

# Détermination des incertitudes et validation des débits calculés du réseau d'assainissement départemental de Seine-Saint-Denis

Fabien DESÉTABLES<sup>1</sup>, Guillaume OUDIN<sup>2</sup>  
Michel RUDELLE<sup>3</sup>

<sup>1</sup> CD93-DEA, Hôtel du Département 93006 Bobigny Cedex - e-mail : [fdesetables@seinesaintdenis.fr](mailto:fdesetables@seinesaintdenis.fr)

<sup>2</sup> CD93-DEA, Hôtel du Département 93006 Bobigny Cedex - e-mail : [goudin@seinesaintdenis.fr](mailto:goudin@seinesaintdenis.fr)

<sup>3</sup> Ingénieur-conseil, 6 rue de Nice 75011 Paris - e-mail : [conseil@michel-rudelle.fr](mailto:conseil@michel-rudelle.fr)

**RÉSUMÉ.** – La Direction de l'eau et de l'assainissement du Conseil départemental de Seine-Saint-Denis gère un réseau d'assainissement d'un linéaire de 700 kilomètres. Ce réseau est équipé de 178 stations de mesure cumulant 769 voies de hauteur, vitesse, débit calculé, turbidité et pluviométrie. Afin d'améliorer la qualité des mesures, une expertise des mesures de débit, calculées à partir d'une mesure de hauteur et d'une ou plusieurs mesures de vitesse, a été mise en place. Pour qualifier les résultats de mesure, une méthode d'évaluation des incertitudes valable pour tous les sites de mesure a été déterminée. Elle permet d'obtenir l'estimation de l'incertitude pour toute valeur d'un couple hauteur-débit. Il a été attaché une grande importance à ne négliger aucun facteur d'influence.

Pour s'assurer que cette estimation était pertinente, une procédure de validation initiale des sections de mesure a été élaborée. Elle a ensuite été utilisée pour fournir des données de référence qui sont un moyen rapide et fiable de détecter une suspicion de dysfonctionnement d'un site, d'en faire un diagnostic et d'intervenir si nécessaire. Les données de référence sont mises à jour en fonction de l'évolution hydraulique du réseau.

Ce travail a également motivé un approfondissement des contrôles réalisés sur le terrain. La méthode est utilisée quotidiennement avec une efficacité maintenant éprouvée. Il est alors possible de dire que les données validées sont des données qui satisfont aux incertitudes estimées.

Mots-clés : mesures, débit, assainissement, incertitudes, validation

## Uncertainties and validation of calculated flows of the departmental sewage network of Seine-Saint-Denis

**ABSTRACT.** – The Council of Seine-Saint-Denis manages a 700 km-long sewerage system. This network is fitted with 178 measurement stations combining 769 entrances of height, speed, calculated flow, turbidity and rainfall. To improve the quality of the measures, an expertise of the measures of flow, calculated from a measure of height and one or several measures of speed, has been established.

To qualify the measurement results, a method for evaluating uncertainties, valid for all measurement sites, was determined. It enables to estimate the uncertainty for any value of a couple height-flow and gives a graphic presentation. Taking into account every influence factor was a crucial aspect.

To make sure that this estimation was relevant, a procedure aiming at initially validating the sections of measure was elaborated. It was then used to provide reference data that is a fast and reliable way of detecting site malfunctions, to make a diagnosis and to fix if necessary. The reference data are updated according to the evolution of the hydrologic sewer network.

This work also motivated thorough controls realized in the field. The method is daily used with an experienced maintaining efficiency. It is then possible to say that the validated data meet the estimated uncertainties.

Key-words: measures, flow rate, sewage network, uncertainties, validation

## I. ASSAINISSEMENT ET MÉTROLOGIE AU DÉPARTEMENT DE SEINE-SAINT-DENIS

Le Département de Seine-Saint-Denis est propriétaire et gestionnaire d'un réseau d'assainissement par lequel transitent les effluents des 1,6 million d'habitants du territoire ainsi que les apports pluviaux dus au ruissellement urbain. Cela représente en tout plus de 200 Mm<sup>3</sup> d'effluents à gérer chaque année.

Ce réseau est doté d'un patrimoine important : plus de 700 kilomètres de réseau dont près de 500 kilomètres sont visitables, des dizaines de milliers de raccordements, une trentaine de bassins de rétention d'une capacité totale de

l'ordre de 1,4 Mm<sup>3</sup>, des stations de pompage, des stations de répartition des flux et plusieurs centaines d'équipements électro-mécaniques. Ce réseau d'assainissement assure une partie de la collecte, mais surtout le transport des effluents collectés par les réseaux territoriaux vers les réseaux du Syndicat interdépartemental de l'assainissement de l'agglomération parisienne (SIAAP) ou le milieu récepteur.

La complexité du réseau d'assainissement, très maillé, et les nécessités de la lutte contre les inondations et la pollution rejetée au milieu récepteur ont conduit le Département à instrumenter le réseau dès le début des années soixante-dix. Une meilleure compréhension du fonctionnement du

réseau était, et reste, indispensable pour pouvoir proposer des améliorations. Le développement de la métrologie est concomitant avec celui de la modélisation numérique des écoulements dans les réseaux.

Pour faire face au développement du réseau d'assainissement et optimiser le fonctionnement des ouvrages, et notamment des bassins de rétention, le Département s'engage dès le début des années quatre-vingt dans la gestion automatisée. Grâce aux mesures pluviométriques et en réseau, cet outil de supervision permet à la fois de surveiller et d'agir sur le fonctionnement hydraulique du réseau d'assainissement. Par temps sec comme par temps de pluie, il vise à prévenir les inondations et à limiter les déversements au milieu récepteur tout en contribuant à assurer la sécurité des personnes qui interviennent au quotidien en réseau.

Aujourd'hui, le réseau de mesures de la Direction de l'eau et de l'assainissement (DEA) comporte 178 stations et 769 voies de mesure en continu : mesures pluviométriques et mesures en réseau de hauteur, vitesse, débit et turbidité. Les stations de mesure débitométrique étudiées dans cet article sont au nombre de 109 dont 86 « temps de transit » (cf. § III.1.1). Elles équipent tout type de collecteur, circulaire, dalot ou ovoïde. Le plus petit ouvrage instrumenté est un Ø 400 et le plus imposant un Ø 4000, la plupart sont des ovoïdes de dimension proche de 2 m. Les débits transitant en temps sec sur ces ouvrages varient d'un débit nul à 2 m<sup>3</sup>/s et peuvent atteindre par temps de pluie pour les ouvrages les plus importants 35 m<sup>3</sup>/s. Quant aux vitesses, sur 90 % des sites, elles s'échelonnent de 0,25 m/s à 4 m/s, quelques sites atteignent 5 m/s et un petit nombre peut même voir sa vitesse s'annuler, voire s'inverser.

L'ensemble des données fait l'objet d'une validation en temps différé et d'un archivage en base de données. Ces données validées servent à mieux comprendre le fonctionnement des réseaux, à répondre aux exigences réglementaires d'autosurveillance, à définir les projets d'amélioration, à valider le fonctionnement des nouveaux ouvrages et à fournir des données aux communes et bureaux d'études.

La DEA fonctionne exclusivement en régie pour couvrir la définition des besoins de mesure, la conception des stations de mesure, leur maintenance, le rapatriement des données, leur validation et leur archivage. Cela représente une vingtaine d'équivalents temps plein, sur une direction de près de 300 agents. Des moyens importants sont donc mis en œuvre pour mettre en place une chaîne métrologique permettant d'assurer une qualité de données aussi bonne que possible.

## II. UNE DÉMARCHE PRAGMATIQUE

Face à la multiplication des capteurs et à la complexité de la chaîne métrologique, la DEA a engagé en 2008 une démarche de réorganisation des informations relatives aux sections de mesure, de qualification de ces sections et de développement d'outils opérationnels. Ce travail a porté plus particulièrement sur l'expertise des sections de mesure de débit. Celle-ci a reposé sur l'analyse des documents relatifs aux sections de mesure (topographie, plans...), l'analyse de l'historique des données préalablement recueillies, et la visite systématique des sites avec les équipes chargées de leur maintenance et les référents en matière de validation. L'objectif, au-delà de l'expertise, était d'en valoriser et pérenniser les conclusions. Pour cela, deux orientations majeures ont été fixées :

La première porte sur les connaissances acquises. Pour pouvoir les affiner, les corriger ou prendre en compte

l'évolution du réseau, les synthèses par site ont été enregistrées sous une forme numérique dans une base documentaire. Cette base documentaire est constituée d'une structure prédéfinie sur le réseau informatique, contenant les informations essentielles à la compréhension de chaque section de mesure : schémas, plans topo, photos, analyses, graphes, indicateurs... Une charte de nommage des répertoires et des fichiers a été élaborée pour permettre de retrouver immédiatement l'information souhaitée (manuellement ou automatiquement). Cette base documentaire a vu son contenu s'enrichir au fil des ans avec l'ajout de nouvelles sections, mais aussi avec l'addition de nouvelles informations suscitées par le retour d'expérience, afin de combler des manques dans l'analyse des données.

Cet enregistrement « vivant » des informations mis en chantier, la deuxième orientation a été la mise au point d'une méthode de calcul des incertitudes, avec comme objectif d'être le point clé autour duquel s'articulerait le travail de validation d'une section.

Cette méthode a d'abord été mise en œuvre sur 9 sections de débit. Les résultats ayant été concluants, elle a été progressivement étendue à toutes les sections de mesure de débit, et simultanément améliorée et étoffée notamment avec des outils d'aide à la validation, logiciels sous forme de macro effectuant les tâches répétitives de traitement de données. La conception de la base documentaire avec sa charte a permis d'automatiser de nombreux processus déchargeant les opérateurs de tâches fastidieuses et leur libérant du temps pour la réflexion et l'analyse des données produites. Pour des raisons d'efficacité, le choix de l'outil s'est porté sur le tableur Calc de LibreOffice, un des intérêts étant la possibilité d'avoir les mêmes versions sur tous les postes quelle que soit la machine.

Notre démarche est conforme aux demandes du législateur, par exemple dans son guide pratique, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse [2016], tout en relevant la difficulté pratique, rappelle à de nombreuses reprises la nécessité de déterminer les incertitudes notamment pour différencier les mesures des estimations.

## III. ESTIMATION DE L'INCERTITUDE SUR LES DÉBITS CALCULÉS

### III.1. Méthode de calcul de l'incertitude

#### III.1.1. Calcul du débit

Le calcul du débit se fait par la formule simple :

$$Q = Sm \cdot U \quad (1)$$

où  $Q$  est le débit en m<sup>3</sup>/s,  $Sm$  est la section mouillée en m<sup>2</sup> et  $U$  la vitesse moyenne de l'écoulement en m/s. La section mouillée  $Sm$  est connue par la géométrie de l'ouvrage (circulaire, ovoïde, dalot, quelconque) et par la mesure du niveau de remplissage de cette forme, c'est-à-dire le niveau d'eau :

$$Sm = f(F, H) \quad (2)$$

où  $F$  fait référence à la forme (géométrie) de l'ouvrage et  $H$  la hauteur d'eau en m au-dessus du point le plus bas (radier). La forme de l'ouvrage est mesurée lors de l'installation de l'équipement de mesure, la hauteur d'eau est mesurée en continu par diverses techniques (capteur de pression immergé, à ultrasons aériens, radar...).

On ne mesure jamais directement la vitesse moyenne  $U$  sur toute la section mouillée. Au mieux on mesure une caractéristique de la vitesse. Il est indispensable de pouvoir décrire avec certitude le mesurande, faute de quoi nous ne disposons d'aucun moyen pour connaître les facteurs d'influence et estimer l'incertitude. La caractéristique mesurée dépend de la technique utilisée, le réseau de la DEA étant principalement équipé de mesures de vitesse par temps de transit (cordes de vitesse), nous n'aborderons que cette technique ici, les autres mesures Doppler ou radar de vitesse ont aussi fait l'objet de calcul d'incertitude, mais les résultats nous paraissent moins fiables faute d'informations sûres, notamment de la part des constructeurs, sur ce qui est réellement mesuré.

Pour la mesure par temps de transit, deux sondes sont disposées à la même hauteur, en diagonale de part et d'autre du collecteur et forment une corde. La caractéristique mesurée est la composante axiale de la vitesse moyenne de l'effluent sur la corde. Cette technique présente un avantage capital : la mesure ne peut être faite que si le signal a traversé l'écoulement, on est certain que l'analyse se fait sur un signal porteur de l'information. Comme la mesure est effectuée habituellement sur plusieurs cordes, on a en plus une information sur la répartition des vitesses sur la hauteur du collecteur.

Dans la suite nous noterons ce mesurande (cette caractéristique mesurée de la vitesse, différente selon les techniques), par le symbole  $Vz$ ,  $z$  fait référence à l'idée d'une zone connue (point, ligne, cellules) dont on mesure la vitesse.

La relation entre la mesure  $Vz$  et la vitesse moyenne dans l'écoulement est décrite par la formule :

$$U = K \cdot Vz \tag{3}$$

où  $K$  est un coefficient correcteur (expliqué § III.1.4).

La formule de calcul du débit devient donc d'après (1) et (3) :

$$Q = K \cdot Sm \cdot Vz \tag{4}$$

C'est avec elle que nous allons chercher les incertitudes. L'incertitude sur la connaissance du débit sera déterminée à partir des incertitudes sur ses trois composantes :  $K$  le coefficient correcteur,  $Sm$  la section mouillée,  $Vz$  la mesure d'une vitesse caractéristique de l'écoulement.

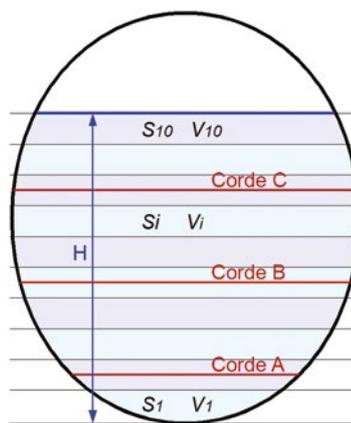


Fig 1

Pour calculer le débit avec plusieurs cordes, il faut appliquer cette formule sur plusieurs tranches (sections partielles) avec les vitesses mesurées correspondantes et sommer les débits partiels obtenus, mais pour le calcul des incertitudes, la formule (4) est considérée sur la globalité de l'écoulement, l'incertitude sur la vitesse étant supposée la même pour toutes les cordes. Nous allons expliquer le détail du calcul du débit, car son principe nous sera nécessaire pour construire la méthode d'estimation de l'incertitude sur la connaissance du champ de vitesse.

La section mouillée est découpée en  $n$  sections (10 sur l'exemple de la figure 1), chaque section partielle a une surface  $Si$  connue. Si l'on peut estimer les vitesses moyennes  $Vi$  de chaque section, le débit total sera donné par :

$$Q = \sum_{i=1}^n Si \cdot Vi \tag{5}$$

Comment déterminer les  $n$  vitesses  $Vi$  à partir des 3 vitesses mesurées  $V_A, V_B, V_C$  mesurées par les trois cordes A, B et C (figure 1) ?

Le débitmètre utilise une relation (fig 2) entre la hauteur relative dans l'effluent et la vitesse moyenne sur une horizontale. Relation issue de la norme ISO 6416 [2004] qui la propose sous la forme du tableau 1 où  $Cv$  est le rapport de la vitesse moyenne sur l'écoulement à la vitesse moyenne sur une horizontale à la profondeur relative  $d/D$  - relation qui peut être convertie pour donner  $V/Vmax$  vs  $H/Hmax$ .

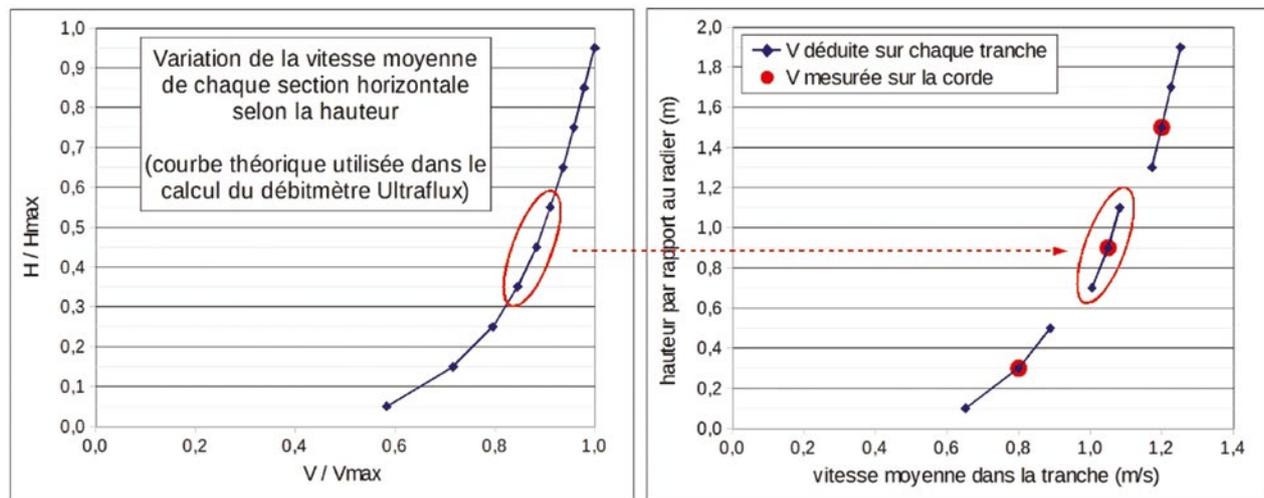


Fig 2

Tableau 1

|            |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| d/D        | 0,10  | 0,20  | 0,30  | 0,40  | 0,50  | 0,60  | 0,70  | 0,80  | 0,90  |
| Cv=Vmoy/Vd | 0,846 | 0,863 | 0,882 | 0,908 | 0,937 | 0,979 | 1,039 | 1,154 | 1,424 |

Bien que paramétrable, nous avons conservé la courbe par défaut du débitmètre afin d’avoir tous les appareils identiques et éviter des erreurs. Cette courbe est « recalée » par tronçon en fonction de la mesure sur chaque corde pour estimer les vitesses  $V_i$  dans chaque section  $S_i$ .

III.1.2 Principe du calcul d’incertitude

Nous utilisons la loi de propagation des incertitudes qui est fondée sur l’analyse du principe de mesure d’une grandeur  $Y$ , c’est-à-dire de son modèle mathématique. Elle convient aux grandeurs qui ne sont pas directement mesurées mais qui sont le résultat d’un calcul, elle est donc adaptée à notre problème. Nous résumerons ci-après le principe et renvoyons aux ouvrages cités pour des informations plus détaillées [Bertrand-Krajewski et al., 2000] [Norme NF ENV 13005 remplacée en 2014 par NF ISO /GEI Guide 98-3]. Soit une grandeur  $Y$  fonction connue de plusieurs variables  $X_k$  :

$$Y = f(X_k) \tag{6}$$

Si les incertitudes-types  $u(X_k)$  de chaque variable  $X_k$  peuvent être évaluées, alors l’incertitude-type de la grandeur  $Y$  est donnée par l’équation suivante :

$$u(Y)^2 = \sum_{k=1}^n u(X_k)^2 \left( \frac{\partial f}{\partial X_k} \right)^2 + 2 \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n u(X_k, X_j) \left( \frac{\partial f}{\partial X_k} \right) \left( \frac{\partial f}{\partial X_j} \right) \tag{7}$$

avec :  $u(X_k, X_j) = u(X_k) \cdot u(X_j) \cdot r(X_k, X_j)$  (8)

où  $u(X_k, X_j)$  est la covariance estimée des  $X_k$  et  $X_j$ , et  $r(X_k, X_j)$  est le coefficient de corrélation entre les  $X_k$  et  $X_j$  dans leurs variations dues aux incertitudes. Si l’on fait l’hypothèse que les incertitudes des  $X_k$  ne sont pas corrélées entre elles, alors  $r(X_k, X_j) = 0$  et l’équation se simplifie pour donner :

$$u(Y)^2 = \sum_{k=1}^n u(X_k)^2 \left( \frac{\partial f}{\partial X_k} \right)^2 \tag{9}$$

III.1.3 Application au débit

En reprenant l’équation du débit (4) et en faisant l’hypothèse raisonnable que les grandeurs servant à le calculer ne sont pas corrélées, on obtient :

$$u(Q)^2 = u(K)^2 \left( \frac{\partial Q}{\partial K} \right)^2 + u(Sm)^2 \left( \frac{\partial Q}{\partial Sm} \right)^2 + u(Vz)^2 \left( \frac{\partial Q}{\partial Vz} \right)^2 \tag{10}$$

Les dérivées partielles sont les coefficients de sensibilité de chacune des grandeurs servant au calcul. Il est possible de simplifier encore puisque les dérivées partielles de  $Q$  par rapport à  $K$ ,  $Sm$  et  $Vz$  s’écrivent :

$$\frac{\partial Q}{\partial K} = Sm \cdot Vz \quad \frac{\partial Q}{\partial Sm} = K \cdot Vz \quad \frac{\partial Q}{\partial Vz} = K \cdot Sm \tag{11}$$

(10) et (11) =>

$$u(Q)^2 = u(K)^2 \cdot Sm^2 \cdot Vz^2 + u(Sm)^2 \cdot K^2 \cdot Vz^2 + u(Vz)^2 \cdot K^2 \cdot Sm^2 \tag{12}$$

Et en divisant l’expression précédente par l’expression de  $Q^2 (=K^2 Sm^2 Vz^2)$  :

$$\frac{u(Q)}{Q} = \sqrt{\left( \frac{u(K)}{K} \right)^2 + \left( \frac{u(Sm)}{Sm} \right)^2 + \left( \frac{u(Vz)}{Vz} \right)^2} \tag{13}$$

L’incertitude sur le débit sera fonction des incertitudes des trois composantes du débit  $K$ ,  $Sm$  et  $Vz$ .

III.1.4. Signification du paramètre  $K$

Le coefficient correcteur  $K$  permet de passer de la vitesse  $Vz$  à la vitesse moyenne dans l’écoulement  $U$ . Il dépend de la forme de la distribution des vitesses dans l’écoulement et de la nature du mesurande  $Vz$ . Pour résoudre notre problème, ce n’est pas la distribution complète des vitesses qui nous intéresse mais la variation de la vitesse moyenne sur une horizontale en fonction de la hauteur (§ III.2.3). Par la suite, cette variation sera dénommée profil de vitesse (par commodité, il en ira parfois de même pour le coefficient correcteur  $K$ ).

Muste et al. [2012] proposent de traiter l’incertitude sur la vitesse moyenne  $U$  à partir de la mesure Doppler  $V$  en utilisant une relation  $U = k \cdot V$  (que nous écrivons  $U = K \cdot Vz$  dans l’équation 3). Pour ces auteurs, l’utilisation de cette relation permet d’évaluer l’incertitude  $u(U)$  par la loi de propagation des incertitudes en utilisant les incertitudes  $u(V)$  et  $u(k)$  ainsi que nous le proposons. Toutefois, remarquant que « les estimations de  $u(k)$  ne sont pas facilement disponibles » dans leur cas de figure de mesure de vitesse par Doppler, ils n’utilisent pas cette méthode par la suite mais déduisent la connaissance de  $u(U)$  de résultats expérimentaux.

Comme nous travaillons essentiellement avec des temps de transit, nous avons des éléments objectifs disponibles – des mesures de vitesse à des hauteurs différentes (cordes), chacune de ces vitesses étant elle-même une vitesse moyenne de l’écoulement sur cette corde – que nous pouvons utiliser pour estimer l’incertitude  $u(K)$  (§ III.2.3).

III.1.5. Hypothèse de non corrélation des incertitudes

Le passage de l’équation (7), qui exprime l’incertitude-type  $u(Y)$  dans le cas général, à l’équation (9), qui exprime cette même incertitude dans le cas où les incertitudes-types des variables  $X_j$  ne sont pas corrélées, doit être entendu de la façon suivante pour une interprétation correcte : la non corrélation est à rechercher entre les incertitudes  $u(X_j)$  et non entre les variables  $X_j$ . Il faut regarder les facteurs d’influence qui pourraient être communs et donc induire des incertitudes corrélées. On ne voit pas quel facteur d’influence pourrait créer une corrélation entre deux des trois variables  $K$ ,  $Sm$ ,  $Vz$ . La vitesse  $Vz$  est souvent liée à la hauteur. Pour autant, l’incertitude sur cette vitesse n’est pas corrélée à l’incertitude sur la mesure de hauteur (et donc  $Sm$ ).

III.2. Estimations des incertitudes des différentes composantes du débit

Nous ne reprendrons pas en détail les calculs utilisés pour déterminer ces incertitudes, nous énumérerons simplement

les facteurs d'influence que nous avons identifiés et dont nous recherchons la contribution.

### III.2.1. Incertitude sur la détermination de la section mouillée ( $S_m$ ) :

La section mouillée comprend une partie liée à la description de la section, et une autre à la hauteur d'eau qui caractérise la partie « mouillée » de la section de mesure.

L'incertitude sur le niveau est déduite des incertitudes sur l'étalonnage du capteur, sur le calage en place (position du zéro du capteur par rapport au radier) ainsi que du fait que, pour des raisons d'installation et de maintenance, la mesure de hauteur ne se fait pas toujours strictement dans la même section que la mesure de vitesse (cette influence est estimée en tenant compte de la distance et du dénivelé).

Pour la description de la géométrie de la section, nous considérons d'une part la mesure de la section par le géomètre, dont l'incertitude sera fonction de la forme de l'ouvrage et de la difficulté à relever la forme complète, et d'autre part la description de la section dans le débitmètre. Pour celle-ci, on compare la surface théorique du collecteur avec la surface totale correspondant à la description entrée dans le débitmètre. L'écart relatif est considéré comme l'incertitude sur la description.

D'autres influences ont été identifiées, bien que ce ne soient pas strictement des incertitudes, il peut être intéressant de traiter par ce moyen deux problèmes récurrents : les vases et dépôts et l'occupation de l'espace par d'autres canalisations. Dans les deux cas, on réduit la surface mouillée, la façon rigoureuse de les traiter consisterait à en tenir compte dans le calcul du débit en modifiant la description de la section mouillée. Mais soit les débitmètres ne sont pas adaptés à ces paramétrages, soit ce sont des paramètres difficiles à suivre dans le temps comme l'évolution des dépôts au fil des pluies et que l'on risque d'oublier. Tant que les surfaces concernées restent faibles, ce qui est généralement le cas, le plus simple est de les considérer comme une incertitude dans la détermination de la section mouillée, ainsi les paramétrages des débitmètres restent standardisés, et ne sont pas à modifier si on change d'avis sur l'importance des dépôts. On notera aussi que selon leur nature (vases ou gravats) les dépôts de faible amplitude peuvent disparaître au plus fort d'une crue et réapparaître en fin de crue quand la vitesse diminue, ce qui correspond bien à la notion d'incertitude.

### III.2.2. Incertitude sur la vitesse ( $V_z$ )

Pour des cordes de vitesse, le mesurande est parfaitement connu. La vitesse est donnée par un calcul qui ne fait intervenir que des données géométriques liées à la position des sondes et la mesure des temps de parcours de l'onde ultrasonore entre les sondes. La géométrie d'installation des sondes définit avec précision le mesurande puisque la mesure n'est possible que si le signal ultrasonore a parcouru toute la corde d'une sonde à l'autre, il est donc porteur d'une information complète sur la corde [Rudelle, 2008]. Un autre avantage de cette technique est sa capacité à mesurer également les vitesses faibles, nulles ou qui s'inversent.

Si l'incertitude liée à l'appareil de mesure lui-même est faible (de l'ordre de 0,5 % de la mesure), il y a d'autres facteurs à prendre en compte : l'incertitude sur la géométrie d'installation des sondes, sur l'angle fait avec l'écoulement, ainsi que l'erreur due à la position des sondes, notamment quand elles sont en retrait dans la paroi de la canalisation, influence qui peut ne pas être négligeable pour de petits

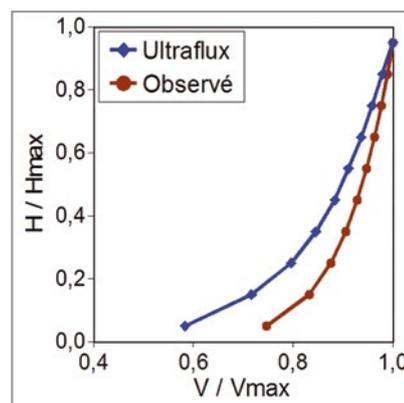


Fig 3

collecteurs. Comme la vitesse est mesurée sur plusieurs cordes, nous estimons les incertitudes pour chaque corde et prenons en compte l'incertitude la plus forte.

### III.2.3. Comment prendre en compte l'incertitude sur la connaissance du champ de vitesse ?

Nous considérons ici l'incertitude liée à l'algorithme qui permet de passer de la vitesse mesurée  $V_z$  à la vitesse moyenne  $U$  sur la section mouillée, c'est-à-dire au paramètre  $K$ .

L'erreur sur ce paramètre  $K$  est due à la méconnaissance de la répartition des vitesses sur toute la hauteur de l'écoulement, c'est-à-dire au fait que la relation  $V/Vmax$  fonction de  $H/Hmax$  utilisée pour le calcul dans le débitmètre (fig 2) ne représente pas la réalité de l'écoulement, d'autant que cette relation varie selon le contexte hydraulique du réseau.

Nous avons donc choisi d'utiliser les chroniques de mesure de vitesse obtenues sur des périodes longues et significatives du fonctionnement du réseau, afin d'estimer cette relation à partir des rapports des vitesses mesurées sur les différentes cordes. Nous obtenons ainsi une relation dite « observée » (figure 3), voire plusieurs en fonction du contexte hydraulique.

Nous estimons l'erreur due au paramètre  $K$  comme étant la différence entre les débits calculés avec chacune des hypothèses « Ultraflux » et « observée ». Pour cela, nous réalisons un calcul de référence, identique à celui réalisé dans le débitmètre, et nous refaisons ce calcul en remplaçant la relation du débitmètre par la relation observée.

L'écart entre les deux résultats est considéré comme exprimant l'incertitude sur le profil de vitesse :

$$Q_a = \sum_1^n S_i \cdot V_{a_i} \quad Q_b = \sum_1^n S_i \cdot V_{b_i} \quad \varepsilon = Q_a - Q_b \quad (14)$$

Quand nous avons observé plusieurs relations, nous utilisons systématiquement la relation la plus défavorable.

Lorsque les chroniques ne sont pas suffisantes pour déterminer le profil réel, en fonction de l'expérience acquise et des spécificités du site, nous utilisons par défaut une relation qui a tendance à maximiser l'incertitude due au paramètre  $K$ .

### III.2.4. Limites et perspectives de cette méthode d'analyse du champ de vitesse.

Cette méthode a été mise en œuvre initialement avec des débitmètres qui ne faisaient le calcul du débit qu'avec un découpage en 10 sections au lieu de 20 actuellement. Les données de mesure étaient enregistrées selon la méthode classique à pas de temps variable, lorsque la variation de la

mesure dépassait un certain seuil, avec enregistrement uniquement des mesures ayant varié. Cette technique – nécessité historique pour des raisons de capacités limitées de stockage et de transmission – nous prive d’informations très fines sur les vitesses, d’autant que les pas de temps de mesure et les seuils d’enregistrement étaient initialement mal adaptés à notre usage.

Le renouvellement progressif, actuellement en cours, des anciens équipements par de nouveaux aux capacités largement augmentées, tant en moyens de calcul qu’en enregistrement et transmission nous permet d’avoir des pas de temps de mesure d’une minute lors d’événements hydrauliques, avec enregistrement simultané de toutes les mesures ( $H, V, Q$ ).

L’extraction d’informations plus précises sur le champ de vitesse pour tous les sites devient ainsi possible. L’influence du dip phenomenon [Bonakdari et al. 2008] devrait ainsi être accessible et pris en compte dans le calcul de l’incertitude. De même notre analyse des vitesses se fait actuellement de façon globale sur une longue période, faute de données assez nombreuses, mais à terme elle pourra être plus détaillée, par exemple en l’appliquant à différentes périodes correspondant à des contextes spécifiques.

Cette mine d’information maintenant collectée doit permettre d’aller plus loin dans le traitement tel que nous l’avons fait au § III.2.3 en déterminant de façon plus sûre le profil le plus défavorable aux incertitudes pour chaque site, tous contextes confondus. Toutefois l’analyse de ces grands volumes de données reste à faire et s’avère complexe.

### III.3. Le calcul de l’incertitude en pratique

Le calcul est fait pour 10 hauteurs et 4 valeurs du débit. Dans le classeur créé avec Calc, chaque feuille a un rôle bien défini : description de la géométrie de la section ; position et géométrie des sondes ; choix des 10 hauteurs et 4 débits ; calcul des incertitudes de chaque composante du débit et feuille de synthèse. Pour chaque composante du débit, les facteurs d’influence connus répertoriés et leur contribution est paramétrable. Pour la section mouillée, on dispose de deux feuilles, une pour la section totale, et une pour l’incertitude sur la mesure du niveau d’eau. Pour le calcul de l’incertitude due au profil de vitesse, la feuille réalise le calcul comparé des débits comme indiqué au paragraphe précédent. La comparaison se fait entre plusieurs calculs utilisant la relation du débitmètre, des relations prédéfinies et la relation dite « observée ». Si aucune relation n’a pu être déterminée, l’opérateur choisit une des relations prédéfinies.

Une feuille de synthèse récapitule sur un graphique les incertitudes estimées pour chaque couple ( $H ; Q$ ) en ne faisant apparaître que les couples rencontrés physiquement (exemple sur deux EP Ø 3500 figures 4 et 5).

Les incertitudes sont considérées avec un facteur d’élargissement de 2, c’est-à-dire un degré de confiance de 95 %. Le niveau de confiance dans l’estimation des incertitudes est indiqué : élevé = éléments objectifs pour toutes les influences ; moyen = il manque des éléments objectifs ; faible = peu d’éléments, estimation essentiellement par comparaison avec des sections semblables. Pour chaque couple hauteur débit, un tableau présente la composante qui contribue le plus à l’incertitude (figure 6).

Cette méthode de calcul est à la fois générique et productrice d’incertitudes spécifiques de chaque site puisque déduites des particularités de ceux-ci (géométrie, hydraulique et équipements). Elle permet d’obtenir une vision globale des incertitudes sur la section concernée, et de voir instantanément, en modifiant un paramètre, la conséquence sur l’incertitude.

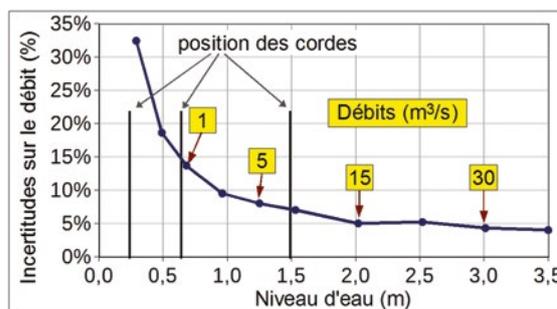


Figure 4 : Collecteur A sans influence aval

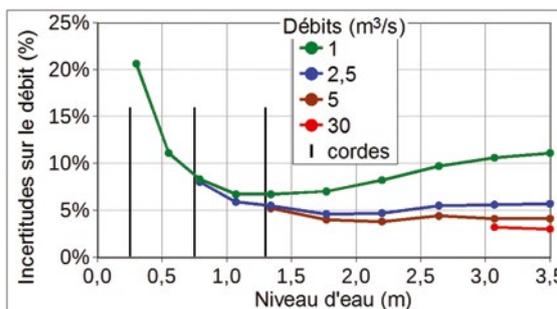


Fig 5 : Collecteur B avec influence aval

Nous avons aussi utilisé la méthode de Monte-Carlo sur deux sections, les résultats sont proches si on prend les mêmes hypothèses. Monte-Carlo permettrait d’affiner le calcul et en particulier de tenir compte d’une distribution quelconque des incertitudes pour chaque facteur. Toutefois, trouver ces distributions n’est pas trivial et on perd beaucoup en souplesse, car il faut relancer systématiquement le calcul pour toute modification de paramètre.

La feuille de calcul est conçue pour s’appliquer à d’autres types de mesure de vitesse que les temps de transit, comme les sondes Doppler ou les radars de vitesse de surface. Mais dans ces deux derniers cas avec peu d’éléments objectifs permettant de relier la vitesse mesurée à la vitesse moyenne et donc avec un niveau de confiance faible.

Dans le rapport COACHS [Larrarte et al. 2014], les auteurs déterminent numériquement le champ de vitesse dans un collecteur après un coude à 90°. Les écarts calculés entre le débit total et le débit « mesuré » en simulant un débitmètre à temps de transit ont des ordres de grandeur similaires à nos résultats et présentent le même type de variation en fonction de la hauteur et du nombre de cordes.

### III.4. Validation de la méthode

Il n’y a pas de moyen simple pour vérifier si la méthode et surtout les données qui sont utilisées pour le calcul conduisent à des résultats réalistes. Les règles de sécurité en réseau d’assainissement interdisant toute descente par temps de pluie, les jaugeages ne sont réalisables que par temps sec donc pour les faibles débits, lesquels ont les plus fortes incertitudes dans nos résultats, alors que nous souhaiterions vérifier la réalité des faibles incertitudes constatées pour les forts débits.

Toutefois deux éléments permettent d’avoir confiance dans les résultats, d’abord le travail d’équipe et la discussion sur les choix avec l’obsession de ne rien oublier et de ne pas se raconter d’histoire. C’est ainsi que les valeurs des incertitudes sur la mesure du niveau ont beaucoup étonné, car elles se sont

révélées bien plus élevées – une fois l’ensemble des facteurs d’influence pris en compte – que l’incertitude due au capteur seul. Ensuite, lors d’événements pluvieux – sur certains bassins de rétention où l’on mesure toutes les entrées et sorties – l’accord entre les volumes calculés par la variation de hauteur dans le bassin et ceux calculés à partir des débits est tel que de faibles incertitudes sur ces débits sont très vraisemblables.

### III.5. Les enseignements

Le premier de ces enseignements est la connaissance des incertitudes de tous les débits, connaissance qui devra irriguer les calculs et études faits à partir de ces données. La base de données est en cours d’évolution pour enregistrer pour chaque horodate l’incertitude estimée de toutes les mesures ( $H$ ,  $V$  et  $Q$ ).

C’est ensuite, au-delà des chiffres, un bon moyen d’objectiver la réflexion sur les caractéristiques des installations existantes ou à venir, de façon très détaillée, et pointer là où les efforts doivent porter. Par exemple, pour des raisons d’installation et de maintenance, les sondes de hauteur étaient parfois à distance des cordes de vitesse. Dans les collecteurs à forte pente, ceci pouvait conduire à une forte incertitude sur la hauteur ramenée dans la section de mesure des vitesses. Ce type d’installation est dorénavant évité.

Pour chaque couple ( $H$  ;  $Q$ ) dont nous calculons l’incertitude, nous affichons aussi le facteur d’influence principal (figure 6), c’est-à-dire le paramètre qui a le poids le plus important sur l’incertitude sur le débit.

Nous faisons ici un constat très général : pour la quasi-totalité de nos sections débitométriques et pour de faibles niveaux, l’incertitude sur la mesure du niveau d’eau est le facteur d’influence le plus important. La connaissance des faibles niveaux (temps sec) n’était pas, initialement, une priorité pour la DEA mais c’est bien sur cette mesure que l’effort doit porter, notamment en remplaçant, quand cela est possible (la connaissance par temps de pluie reste une priorité), des capteurs de pression par des radars de hauteur.

Par contre, il est rare – avec la mesure de vitesse par temps de transit – que le profil de vitesse intervienne comme

facteur d’influence principal dès que trois cordes au moins sont installées sur la section.

Un corollaire intéressant est la motivation engendrée par la connaissance de faibles incertitudes sur des forts débits sur de gros collecteurs. Les erreurs (et non les incertitudes) de paramétrage des équipements, de description de la section, etc., étaient certes inacceptables auparavant, mais elles sont devenues particulièrement frustrantes, car elles gâchent des résultats que l’on sait pouvoir être bons ; d’où un redoublement d’efforts pour piéger ces erreurs avec la création d’outils de vérification de la cohérence des données sur la section et un effort porté sur la sensibilisation des agents à la rigueur à porter au paramétrage.

Enfin ce travail a imposé un cadre de réflexion et d’analyse qui a jeté les bases d’une méthode de validation et de création d’outils d’aide que nous détaillons dans le chapitre suivant.

## IV. LES OUTILS D’AIDE À LA VALIDATION

### IV.1. Validation des sections de mesure

Elle a lieu après la première mise en service ou après réhabilitation ou modification d’une section existante et dure plusieurs mois. C’est une notion qui va au-delà de la réception après travaux, c’est une validation métrologique.

Elle se fait de façon très classique, par la vérification des équipements, de l’installation puis par l’analyse des données sur une période de fonctionnement assez longue pour comprendre une gamme variée d’événements hydrauliques. Pour les cordes de vitesse, la distribution des vitesses sur les différentes cordes est étudiée et questionnée si elle a une forme très atypique. Les données sont présentées dans le plan H-Q en comparaison avec la courbe théorique de Manning-Strickler, le nuage de point doit être expliqué connaissant le fonctionnement du réseau, son maillage, les manœuvres de vannes, etc.

Toutes ces vérifications permettent de statuer sur la validation (ou non) de la section de mesure. Une section de mesure sera validée s’il y a peu de données manquantes, si les

| Q (m3/s) | Influences : H → hauteur ; V → vitesse ; K → profil de vitesse |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----------|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1,0      | H  | H   | H   | H   | V   | V   | V   | V   | V   | V   |
| 2,5      |  |     | H   | H   | H   | V   | V   | V   | V   | V   |
| 5,0      |  |     |     |     | H   | H   | V   | V   | V   | V   |
| 30,0     |  |     |     |     |     |     |     |     | K   | K   |
| H (m)    | 0,3  | 0,6 | 0,8 | 1,1 | 1,3 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | 3,1 | 3,5 |

Fig 6 : Facteur d’influence principal (collecteur de la fig 5)

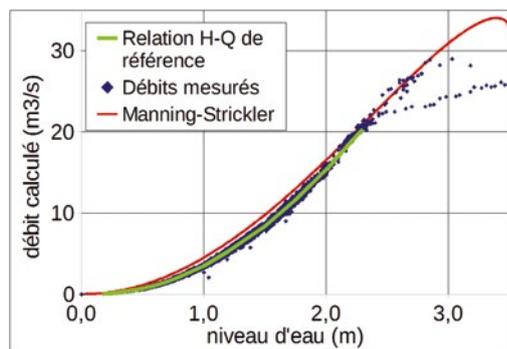


Fig 7 : Relation H-Q partielle

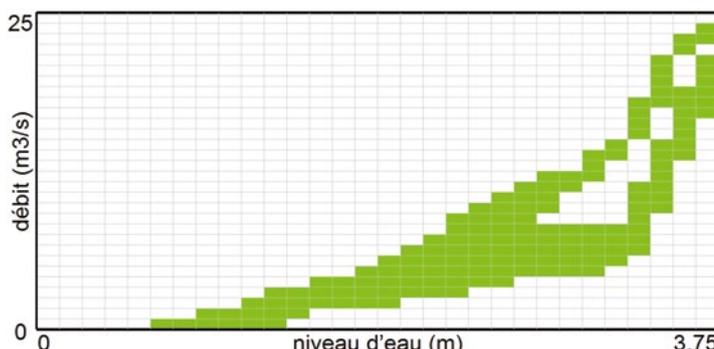


Fig 8 : Probabilité de présence des mesures dans le plan H ; Q

incertitudes sont connues et si elles sont acceptables vis-à-vis de l'objectif de la métrologie.

En faisant ce travail, on a déjà engrangé de la connaissance sur le fonctionnement hydraulique du site, et notamment les chroniques de temps sec, l'existence ou non d'une relation hauteur-débit au moins partielle, la zone du plan H-Q où l'on peut trouver des mesures. Ces données qui pourront être affinées, confortées ou modifiées au fil du temps constituent des données de référence (figures 7 et 8).

### IV.2. Validation des mesures

La validation des données de mesure, quant à elle, n'intervient qu'une fois le site validé. Elle se fait aussi de façon classique en observant les chroniques sur des courbes proposées à l'opérateur par le logiciel d'exploitation des données, les rapprochements avec les autres sites, la pluviométrie, les travaux, etc. Les informations recueillies lors de la validation de la section sont utilisées en complément pour savoir si les données observées sortent du cadre habituel (données de références). Si elles sortent du cadre, cela permet de suspecter un défaut, mais qui reste à confirmer par une analyse plus particulière de l'épisode incriminé.

Afin d'aider l'opérateur, ce cadre attendu des données lui est proposé en complément du logiciel d'exploitation, de manière automatisée.

### IV.3. La base documentaire

Cette base contient, sous forme de fichiers enregistrés dans des répertoires spécifiques du réseau informatique de la DEA, les documents suivants (figure 9) :

**Données de validation de la section** : Les documents sont créés lors de la validation de la section de mesure, et remis ensuite à jour si besoin. On y trouve par exemple le calcul des incertitudes, l'analyse du champ des vitesses, la présentation des données dans le plan H-Q avec la courbe Manning-Strickler, des plans, photos, explications, etc.

**Données de référence** : Les données d'aide à la validation des mesures sont construites lors de la validation de la section. Elles se présentent sous forme de classeurs Calc, à la structure strictement définie, enregistrées dans un répertoire spécifique de la base documentaire. Ces classeurs sont au nombre de quatre :

- les chroniques hebdomadaires de temps sec (hauteur et débit) ;
- la relation hauteur-débit si elle existe (souvent partielle) (figure 7) ;
- un tableau représentant le plan H-Q dans lequel sont reportés les couples (H ; Q) jugés plausibles (tableau constitué de 900 cellules, soit 30 hauteurs x 30 débits) (figure 8) ;
- les données nécessaires au recalcul du débit (géométrie du site et position des sondes de vitesse).

**Chroniques de comparaison** : Les documents sont générés par les outils d'aide à la validation aux formats CSV ou PDF.

### IV.4. Les outils développés

Les outils sont de deux formes, d'abord les modèles des classeurs permettant de réaliser les calculs d'incertitudes, faire diverses analyses et recevoir les données de référence ; ensuite des outils logiciels, à base de macros, destinés à automatiser certaines tâches. L'un de ces outils a pour vocation de générer des données de comparaison. L'outil, sans aucune intervention de l'opérateur, lit les fichiers exportés depuis la base de données de mesures, détecte la section de mesure concernée, lit les instructions de traitement, réalise ces traitements et génère sur toute la durée de la chronique exportée :

- un fichier CSV avec la chronique de temps sec, le débit attendu en fonction de la hauteur selon la relation hauteur-débit et le débit recalculé ;
- un listing au format PDF indiquant les périodes douteuses pour lesquelles les couples (H ; Q) ne sont pas compris dans la zone de probabilité – il s'agit d'une généralisation à deux données du test classique de seuils min et max pour un seul paramètre. À deux dimensions, la méthode est particulièrement efficace.

Selon les consignes de traitement préétablies, l'outil génère tout ou partie de ces informations. Le fichier CSV est ensuite importé sur la base de données de mesures via le logiciel d'exploitation des données et l'opérateur peut alors visualiser simultanément les chroniques brutes, le débit attendu selon la relation H-Q, les chroniques de temps sec et le débit recalculé, ce qui lui sera précieux pour détecter les périodes suspectes. Le développement des outils s'est fortement attaché à bannir toute contrainte de nature informatique dans leur utilisation.

### V. CONCLUSION

Le succès de la démarche que nous avons suivie tient au fait d'avoir, à partir de principes simples mais rigoureux, construit progressivement un système constitué de documents, de procédures, d'outils logiciels, et de l'avoir simultanément étendu et amélioré en profitant des retours d'expérience. Cette démarche a été construite avec la participation des agents travaillant sur la chaîne de mesure, implication indispensable pour en partager le sens et les objectifs, ce qui a permis sa bonne acceptation et son application au quotidien.

C'est aussi une somme considérable d'informations sur le fonctionnement hydraulique des sections de mesure de débit qui est conservée de façon structurée, avec un archivage de l'historique.

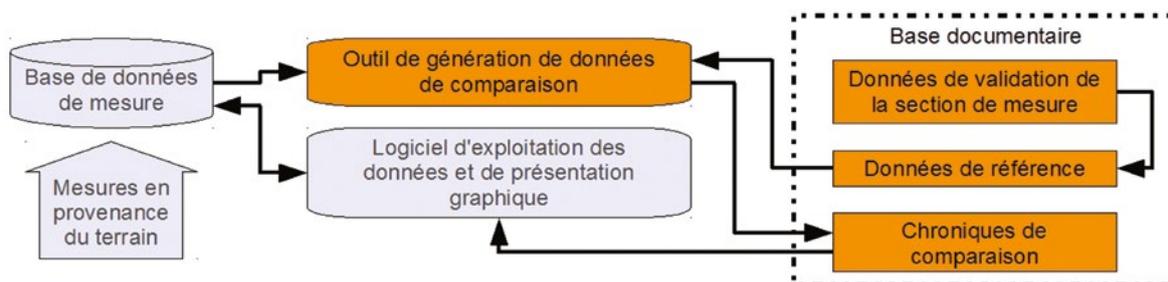


Fig 9 : Intégration des nouveaux outils (sur fond orange) dans le système d'exploitation des données

Les prochaines étapes consisteront à intégrer une part de ses outils dans le logiciel d'exploitation des données et commencer une démarche dans le même esprit pour les mesures de turbidité. Nous discernons aussi de nouveaux champs d'étude des incertitudes :

Les grands volumes de données recueillis grâce aux capacités croissantes des équipements sont à valoriser, notamment les mesures de vitesse pour servir une meilleure estimation de l'incertitude sur la connaissance du champ de vitesse. C'est un défi à relever par un travail conjoint entre chercheurs et opérationnels.

Le passage des incertitudes du débit aux incertitudes sur le volume transité est aussi une problématique intéressante qui reste à aborder mais difficile à résoudre, car elle dépend de la corrélation qui existe entre deux valeurs instantanées successives de débit  $Q_i$  et  $Q_{i+1}$  [OTHU, 2002].

## VI. RÉFÉRENCES

- AGENCE DE L'EAU RHIN-MEUSE (FÉVRIER 2016) – document à l'attention des acteurs de l'assainissement. *GUIDE PRATIQUE – Mise en place de l'autosurveillance des réseaux d'assainissement*.
- BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L., LAPLACE D., JOANNIS C., CHEBBO G. (2000) – Mesures en hydrologie urbaine et assainissement, Éditions TEC & DOC . 97-99.
- BONAKDARI H., LARRARTE F., LASSABATERE L., JOANNIS C. (2008) – Turbulent velocity profile in fully-developed open channel flows. *Environmental Fluid Mechanics*, **Volume 8, Issue 1**, 1-17.
- LARRARTE F., LIPEME KOUYI G., DUFRESNE M., JOANNIS C., CLAVERIE R. (MAI 2014) – *Rapport finalisé du projet COACHS* – DOI :10.13140/RG.2.1.3906.7606.
- MUSTE M., LEE K., BERTRAND-KRAJEWSKI J.-L. (2012) – Standardized uncertainty analysis for hydrometry: a review of relevant approaches and implementation examples. *Hydrological Sciences Journal*, **57:4**, 643-667, DOI : 10.1080/02626667.2012.675064.
- NORME ISO 6416 (JUILLET 2004) – Hydrometry – Measurement of discharge by the ultrasonic (acoustic) method. .
- NORME NF ENV 13005 (AOÛT 1999) – Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. *Métrologie Gérer et maîtriser les processus et les équipements de mesure*, **volume 1**, AFNOR : 189-192.
- NORME NF ISO/CEI GUIDE 98-3 (JUILLET 2014) – Incertitude de mesure - Partie 3 : guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM : 1995). AFNOR.
- OTHU (SEPTEMBRE 2002) – Incertitudes de mesure des débits et prise en compte dans le calage des modèles – GRAIE. *Fiche technique OTHU N°2*.
- RUDELLE M. (2008) – Mesures des vitesses d'écoulement par la méthode des temps de transit. *Journées techniques, Tours* [http://www.eau-loire-bretagne.fr/collectivites/journees\\_echanges/M\\_Rudelle.pdf](http://www.eau-loire-bretagne.fr/collectivites/journees_echanges/M_Rudelle.pdf).