débits de pointe et des volumes, et l'abattement des concentrations et masses événementielles de polluants. L'analyse statistique des concentrations et des masses permet une évaluation du niveau de contamination des eaux pour différentes substances et une estimation contextualisée des performances observées.

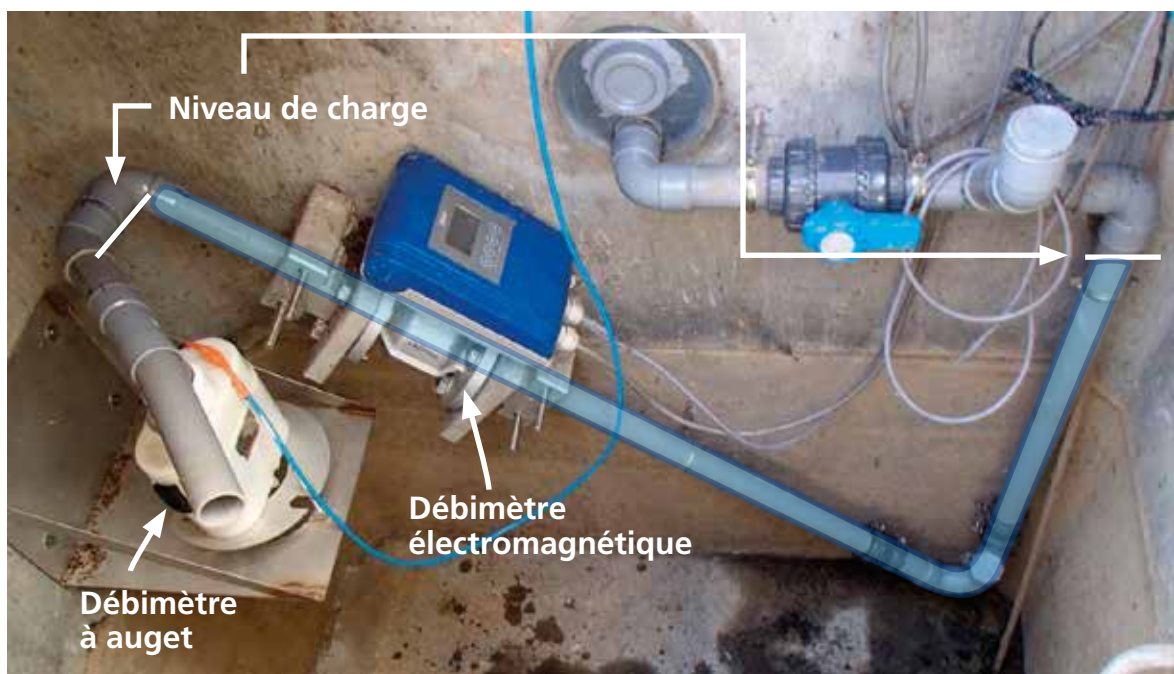
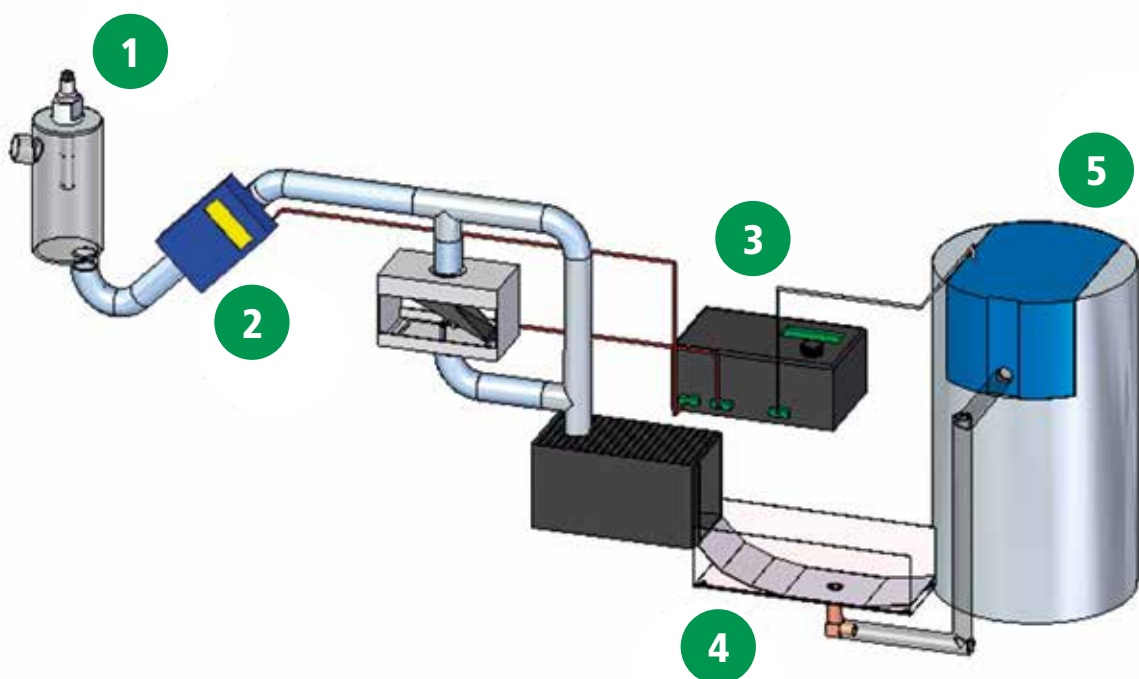
Les masses sont normées afin de prendre en compte les disparités des surfaces d'apport (masse au mètre carré actif). Les indicateurs sont déterminés pour chaque événement pluvieux et permettent d'évaluer les performances événementielles.

Pour calculer ces indicateurs, chaque ouvrage est équipé du dispositif métrologique suivant (figure 1, page suivante) :

- ▶ une zone en entrée **1** permettant de placer des capteurs (ex. conductivité, pH, température)
- ▶ un double mesurage de débit **2** : les petits débits (0 à 100 L/h) sont mesurés par un débitmètre à auget (20 g), les plus importants (75 à 3500 L/h) par un débitmètre électromagnétique. Sur la zone de recouvrement, le débit est moyenné.
- ▶ une centrale d'acquisition **3** qui recueille et archive les données en continu toutes les 2 minutes.
- ▶ un canal de prélèvement **4** prototype en inox dont la forme a été étudiée pour assurer l'homogénéisation du volume d'eau au moment du prélèvement.

¹ Les sols stabilisés sont un mélange de graviers, de sables, de fines et de liant, appliqués en une ou plusieurs couches.

Figure 1 : Schéma de principe du mesurage des flux d'eau et de micropolluants en sortie de systèmes de gestion à la source des eaux pluviales.
(Source : Garnier, 2020)



Les sous-échantillons sont prélevés au cours de la pluie proportionnellement au volume écoulé et dirigés vers un mono flacon ⑤ en plastique téflonné. Lorsque la pluie annoncée est de faible hauteur, le prélèvement est fait directement dans un bidon téflonné. Les effluents sont ensuite partitionnés pour analyse dans des flacons en verre ambré ou en plastique selon les substances à analyser.

Les enseignements de ce suivi : bonnes pratiques et erreurs à éviter

L'acquisition de données de bonne qualité est coûteuse en temps et en moyens humains. Elle demande tout d'abord de la réactivité. Le personnel doit être opérationnel dès que la pluie est annoncée et les échantillons doivent être envoyés rapidement aux laboratoires, pour être reçus et conditionnés dans les 24 heures, de manière à éviter les dégradations des polluants organiques étudiés. Et comme les laboratoires ne sont pas ouverts 24 heures sur 24, beaucoup de prélèvements ne peuvent être exploités : pluies des week-ends, jours fériés, arrivée tardive au laboratoire...

Les prélèvements d'échantillons nécessitent un asservissement fiable au mesurage du débit, c'est-à-dire des prélèvements effectués proportionnellement au volume des eaux sortant de l'ouvrage. Ceci permet d'obtenir un échantillon réellement représentatif des eaux étudiées à l'échelle de l'événement. Il faut également délimiter de manière rigoureuse les événements pluvieux dans le temps. Une erreur à ne pas commettre est de commencer à prélever avant que l'eau de la pluie précédente n'ait fini de passer à travers l'ouvrage.

Des résultats fiables requièrent une analyse des incertitudes. Les travaux de l'OTHU ont montré que les incertitudes de mesure des flux polluants proviennent davantage de la phase d'échantillonnage que de la phase d'analyse en laboratoire. Il faut également sélectionner des laboratoires qui garantissent des limites de détection et de quantification compatibles avec les gammes observées dans les eaux pluviales, en phases dissoute et particulaire.

Enfin, étancher les dispositifs est nécessaire pour échantillonner l'ensemble des rejets vers le milieu naturel, bien que ce soit difficilement transposable à des ouvrages construits. Mais c'est le tribut à payer pour obtenir des résultats fiables et contrôlables.

(Frustré-es de ne pas voir les résultats obtenus ? direction la Question 8.6 : *Quelle est l'efficacité des ouvrages alternatifs vis-à-vis des micropolluants ?*)

Pour une collectivité, est-ce utile (et réalisable) d'instrumenter ces ouvrages pour évaluer leurs performances vis-à-vis des polluants ?

Le diagnostic permanent des systèmes, requis par l'arrêté du 21 juillet 2015, incite les collectivités locales à avoir une bonne connaissance de leurs dispositifs de gestion des eaux pluviales. La tentation d'une instrumentation régulière et fiable des techniques à la source, même si elle n'est pas imposée par la réglementation, notamment pour évaluer leurs performances en termes de gestion des polluants, est grande. Or, il est fréquent que les services des collectivités ne disposent pas des capacités matérielles et de l'expertise nécessaire à la mise en place d'un tel dispositif. Il ressort des études sur les sites OTHU qu'une instrumentation fiable des techniques alternatives à la source nécessite des ressources matérielles, humaines et techniques importantes, difficilement mobilisables à l'échelle d'une agglomération entière. L'instrumentation scientifique collaborative entre collectivités et chercheurs sur des sites ciblés, diversifiés et représentatifs, avec des protocoles communs et le partage des pratiques métrologiques et des résultats, constitue une approche adaptée pour aller progressivement vers une amélioration de la connaissance des performances des ouvrages.

À retenir

Acteurs opérationnels de l'eau, plutôt que de vous lancer dans l'instrumentation et le suivi de techniques à la source, les données de programmes de recherche et d'études scientifiques sont à votre disposition, utilisez-les !

POUR ALLER PLUS LOIN

- **Garnier R.** (2020). *Systèmes alternatifs de gestion des eaux pluviales : Contribution à l'analyse de performances conjointes en matière d'hydrologie quantitative et de piégeage de micropolluants. Comparaison systèmes à la source – système centralisé.* Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon. 318 p. - ic.cx/metadier2011
- **Bacot L., Barraud S., Honegger A., Lagarrigue C.** (2020). *Synthèse opérationnelle du programme de recherche MicroMegs / Devenir des micropolluants au sein des ouvrages de gestion des eaux pluviales à la source ou centralisés.* Septembre 2020 – 18 p. - ic.cx/guidemicromegs

Comment mesurer le débit déversé par un déversoir d'orage ?

Gislain Lipeme Kouyi, INSA Lyon

Les déversoirs d'orage (DO) n'ont pas été initialement conçus pour simplifier le mesurage des débits. Leur fonctionnement hydraulique n'est pas maîtrisé, ce qui rend leur instrumentation difficile. En outre, la réglementation impose de mesurer et d'enregistrer en continu les débits rejetés par les principaux DO. Cette exigence réglementaire traduit l'enjeu environnemental que constituent ces déversements d'eau non traitée. Or, si l'autosurveillance de ces ouvrages doit permettre aux exploitants de mieux maîtriser les rejets polluants au milieu, elle peut aussi s'avérer complexe à mettre en œuvre.

Ils conduisent ainsi, en temps de pluie, au rejet d'eau non traitée vers les milieux aquatiques. Les rejets des déversoirs contribuent à la dégradation des milieux aquatiques. À titre d'illustration, la Métropole de Lyon a procédé à une évaluation globale de ces rejets (Grand Lyon, 2017) : sur l'année 2015, les volumes déversés ont représenté près de 7 % du volume total collecté par les réseaux. La charge polluante de ces 7 % d'eau non traitée est équivalente à celle véhiculée par les 93 % d'eau traitée en sortie de STEP. En outre, l'arrêté du 21 juillet 2015 relatif notamment à l'autosurveillance du système de collecte, impose de mesurer en continu les débits et d'estimer la charge polluante au niveau des principaux DO situés à l'aval d'un tronçon destiné à collecter une charge brute de pollution organique par temps sec supérieure ou égale à 600 kg/j de DBO₅ (demande biochimique en oxygène en 5 jours), lorsqu'ils déversent plus de dix jours par an en moyenne quinquennale. C'est pourquoi il est indispensable de quantifier et de qualifier ces rejets.

Les rejets des DO contribuent à la dégradation des milieux aquatiques

Les déversoirs d'orage (DO) sont des ouvrages de dérivation installés dans les réseaux d'assainissement unitaires. Ils permettent de protéger les ouvrages aval, et notamment la station d'épuration (STEP), contre les surcharges hydrauliques.

Les méthodes classiques de mesure des débits et volumes déversés

La figure 1 illustre les principales méthodes de mesure des débits et volumes déversés, dont les avantages et faiblesses respectives sont décrites dans le tableau 1.

Figure 1 : Méthodes de mesure du débit déversé (source : adaptée de A. Mate Marin, 2017).

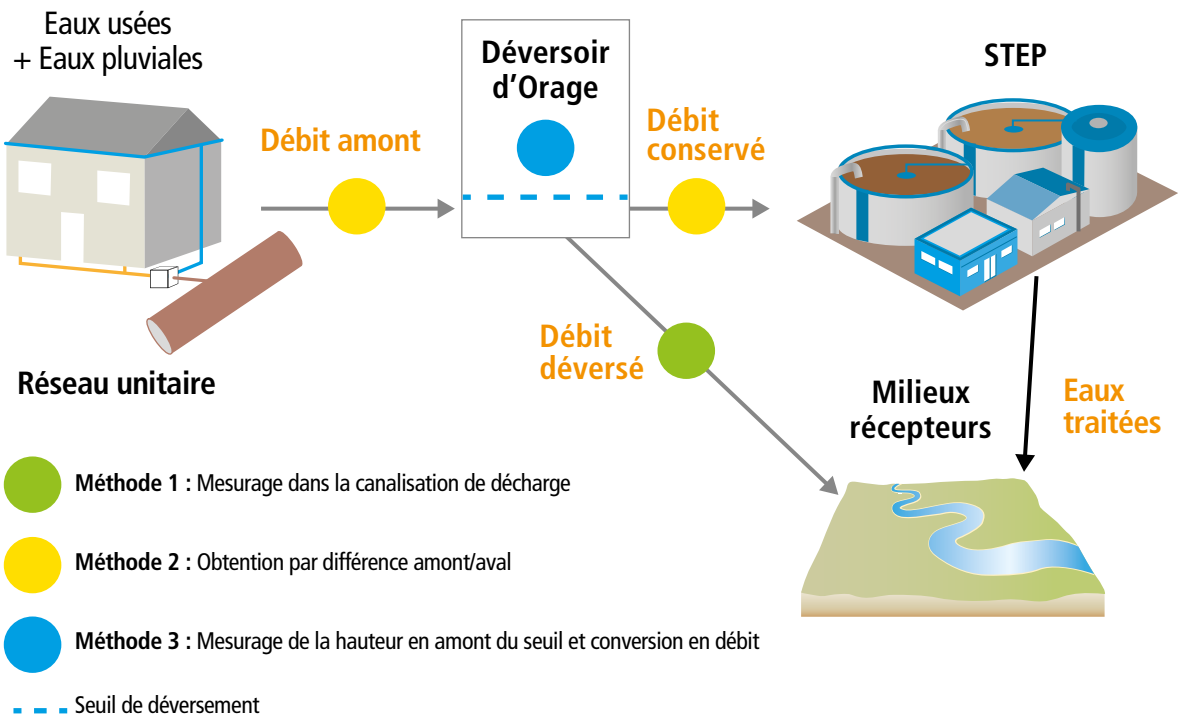


Tableau 1 : Avantages et faiblesses des méthodes de mesure des débits et volumes déversés.

	Avantages	Faiblesses
MÉTHODE 1 Mesurage dans la canalisation de décharge	▶ Obtention directe du débit déversé ▶ Un seul point de mesure	▶ Perturbations liées à l'influence aval due à l'intrusion du milieu naturel ▶ Capteurs la plupart du temps « au sec », pouvant entraîner leur dérive et une production de données aberrantes ▶ Faible accessibilité et maintenance difficile ▶ Emplacement pas toujours approprié
MÉTHODE 2 Obtention par différence amont/aval	▶ Simplicité (différence amont/aval)	▶ Doublement des points de mesure ▶ Coût d'entretien et de maintenance ▶ Accroissement des incertitudes sur le débit déversé
MÉTHODE 3 Mesurage à l'amont du seuil et conversion hauteur/débit	▶ Relation hauteur/débit ▶ Moins d'entretien	▶ Sensibilité aux conditions d'écoulement à l'amont et à l'aval ▶ Relation hauteur/débit non valide si présence de dépôt

Des mesurages délicats en raison d'un fonctionnement hydraulique complexe

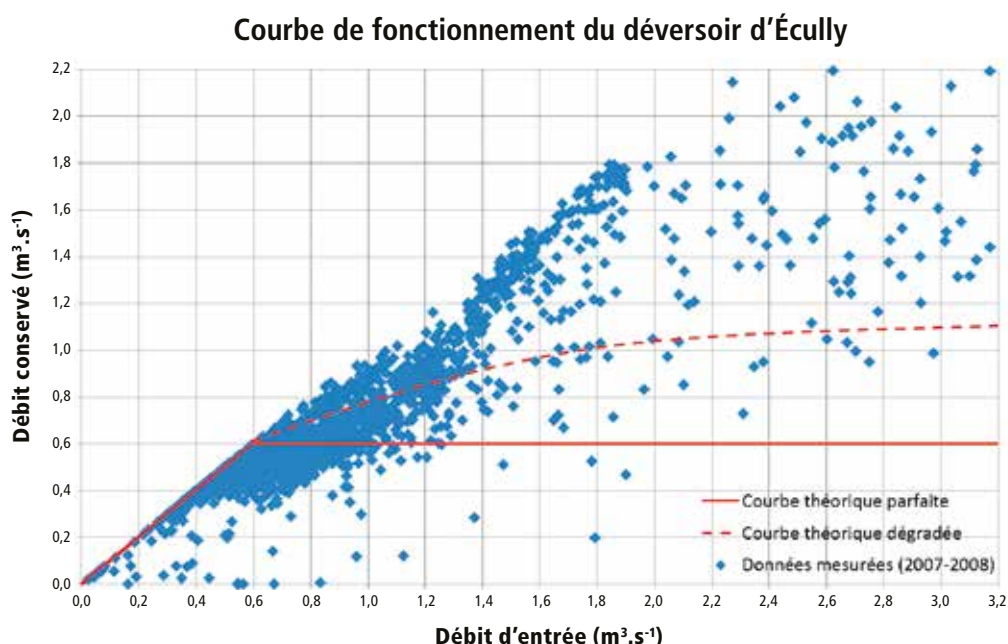
Les déversoirs d'orage ont souvent un fonctionnement hydraulique complexe (voir Question 8.1: À quoi sert un déversoir d'orage et comment fonctionne-t-il ?). Le déversoir

d'orage d'Ecully a été instrumenté dans le cadre de l'OTHU (photo 1). Il s'agit d'un déversoir latéral à crête haute soumis à l'autosurveillance réglementaire. Le débit déversé chute de 6 m pour rejoindre la canalisation de décharge. Depuis 2002, des débitmètres ont été installés à l'amont et dans la canalisation de décharge.

Photo 1 : Géométrie du déversoir d'Ecully (source : Momplot, 2014).



Figure 2 : Courbe de fonctionnement du déversoir d'Écully : débit conservé vers l'aval en fonction du débit amont (source: Momplot, 2014).



Entre 2002 et 2014, la méthode 1 était utilisée. Cependant, deux problèmes majeurs affectaient la qualité des données sur cette période, à savoir :

- a : l'intrusion du milieu naturel (ruisseau des Planches) dans la canalisation de décharge pour certains événements pluvieux ;
- b : l'entraînement d'air dû à la chute de 6 m.

La figure 2 montre le degré de dispersion des données de débits déversés collectées en 2007-2008.

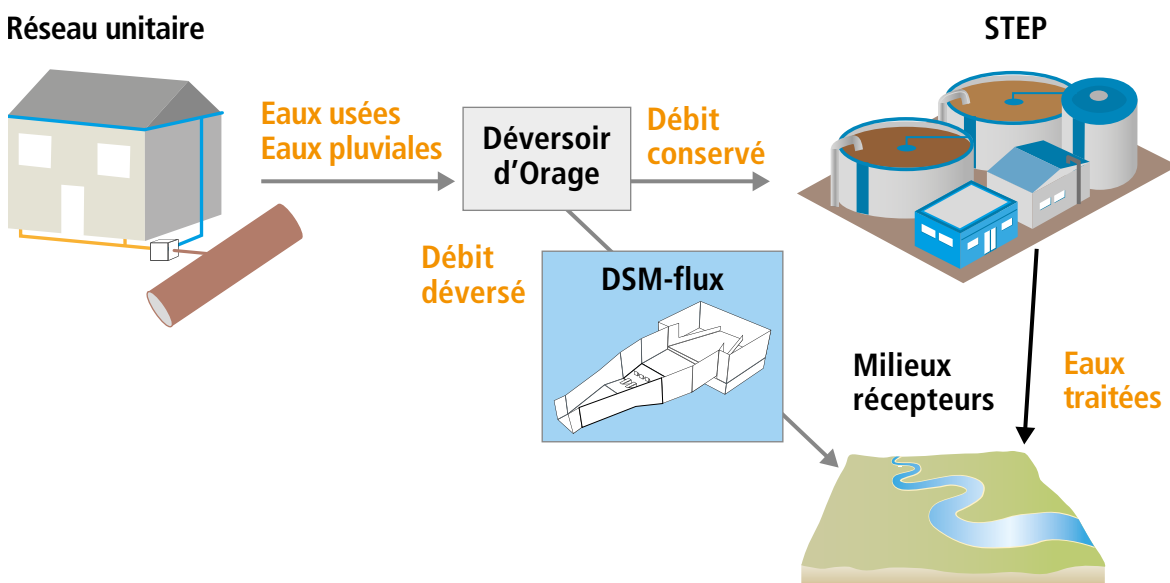
construite à partir des résultats issus de la modélisation 3D du déversoir d'Écully. Cette nouvelle méthode est semblable à la méthode 3 (figure 1). En effet, elle utilise des valeurs mesurées du débit dans la canalisation amont et des débits déversés obtenus par modélisation 3D. Cette méthode est malgré tout dépendante des conditions d'écoulement à l'amont, elles-mêmes fonction de la géométrie du déversoir et des changements géométriques ou hydrologiques amont. Par ailleurs, une solution alternative a été mise au point et brevetée en 2014 (Lipeme Kouyi *et al.*, 2014). Elle repose sur l'installation d'un canal de mesure du débit déversé au niveau de l'espace de décharge (voir le positionnement au sein du réseau d'assainissement sur la figure 3). Ce canal original est appelé DSM-flux (dispositif de surveillance et de maîtrise de flux déversés).

Améliorer le mesurage du débit déversé

Suite à ce constat, une relation entre le débit amont et le débit déversé a été proposée en 2014. Cette relation a été

Figure 3 : Illustration de l'installation d'un DSM-flux au niveau de l'espace de décharge d'un déversoir d'orage.
(Source : adaptée de A. Mate Marin, 2017).

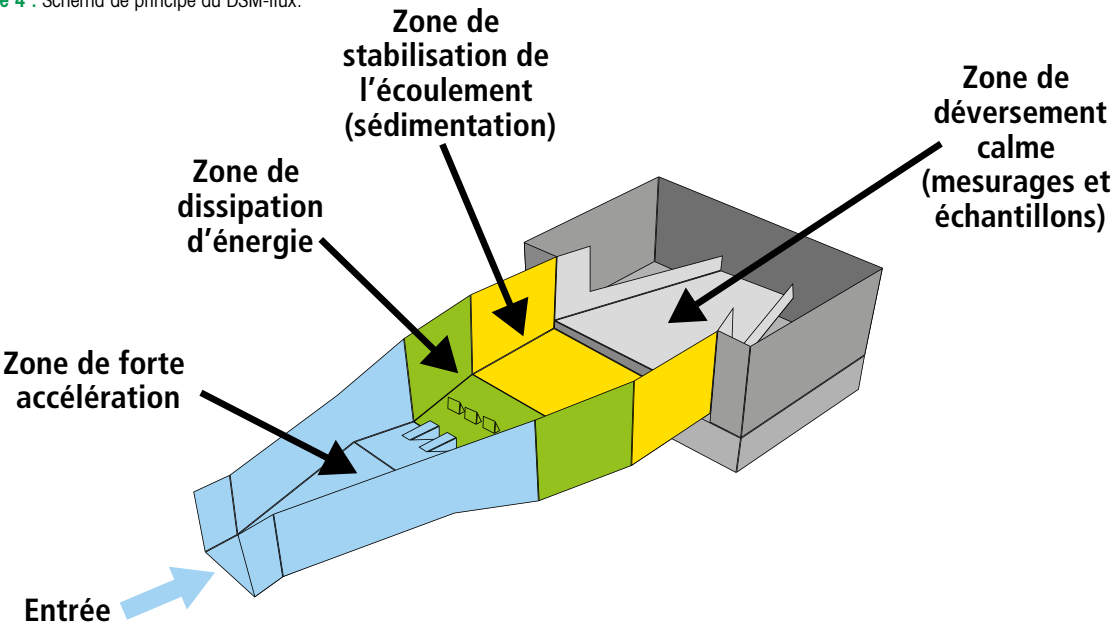
Réseau unitaire



Le DSM-flux est une alternative aux méthodes existantes et permet de mesurer les débits et les concentrations en polluants déversés. Une loi hauteur-débit robuste, c'est à dire valide quelles que soient les conditions d'écoulement

en entrée, permet d'obtenir les débits avec une incertitude relative inférieure à 15 %. Les volumes déversés sont connus à 1 % près. La figure 4 indique le schéma de principe de ce dispositif.

Figure 4 : Schéma de principe du DSM-flux.



En Bref...

Il n'est pas simple de mesurer le débit déversé par un déversoir d'orage. Si le comportement hydrodynamique (notamment la forme de la surface libre) le permet et si aucun changement n'intervient au niveau des configurations d'écoulement à l'amont et/ou à l'aval, il faut privilégier une relation hauteur/débit ou débit amont/débit déversé (méthode 3). Une modélisation 3D peut améliorer l'établissement de cette relation. Il est généralement impossible de mesurer de manière fiable le débit déversé simplement dans la canalisation de décharge, sauf si la géométrie du site permet un aménagement spécifique adapté, de type DSM-flux. Quelle que soit la configuration du déversoir, il est indispensable de faire une analyse préalable du fonctionnement hydraulique du DO avant toute instrumentation !

POUR ALLER PLUS LOIN

- **Fiche méthodologique n° 6 :**
Calcul du débit à partir de la hauteur d'eau, GRAIE – Groupe de travail Autosurveillance, 3 p. (2018) – lc.cx/FicheTechGraie-autoN6 – Ainsi que toutes les productions du groupe de travail GRAIE Autosurveillance – lc.cx/ProdGraieAutosur

Le vivant au service de la métrologie de terrain : quels bioindicateurs pour mesurer les impacts des rejets urbains par temps de pluie sur les milieux récepteurs ?

Florian Mermillod-Blondin, Pierre Marmonier, CNRS et Université Lyon 1 –
Claude Durrieu, Antoine Gosset, ENTPE

Depuis plusieurs années, l'OTHU travaille sur le développement d'outils de mesure biologiques *in situ*, pour mettre le vivant au service de la métrologie de terrain et de l'évaluation de l'impact des rejets urbains de temps de pluie (RUTP) sur les milieux aquatiques.

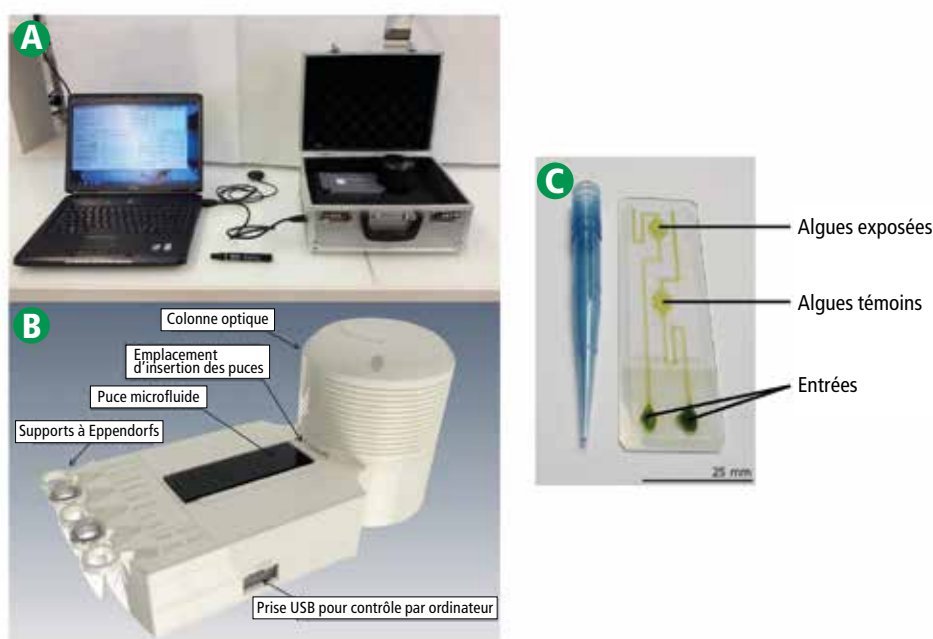
Les limites des approches classiques

L'évaluation de la qualité des milieux aquatiques en entrée et à l'aval des systèmes de gestion des RUTP passe classiquement par des analyses physico-chimiques permettant de mesurer les flux d'eau, les polluants associés ainsi que la performance environnementale des ouvrages. Néanmoins, ces analyses sont insuffisantes : la caractérisation de l'état écologique des systèmes passe également par l'utilisation de bioindicateurs qui permettent d'évaluer l'atteinte des écosystèmes recevant des RUTP.

Dans le cadre de l'OTHU, différents types de bioessais écotoxicologiques, normalisés ou non, ont été mis en œuvre sur des échantillons d'eaux pluviales et de rejets de déversoirs d'orage. L'objectif est de mesurer les effets des RUTP sur le vivant, au moyen d'organismes représentatifs : algues vertes unicellulaires (*Chlorella vulgaris*, *Pseudokirchneriella subcapitata*, *Chlamydomonas reinhardtii*) et micro-crustacés (*Brachionus calyciflorus*, *Daphnia magna*, *Ceriodaphnia dubia*, *Heterocypris incongruens*). Ces bioessais sont des tests de laboratoire ne prenant pas en compte la dynamique des systèmes étudiés. Ils sont en effet réalisés dans des conditions contrôlées sur des échantillons prélevés à un instant donné. Une approche « capteur » a donc été développée afin de mesurer *in situ* et en continu la réponse d'organismes aquatiques à des arrivées de contaminants organiques (ex. pesticides), inorganiques (ex. nitrates) et métalliques.

De plus, dans les écosystèmes souterrains (nappes impactées par l'arrivée d'eaux pluviales), les critères d'évaluation de la qualité des eaux sont habituellement limités à des variables physiques et chimiques sans considérer des outils d'évaluation biologiques. Cela est lié d'une part à l'accessibilité du milieu

Figure 1 : Photographie d'ensemble (A) et représentation 3D du biocapteur algal microfluidique développé (B), et photographie de la puce microfluidique contenant des microalgues analysées (C). Modifié d'après Gosset *et al.* (2018).



qui rend difficile l'échantillonnage biologique et d'autre part à la Directive Cadre sur l'Eau qui, à l'inverse des eaux de surface, ne prend pas en compte les indicateurs biologiques dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines. Les travaux de l'OTHU ont cherché à combler ce manque en proposant des outils utilisant des micro-organismes et des invertébrés pour évaluer la qualité des aquifères impactés ou non par l'infiltration d'eaux de ruissellement pluvial.

Plusieurs outils de mesures *in situ* ont été développés

Des biocapteurs algaux sensibles aux métaux et aux pesticides

Un biocapteur peut être défini comme un dispositif associant un élément biologique avec un système de mesure permettant d'analyser *in situ* la réponse de cet élément aux variations environnementales auxquelles il est soumis. Les éléments biologiques utilisés ici sont des algues unicellulaires. On parle donc de biocapteurs algaux.

Le principe de fonctionnement de tels outils est basé sur l'immobilisation d'algues unicellulaires sur des supports eux-mêmes reliés à des transducteurs. Ces transducteurs permettent de rendre compte de l'état physiologique des algues en convertissant un phénomène biochimique en un signal physique facilement mesurable. Différents phénomènes biologiques peuvent être ainsi étudiés, comme l'émission de fluorescence par les chlorophylles (pigments verts des végétaux) ou bien des activités enzymatiques (les phosphatases alcalines et estérases étant les plus étudiées). Les transducteurs utilisés peuvent être :

- des fibres optiques : pour le suivi de la fluorescence émise par les chlorophylles ou la transformation de produits fluorescents liée à l'activité des enzymes ;
- des éléments conductimétriques (ex. électrodes) permettant de suivre des modifications de conductivité d'un milieu générées par des réactions enzymatiques.

La sensibilité de ces capteurs est très dépendante de la méthode d'immobilisation des algues au contact ou à proximité immédiate du transducteur. Différentes méthodes ont été testées à ce jour. Elles peuvent être :

- physiques : par piégeage direct des cellules algales sur des membranes en fibres de verre ou de quartz ou par encapsulation dans des matrices de silice.
- chimiques : par réticulation, un processus de jonction chimique de plusieurs molécules par liaison covalente à l'aide d'un agent de réticulation (ex. glutaraldéhyde) des algues avec de l'albumine, une protéine naturelle présente notamment dans le blanc d'œuf ou le sang.

Ces différentes méthodes ont permis la conception de capteurs innovants pour leur spécificité de détection. A ce jour, les capteurs conductimétriques semblent plus adaptés à la détection des métaux alors que les méthodes optiques reposant sur la fluorescence des chlorophylles apparaissent plus performantes pour la détection des phytosanitaires.

Toutefois, l'immobilisation des algues constitue dans tous les cas une barrière plus ou moins étanche aux molécules présentes dans le milieu étudié. Pour résoudre cette difficulté, nous avons développé un biocapteur optique étudiant la perturbation de la fluorescence chlorophyllienne des algues. Il est basé sur l'utilisation de puces microfluidiques (figure 1 C), dans lesquelles les algues ne sont plus immobilisées, mais en libre circulation dans des micro-capillaires d'une centaine de microns de diamètre. Ceci permet de conserver l'ensemble des échanges entre les algues et les molécules présentes dans les milieux étudiés, de la même manière qu'en laboratoire. Ces puces sont insérées dans un système optique incluant LED et photodétecteurs, reliés à un logiciel d'acquisition de données sur ordinateur portable (figure 1A).

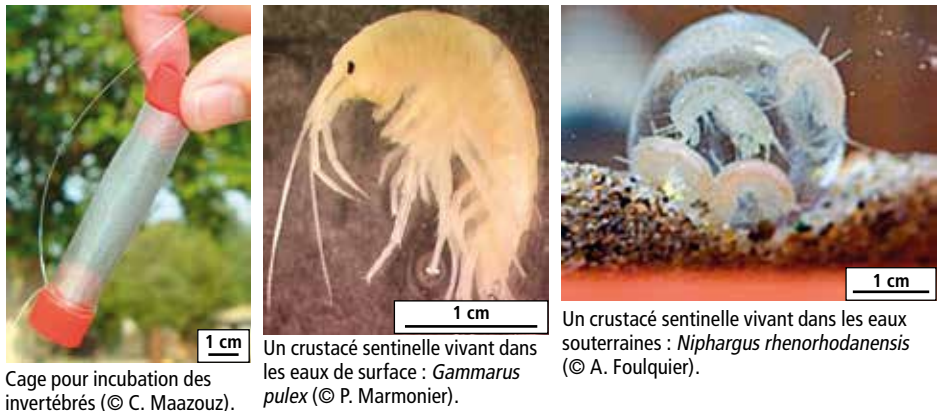
Des substrats artificiels pour échantillonner les micro-organismes des nappes

L'originalité de cette approche est d'utiliser des substrats artificiels dans les piézomètres des sites de l'OTHU (voir Question 6.1 *Quel est l'impact des bassins d'infiltration d'eaux pluviales sur les nappes phréatiques ?*) afin d'échantillonner les micro-organismes présents dans la nappe en amont et en aval des ouvrages d'infiltration. Après une durée d'incubation dans la nappe, les substrats sont collectés et analysés pour estimer la biomasse et l'activité des micro-organismes développés sur les substrats (biofilms microbiens). Ces variables mesurées sur les biofilms microbiens ont pour but d'évaluer la quantité de matière organique biodisponible dans la nappe phréatique apportée par l'infiltration d'eaux pluviales. En effet, la quantité de matière organique étant un élément limitant pour les micro-organismes dans la nappe, un enrichissement de la nappe par des apports organiques provenant de la surface peut se refléter sur le développement des biofilms microbiens.

L'encagement d'invertébrés aquatiques dans les eaux souterraines

L'approche développée vise à incuber des invertébrés dans des tubes grillagés en inox et à mesurer leur état physiologique (ou état de santé) au bout d'incubations de quelques semaines. Cet état de santé est une combinaison de leur taux de mortalité et de leur niveau en réserves énergétiques (glycogène et triglycéride). Après avoir testé plusieurs espèces, deux invertébrés différents ont été utilisés : des crustacés vivant dans les eaux de surface (*Gammarus pulex*) ou dans les eaux de nappe (*Niphargus rheinorhodanensis*, figure 2).

Figure 2 : Photos des systèmes d'encagement et des invertébrés utilisés.

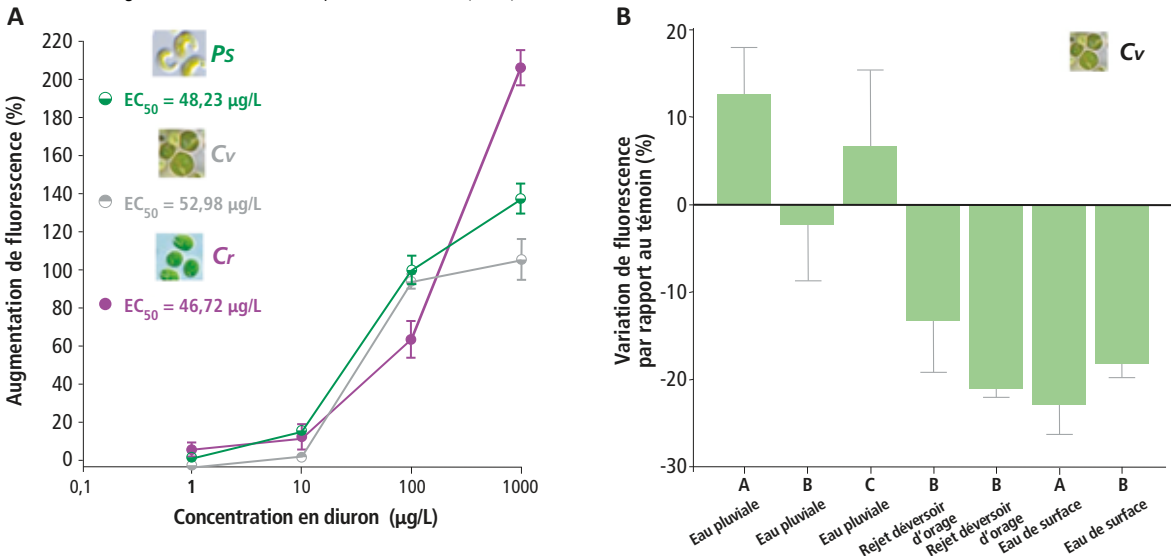


Cage pour incubation des invertébrés (© C. Maazouz).

Un crustacé sentinelle vivant dans les eaux de surface : *Gammarus pulex* (© P. Marmonier).

Un crustacé sentinelle vivant dans les eaux souterraines : *Niphargus rheinorhodanensis* (© A. Foulquier).

Figure 3 : **A :** Réponse du capteur au diuron pour trois espèces de microalgues (Cv : *Chlorella vulgaris*; Ps : *Pseudokirchneriella subcapitata*; Cr : *Chlamydomonas reinhardtii*). EC50 : concentration en substance (ici diuron) engendrant un effet de 50 % (ici augmentation de la fluorescence des algues) par rapport aux contrôles. **B :** Exemple de réponse du capteur après exposition (5 minutes) de *Chlorella vulgaris* à différents échantillons d'eaux pluviales, rejets de déversoirs d'orage et eaux de surface contaminées. Les grandeurs mesurées sont les différences de fluorescence chlorophyllienne (positives ou négatives) des algues exposées par rapport à des algues témoins. Modifié d'après Gosset *et al.* (2018).



Les principaux résultats

La microfluidique, une piste prometteuse pour la détection des micropolluants

Avec le développement de la station microfluidique, il a été possible de répondre à toutes les contraintes d'utilisation sur le terrain. La validation du capteur avec un pesticide seul (diuron, figure 3) a montré la sensibilité du dispositif (réponse à des faibles concentrations), après des temps d'exposition très courts (5-20 minutes). Les premiers résultats obtenus sur des rejets urbains par temps de pluie (figure 3B) sont prometteurs pour la détection de micropolluants écotoxiques, notamment ceux qui agissent directement sur le niveau de fluorescence des algues (ex. pesticides).

Les biofilms sont de bons indicateurs de l'état trophique des nappes

Pour deux saisons (printemps et automne), les substrats artificiels ont été incubés durant deux mois dans les piézomètres amont et aval de trois bassins d'infiltration suivis par l'OTHU (IUT, Minerve et Grange Blanche). Lors de l'incubation, l'analyse physico-chimique des nutriments

présents dans les eaux souterraines a été réalisée à trois occasions dans chacun des piézomètres. Les biofilms ayant poussé sur les billes du substrat artificiel ont également fait l'objet d'analyses après deux mois d'incubation dans l'eau souterraine. Ces analyses, consistant à mesurer la croissance et les activités enzymatiques des biofilms, ont permis de nous renseigner sur la disponibilité en nutriments (principalement du carbone organique dissous et des phosphates) et sur la contamination de la nappe par les apports d'eau de surface en aval des bassins. Elles ont révélé que les biofilms étaient plus développés et plus actifs en aval des bassins en comparaison avec les zones témoin. De plus, les biomasses et activités mesurées étaient corrélées positivement avec les teneurs en carbone organique dissous et, secondairement, aux teneurs en phosphates (figure 4). Cette méthode permet donc d'obtenir une évaluation intégrée dans le temps du degré de perturbation de la nappe.

L'état de santé des invertébrés encagés est un bon indicateur de la pollution de la nappe

Les invertébrés ont été encagés et immergés dans l'eau de nappe au fond de piézomètres situés en amont (témoin)

Figure 4 : Relation entre qualité de l'eau de nappe (carbone organique dissous en **A** et phosphates en **B**) et biomasse des biofilms après deux mois d'incubation (protéines en **A**, carbohydrates en **B**) à deux périodes de l'année (automne en vert, printemps en blanc). D'après Mermillod-Blondin *et al.* (2013).

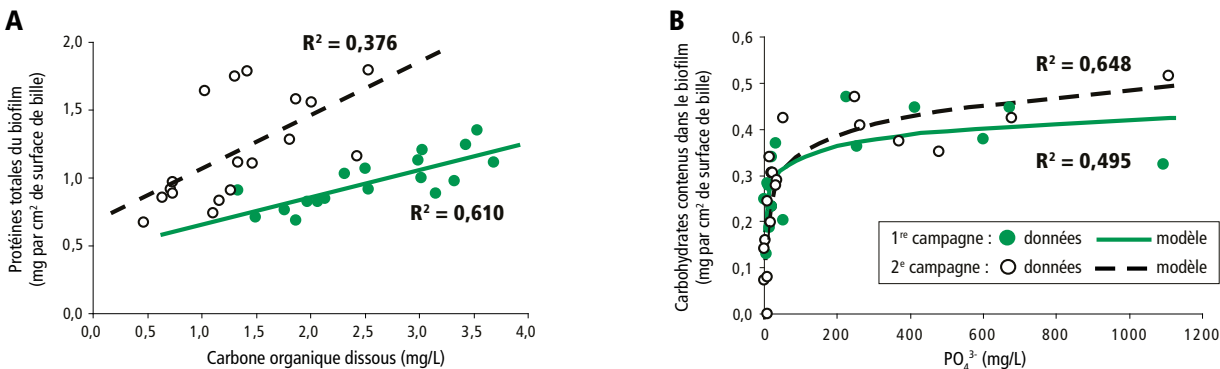
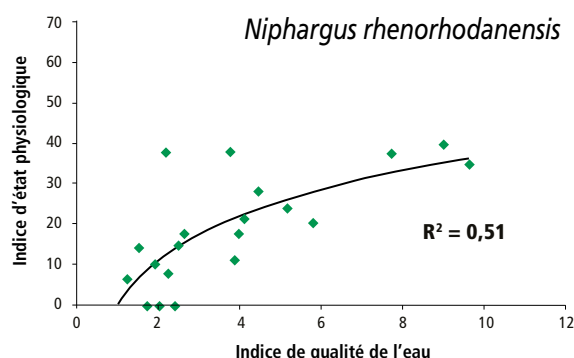
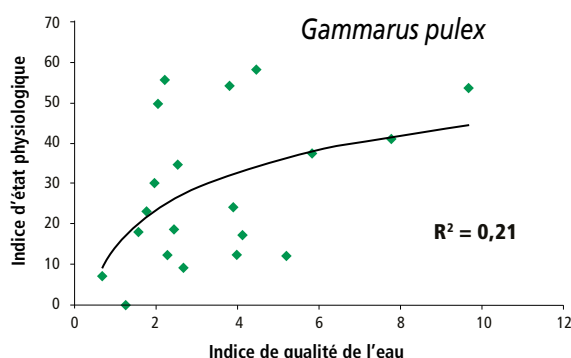


Figure 5 : Relation entre l'indice d'état de santé des invertébrés (combinant mortalité et niveaux des réserves énergétiques) et l'indice de qualité chimique des eaux souterraines (combinant concentrations en oxygène et en matière organique). Les corrélations pour les deux espèces sont significatives (p -value = 0,019 pour *Gammarus* et p -value = 0,0002 pour *Niphargus*) même si une forte dispersion est observée pour les valeurs de qualité d'eau intermédiaires.



et en aval (impacté) de quatre bassins d'infiltration d'eaux pluviales. La détermination du simple taux de survie de ces invertébrés après une semaine (pour le *Gammarus* vivant dans l'eau de surface) ou au bout d'un mois (pour le *Niphargus* vivant dans les nappes) n'est pas très informative. Cette survie est globalement bonne et semble surtout contrôlée par les crises d'anoxie (privation d'oxygène). En revanche, lorsque la survie est combinée au niveau des réserves énergétiques, l'indice d'état de santé des sentinelles obtenu est plus faible en aval des bassins d'infiltration et significativement corrélé à la qualité des eaux de nappe (figure 5). Ce lien entre état de santé et qualité de l'eau de nappe est meilleur lorsqu'on utilise des organismes souterrains car ceux-ci sont plus résistants aux contraintes environnementales et peuvent donc rester plus longtemps dans le milieu.

Plusieurs développements en cours et à venir

Concernant les biocapteurs, nous avons pour projet de faire évoluer le dispositif microfluidique vers un système « lab on chip » qui permettrait d'étudier simultanément la réponse de plusieurs paramètres sur différentes espèces algales. Ceci permettrait de multiplier les données afin de mieux cibler les contaminants à détecter.

La méthodologie basée sur l'utilisation des biofilms comme indicateurs des effets de l'infiltration des eaux pluviales sur la nappe est très prometteuse. A travers des outils moléculaires permettant de déterminer les espèces bactériennes présentes dans les biofilms, il est maintenant possible d'évaluer les changements de communautés bactériennes liées aux pratiques d'infiltration et de rechercher spécifiquement la présence d'agents pathogènes (voir Question 5.3 : *Quels sont les contaminants microbiologiques transportés dans les RUTP et quel est leur niveau de dangerosité pour l'Homme ?*).

Pour les encagements, il est prévu de faire évoluer la méthodologie en utilisant le crustacé isopode *Asellus aquaticus* qui dispose de plusieurs avantages : facilité d'accès au matériel biologique, utilisation dans de nombreuses expériences d'écotoxicologie, approches génomiques déjà développées sur cet organisme. Avec cette espèce, il sera possible d'aller plus loin dans les effets mesurés sur les organismes via l'expression des gènes exprimés en fonction des polluants présents.

En Bref...

Les travaux réalisés dans le cadre de l'OTHU ont permis le développement de bioindicateurs pertinents pour l'évaluation de la qualité des eaux de ruissellement pluvial et des milieux aquatiques (eaux de surface, eaux de nappe). En complément des approches chimiques traditionnelles (ponctuelles), ces outils intégrateurs apportent un éclairage nouveau sur l'état écologique de systèmes dynamiques impactés par les RUTP.

POUR ALLER PLUS LOIN

- Gosset A., Durrieu C., Renaud L., Deman AL., Barbe P., Bayard R., Chateaux J.-F. (2018). *Xurography-based microfluidic algal biosensor and dedicated portable measurement station for online monitoring of urban polluted samples* – Biosensors and Bioelectronics 117: 669-677. - 10.1016/j.bios.2018.07.005 – [lc.cx/gosset2018](https://doi.org/10.1016/j.bios.2018.07.005)
- Mermillod-Blondin F., Foulquier A., Maazouzi C., Navel S., Negrutu Y., Vienney A., Simon L., Marmonier P. (2013). *Ecological assessment of groundwater trophic status by using artificial substrates to monitor biofilm growth and activity*. Ecological Indicators 25: 230-238. - 10.1016/j.ecolind.2012.09.026 – [lc.cx/mermillod2013](https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.09.026)
- Marmonier P., Maazouzi C., Foulquier A., Navel S., Francois C., Hervant F., Mermillod-Blondin F., Vienney A., Barraud S., Togola A., Piscart C. (2013). *The use of crustaceans as sentinel organisms to evaluate groundwater ecological quality*. Ecological Engineering 57: 118-132. - 10.1016/j.ecoleng.2013.04.009 – [lc.cx/marmonier2013](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.04.009)

Comment produire des données de qualité et exploitables durablement ?

Flora Branger, INRAE Lyon – Nicolas Walcker, INSA Lyon – Laëtitia Bacot, Graie

La production de données de qualité, leur gestion dans le temps et leur mise à disposition représentent un véritable défi pour les chercheurs et les opérationnels de la gestion de l’eau. Répondre à ce défi nécessite d’appliquer un processus de capitalisation des données rigoureux, allant de la mise en place de la chaîne de mesures jusqu’à l’étape finale de partage.

Des enjeux scientifiques, opérationnels et réglementaires

Les enjeux de gestion des réseaux d’assainissement et des techniques de gestion à la source des eaux pluviales, les obligations réglementaires d’auto-surveillance et la volonté accrue, au niveau recherche comme au niveau opérationnel, de mieux comprendre le fonctionnement des systèmes urbains, conduisent à l’acquisition d’une grande quantité de données de terrain. Cependant, un enjeu majeur est de s’assurer que ces données soient de qualité suffisante pour répondre aux questions posées. Un second enjeu est qu’elles soient conservées de façon adéquate pour être exploitées avec succès et durablement, dans le respect des principes FAIR: Findable Accessible Interoperable and Reusable, c’est à dire en français Trouvables, Accessibles, Interopérables et Réutilisables (Wilkinson *et al.*, 2016). A cela s’ajoute une injonction réglementaire européenne (Directive EU 2019/1024 portant sur les données ouvertes) qui requiert que toutes les données produites par des activités publiques (recherche, services de l’État, collectivités territoriales) soient rendues

librement accessibles. Le processus de capitalisation de la donnée doit donc prendre en compte ces enjeux dès le départ.

Le processus de capitalisation des données

La capitalisation des données est un processus progressif en plusieurs étapes qui s’applique à toute la chaîne de mesure. Il commence donc dès l’installation des capteurs et échantillonneurs sur le terrain et va jusqu’à la qualification, la bancarisation et le partage des données (figure 1).

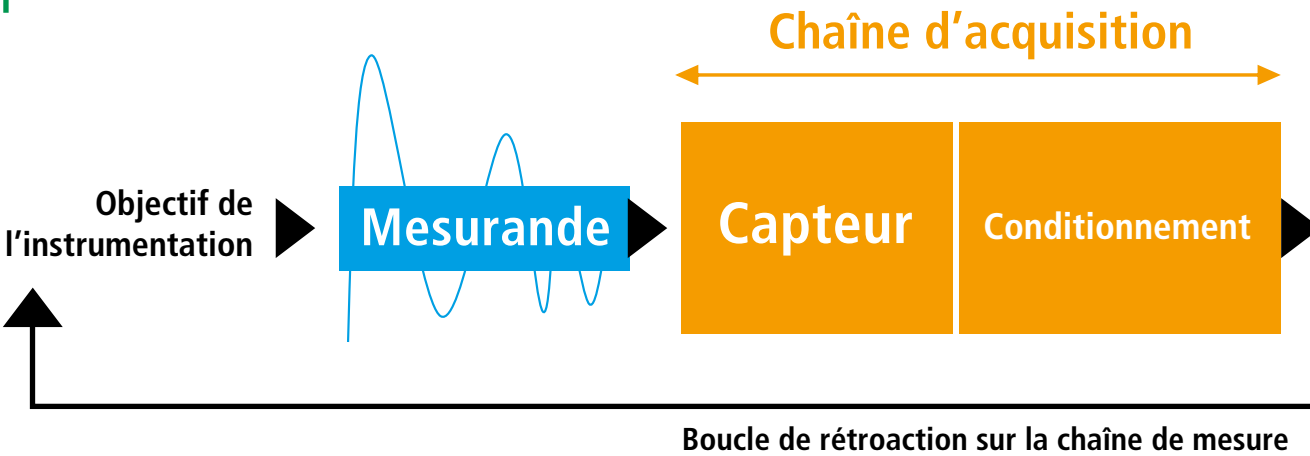
Une fois la chaîne d’acquisition choisie et installée, ce processus se décline selon les étapes suivantes.

ÉTAPE 1 : Maintenance des capteurs, vérifications et étalonnages

La première étape de vérification de terrain est la maintenance des capteurs et des éléments de conditionnement du signal. Elle comporte les opérations habituelles d’étalonnage périodique, de contrôle du bon fonctionnement, de nettoyage, et des opérations de vérification par réalisation de mesurages ponctuels de valeurs connues. Cela peut être par exemple un contrôle visuel de la hauteur d’eau sur une échelle limnimétrique, le recueil des eaux de pluie d’un pluviomètre pour contrôler le volume cumulé sur une période donnée, ou la réalisation de mesurages de conductivité ou pH à l’aide de solutions étalons.

Ces opérations de contrôle sont cruciales pour s’assurer que la donnée acquise est fiable. Il est donc indispensable d’en conserver une trace, par exemple sous forme de fiche de vie des capteurs ou des points de mesure, au format papier ou numérique.

Figure 1 : Illustration du processus de capitalisation des données (GRAIE).



ÉTAPE 2: Validation et qualification des données

La validation des données est l'étape permettant de passer des données brutes (sorties de la chaîne d'acquisition) à des données validées, c'est-à-dire qui peuvent être exploitées pour de l'analyse de données, de la modélisation, du reporting, ou bien être diffusées.

Cette étape diffère en fonction de la nature des données acquises et des protocoles opératoires mis en place dans le laboratoire ou service qui fait cette validation. Le plus souvent, elle consiste à détecter et supprimer les valeurs aberrantes, lisser les micro-variations correspondant à du bruit de mesure s'il y en a, et corriger les dérives des capteurs, à l'aide des mesurages ponctuels et de l'étalonnage des capteurs mentionnés précédemment. Les relations d'étalonnage sont exploitées pour permettre une correction pertinente des données ainsi qu'une meilleure estimation des incertitudes. Ensuite, on compare les valeurs d'un capteur avec celles d'autres capteurs situés à proximité, de façon à vérifier que les valeurs enregistrées sont cohérentes entre elles. Par exemple, on peut comparer la variation d'une hauteur d'eau observée par un capteur, avec les signaux d'autres capteurs situés en amont et/ou en aval pour vérifier qu'ils sont cohérents, et même mettre en regard les données d'un pluviomètre situé à proximité. La critique et la validation des données nécessitent une connaissance des facteurs d'influence sur les grandeurs mesurées ainsi qu'une compréhension des corrélations éventuelles entre différentes grandeurs. La validation peut être manuelle ou assistée à l'aide de logiciels spécialisés.

L'étape finale de la validation est la qualification de la donnée, c'est-à-dire l'attribution à chaque valeur mesurée d'un code indiquant sa qualité, et donc la confiance qu'on peut lui accorder. C'est un peu l'équivalent d'une note, qui peut prendre la forme d'un chiffre (1 à 3 par exemple) ou d'une lettre (v pour valide, d pour douteux, l pour lacune: exemple en figure 2 page suivante). La qualification permet de garantir aux utilisateurs que la donnée a été produite dans un cadre contrôlé (processus de validation) mettant en œuvre les bonnes pratiques métrologiques, et de communiquer sur l'expertise du producteur quant à la fiabilité de ses données.

ÉTAPE 3: Bancarisation

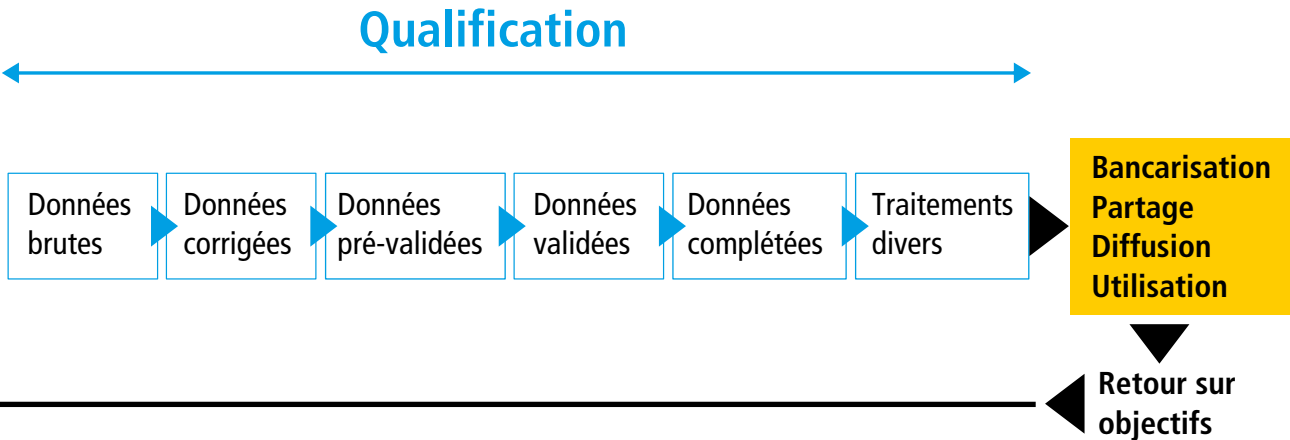
La bancarisation est l'archivage des données, de façon à ce qu'elles soient utilisables de façon durable. On peut bancariser

Estimation des incertitudes: un complément essentiel à la qualification

L'incertitude permet de fournir une valeur quantitative là où le code qualité n'est que qualitatif. D'après le Bureau International des Poids et Mesures (GUM, 2008), l'incertitude de mesure «caractérise la dispersion des valeurs attribuées à une grandeur mesurée, à partir des informations utilisées». Elle s'exprime en général sous forme statistique (écart-type, intervalle de confiance) et prend en compte l'ensemble des facteurs qui peuvent influencer le mesurage: les propriétés du capteur utilisé (sa résolution et sa justesse, en général indiquées par le constructeur), mais aussi la méthode utilisée, l'opérateur, et les conditions environnementales (température, nature de l'écoulement, etc).

Une incertitude devrait idéalement être fournie avec chaque valeur mesurée. En pratique, c'est malheureusement rarement le cas. S'il n'est pas toujours facile de calculer de façon exhaustive l'incertitude de chaque valeur, des logiciels peuvent aider à l'estimer.

les données à différents stades de validation. Cependant deux stades sont à prioriser: les données brutes et les données validées. La bancarisation des données validées (directement exploitables) est évidente mais les erreurs potentielles (humaines ou matérielles) lors de la validation justifient également une bancarisation rigoureuse des données brutes qui servent ainsi de référence. La bancarisation concerne non seulement les valeurs mesurées elles-mêmes, mais aussi les informations associées qui sont indispensables pour l'exploitation des données: par exemple la géolocalisation du point de mesure, la variable mesurée, l'unité, le fuseau horaire, le propriétaire des données. C'est ce qu'on appelle les métadonnées. L'ensemble des informations (données et



métadonnées) doit être stocké sous forme électronique dans des formats pérennes et ouverts, pour garantir une bonne lisibilité même à quelques années d'intervalle. De même, les informations doivent être structurées pour permettre de les retrouver facilement.

Si les données sont bancarisées sous forme de fichiers, il faut par exemple privilégier les formats texte ou csv aux classeurs Excel, très populaires, mais dont le format propriétaire est fermé et vulnérable aux changements de version. Une architecture rigoureuse doit également être mise en place, avec par exemple un classement par année et une nomenclature à respecter pour les noms de fichiers. Enfin, un système de sauvegarde doit assurer la pérennité des données. La solution des fichiers présente néanmoins des inconvénients dès que les jeux de données deviennent importants, en particulier pour la recherche des données et pour garantir leur intégrité (maintien d'une version de référence par rapport à des modifications et copies). La solution dans ce cas est l'utilisation de bases de données relationnelles, qui organisent l'information de façon structurée et efficace sous forme de tables (Horsburgh *et al.*, 2016), et permettent le requêtage, c'est à dire un accès rapide et efficace aux données quelle que soit la taille du jeu de données. Enfin, les logiciels de gestion de base de données ont aussi des fonctionnalités de gestion des droits d'accès et de sauvegarde, qui permettent d'assurer l'intégrité des données.

ÉTAPE 4 : Partage et valorisation des données

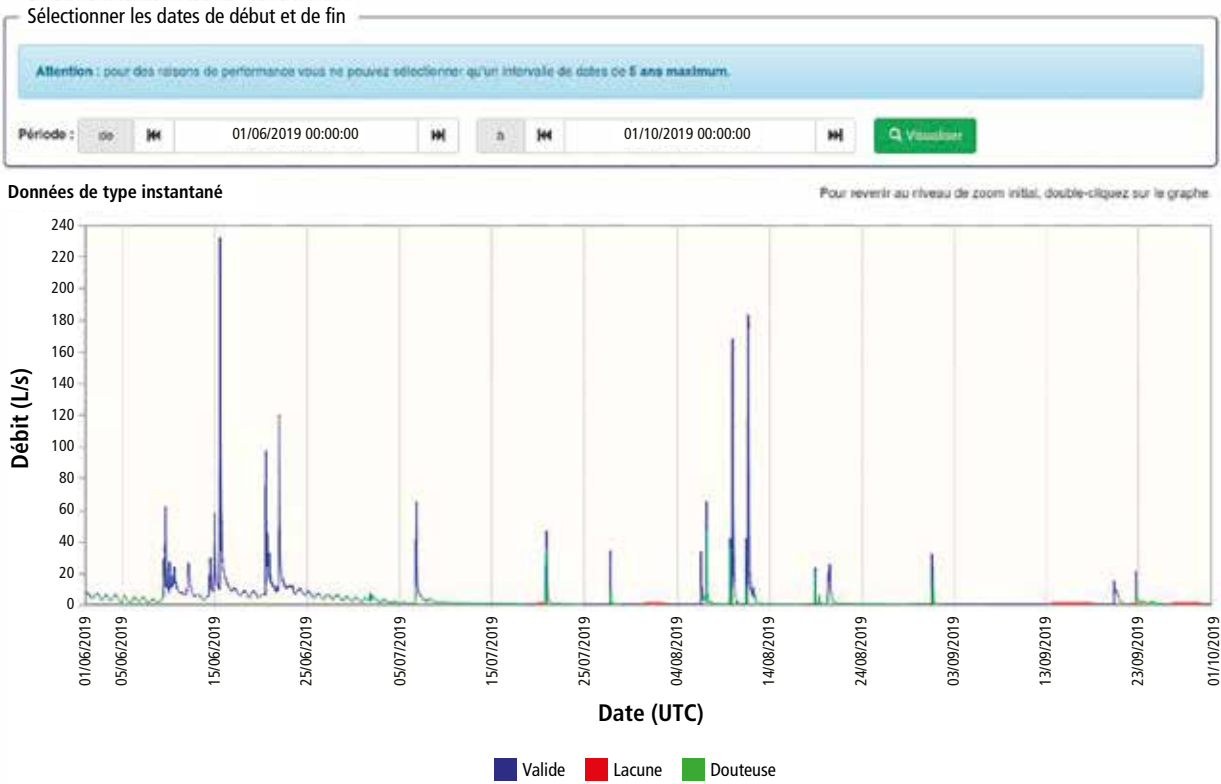
La dernière étape est le partage des données, et plus précisément le partage sur internet. Plusieurs solutions sont possibles et complémentaires.

La première consiste à cataloguer les données et à mettre à disposition ce catalogue. Cela correspond au « F » « Findable » des principes FAIR, c'est à dire faire savoir que ces données existent. Plusieurs logiciels permettent maintenant de constituer et mettre en ligne des catalogues de métadonnées tels que Geonetwork utilisé par l'OTHU.

La seconde solution correspond au « A » « Accessible » des principes FAIR: c'est l'accès sur internet non seulement aux métadonnées, mais aussi aux données elles-mêmes. Si des solutions artisanales de type dossiers partagés ou serveurs FTP (File Transfer Protocol: protocole permettant d'échanger des fichiers sur le web) sont toujours possibles, les solutions proposées par les systèmes de gestion de bases de données associés à des applications web garantissent un accès à la donnée sécurisé, traçable, et efficace. L'application BDOH de l'OTHU propose ainsi une interface web qui permet aux utilisateurs de consulter, visualiser et télécharger les données bancarisées.

La troisième solution consiste à permettre la visualisation des données dans un premier niveau d'interprétation. Cela peut prendre la forme de tableaux de bord, synthèses graphiques, indicateurs qui sont calculés régulièrement et permettent de faire un bilan des données acquises. Là aussi, les fonctionnalités des applications web couplées à des systèmes de gestion de base de données permettent de générer ces indicateurs de suivi et de valorisation de façon automatique.

Figure 2 : Représentation graphique de l'extrait d'une chronique de débit sur BDOH (station Mercier au Pont D610). Les couleurs correspondent au code qualité de chaque valeur mesurée (ici : qualité douteuse pour les plus bas débits et lacune pour les données manquantes).



L'OTHU a développé plusieurs protocoles et logiciels de gestion de données

Fort de ses 10 millions de données produites annuellement, l'OTHU a développé une réelle expertise dans l'acquisition de données intensives, fiables, multidisciplinaires et pérennes dans le temps. Depuis sa création, l'OTHU a toujours porté son attention sur les processus d'acquisition et de qualification des données. Une méthodologie détaillée a ainsi été produite, permettant le développement de plusieurs protocoles opératoires de validation appliqués par les équipes de recherche sur les différents sites expérimentaux. L'OTHU a également permis le développement de plusieurs logiciels qui sont partie intégrante de ces protocoles :

- ▶ Fondé sur les résultats des recherches menées dans le cadre de l'OTHU depuis 2000, EVOHE est un logiciel développé par l'INSA. Il permet de traiter et de valider automatiquement de longues séries chronologiques de données en hydrologie urbaine et offre de nombreuses fonctionnalités métrologiques en un seul outil, depuis l'acquisition des données brutes jusqu'à la validation des données corrigées et leur exploitation opérationnelle.
- ▶ BaRatin (Bayesian Rating curve) est une méthode et un logiciel développés par INRAE depuis 2010 pour apporter une solution opérationnelle à la construction, au calage et à l'estimation des incertitudes des courbes de tarage. BaRatin et son environnement graphique BaRatinAGE sont diffusés en français et en anglais avec une licence individuelle gratuite.
- ▶ La base de données et l'application BDOH sont développées par INRAE depuis 2011 pour la bancarisation, la gestion et le partage en ligne de séries chronologiques de données hydrologiques de terrain. BDOH inclut des fonctionnalités de recherche de données, de visualisation graphique, d'export selon différents formats et pas de temps, ainsi que des calculs automatiques de données dérivées. Une gestion fine des rôles permet d'affecter différents droits de visualisation/téléchargement/édition aux différents utilisateurs.

En Bref...

Pour produire des données de bonne qualité, exploitables et utilisables durablement, il est nécessaire de disposer :

- ▶ d'une définition claire des objectifs d'acquisition des données et de leurs usages prévus ;
- ▶ d'une procédure détaillée de l'ensemble du processus de capitalisation : des vérifications de terrain (métrologie) à la bancarisation et au partage, en passant par la validation des données, leur qualification et l'estimation des incertitudes ;
- ▶ de logiciels et outils adéquats pour aider à réaliser ce travail, tels que ceux proposés par les équipes de l'OTHU ;
- ▶ de moyens humains suffisants et compétents, et de coordination entre les différents producteurs de données.

POUR ALLER PLUS LOIN

- ▶ **Le catalogue de métadonnées de l'OTHU**, sur Geonetwork : lc.cx/metadonneesothu
- ▶ **Les logiciels de gestion de données développés par les équipes de l'OTHU** :
 - le logiciel EVOHE (INSA Lyon) : c.cx/evohe
 - la méthode et le logiciel BaRatin (INRAE) : lc.cx/baratininrae
 - l'application BDOH (INRAE) et les données OTHU du bassin de l'Yzeron : c.cx/bdoh

