

Faisabilité et intérêt d'une stratégie de prélèvement pilotée par une mesure de turbidité

Méthodologie d'évaluation et exemple d'application

■ C. JOANNIS¹, A. HANNOUCHE², G. CHEBBO^{2,3}

Mots-clés : préleveur, asservissement, turbidité, réseau unitaire, simulation, coûts, bénéfices

Keywords: water sampler, control, turbidity, combined sewer, simulation, cost, benefit

Introduction

Le suivi de la qualité des effluents est une opération délicate du fait du nombre de paramètres pouvant décrire cette qualité et de leur grande variabilité dans le temps. Elle est réalisée en routine au niveau des stations d'épuration les plus importantes grâce à des préleveurs automatiques activés en permanence. Cette stratégie de prélèvement « en continu » est impossible à mettre en place sur les plus petites stations et *a fortiori* sur les rejets des déversoirs d'orage ou pour contrôler le respect d'une convention de déversement d'effluents industriels dans un réseau communal. On en est donc réduit à effectuer des prélèvements en nombre restreint et plus ou moins aléatoirement.

Par ailleurs, la mise en place de capteurs pour mesurer en continu des paramètres physico-chimiques (turbidité, conductivité...) commence à se développer, et permet d'obtenir des mesures représentatives de l'ensemble des situations qui peuvent se succéder au cours du temps [VERSINI *et al.*, 2015a et 2015b]. Mais les paramètres mesurés sont très globaux et ne font en général pas l'objet de prescriptions réglemen-

taires ou contractuelles. Pour celles-ci, les analyses de laboratoire sont à la fois plus spécifiques et moins contestables.

L'utilisation conjointe d'une mesure en continu d'un paramètre global de pollution et de prélèvements soumis à des analyses spécifiques pourrait être une voie prometteuse pour tirer le meilleur parti de chaque méthode de suivi.

L'objectif de cette étude, réalisée dans le cadre du projet ANR Écotecnologies « Mentor », est d'évaluer la possibilité et l'intérêt de l'utilisation d'une mesure en continu de turbidité, pour piloter un préleveur et obtenir des analyses de matières en suspension (MES) ciblées sur des périodes « intéressantes ».

La notion de période intéressante dépend bien sûr de l'objectif des prélèvements et l'étude sera réalisée pour une application particulière, traitée à titre d'exemple : le contrôle du respect d'une prescription portant sur la concentration d'un rejet. On suppose que le respect de cette prescription ne peut être évalué qu'à partir d'un prélèvement soumis à analyses opposables à un tiers. On se propose d'évaluer une stratégie qui déclenche un prélèvement lorsque la mesure de turbidité dépasse un certain seuil, et indique donc un dépassement potentiel de la prescription portant sur la concentration. Cette stratégie pilotée par capteur sera ensuite comparée avec une stratégie de référence n'utilisant aucune information sur l'évolution en temps réel de la concentration.

¹ Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar), Laboratoire eau et environnement (LEE) – Centre de Nantes – Route de Bouaye – 44344 Bouguenais cedex – France. Courriel : claude.joannis@ifsttar.fr

² LEESU, UMR MA 102 – École des Ponts, AgroParisTech – UPEC, UPE – Champs-sur-Marne – France. Courriel : chebbol@leesu.enpc.fr

³ Faculty of Engineering III – Lebanese University – Hadath – Liban.

1. Stratégies de contrôle et coûts associés

1.1. Définition des stratégies de contrôle

Deux stratégies hypothétiques ont été imaginées pour mener à bien cette étude.

La stratégie pilotée par la turbidité (stratégie A) effectue un prélèvement lorsque la turbidité dépasse pour la première fois dans une journée un seuil fixé T_p . Si ce seuil n'est pas atteint, aucun prélèvement ne sera fait dans la journée.

La stratégie de référence (stratégie B) choisie est systématique : un prélèvement est déclenché tous les jours à heure fixe. On pourrait tester des fréquences différentes ou des variantes plus ou moins aléatoires (jour régulier/heure aléatoire, jour aléatoire/heure fixe, jour et heure aléatoires). Une stratégie de prélèvement quotidien à heure aléatoire a d'ailleurs été testée mais n'a pas donné de résultats fondamentalement différents de la stratégie systématique et les résultats ne seront pas présentés ici.

Pour les deux types de stratégie, on limite donc à un le nombre maximum de contrôles (prélèvements) réalisés dans une journée.

1.2. Situations possibles

On cherche à évaluer l'aptitude de différentes stratégies à détecter pour chaque journée le dépassement éventuel d'une prescription caractérisée par un seuil de concentration $[C_0]$ (les concentrations sont notées entre crochets pour les distinguer des coûts). Le dépassement de la prescription pour un jour j donné est défini par la condition :

$$\max_j ([C(t)]) > [C_0] \quad [\text{Équation 1}]$$

Le respect de la prescription est défini indépendamment de tout contrôle. Autrement dit, la prescription peut ne pas être respectée sans que cela soit détecté : l'enjeu du contrôle est précisément d'éviter ces situations pour un coût raisonnable.

Les stratégies de contrôle ont été définies plus haut par un critère de prélèvement, qui peut fournir dans une journée au maximum une analyse de concentration $[C(t_p)]$ réalisée à l'instant t_p . Cet instant ne correspond pas nécessairement à une période de dépassement de la prescription :

– pour la stratégie A, cela est dû à l'incertitude affectant l'évaluation d'une concentration-relation à par-

tir de la turbidité, autrement dit à l'incertitude de prédiction associée à une relation turbidité – MES [VERSINI *et al.*, 2015a; VERSINI *et al.*, 2015b] ;

– pour la stratégie B, cela est dû au fait que les prélèvements sont faits périodiquement alors que la courbe de concentration n'est pas périodique.

L'évaluation d'une stratégie de prélèvement s'apparente à celle d'une méthode de prévision ou de détection d'un événement, par exemple un événement météorologique, une intrusion dans un système informatique, ou l'occurrence d'une maladie. Ces types de problème sont classiquement analysés à partir d'un tableau permettant d'identifier les différentes situations susceptibles de se produire [DELA-COUR *et al.*, 2009 ; SHAIKH, 2011 ; SCHAEFER, 1990 ; JOLLIFFE et STEPHENSON, 2004 ; CAWCR, 2016]. Ici, l'événement à prévoir est le dépassement de la prescription un jour donné et le *tableau I* résume l'ensemble des situations possibles :

– le vrai positif (VP) correspond à un dépassement de la prescription pendant une journée durant laquelle un prélèvement a été réalisé pendant la période de dépassement du seuil $[C_0]$, et a donc permis de détecter la non-conformité ;

– le vrai négatif (VN) correspond à un respect de la prescription pendant une journée entière, où l'absence de prélèvement est donc justifiée ;

– le faux négatif (FN) correspond à un dépassement de la prescription pendant une journée durant laquelle aucun prélèvement n'a été réalisé pendant la période de dépassement ;

– le faux positif (FP) correspondrait à une situation où un prélèvement détecterait (à tort) un dépassement pendant une journée où la prescription a été intégralement respectée. Pour le problème considéré, les analyses sur prélèvement font foi. Il est donc impossible de détecter un dépassement de la prescription qui ne se serait pas produit, et il n'y a pas de faux positif.

Les termes « positif » ou « négatif » se réfèrent donc ici au résultat du contrôle si un prélèvement est réalisé : positif si $[C(t_p)] \geq [C_0]$; négatif si $[C(t_p)] < [C_0]$. En l'absence de prélèvement, le résultat est considéré comme négatif.

Les termes « vrai » ou « faux » correspondent à l'adéquation entre le résultat du contrôle et le respect

Stratégie	Concentration de l'échantillon prélevé	Respect de la prescription $[C_o]$ pendant toute une journée	
		Oui : $Max ([C(t)]) < [C_o]$	Non : $Max ([C(t)]) > [C_o]$
Systématique (B)	$[C(t_p)] < [C_o]$	Vrai négatif	Faux négatif
	$[C(t_p)] > [C_o]$	Faux positif (impossible)	Vrai positif
Pilotée par la turbidité (A)	Pas de prélèvement	Vrai négatif sans prélèvement	Faux négatif sans prélèvement
	$[C(t_p)] < [C_o]$	Vrai négatif avec prélèvement	Faux négatif avec prélèvement
	$[C(t_p)] > [C_o]$	Faux positif (impossible)	Vrai positif

Tableau I. Tableau des situations possibles un jour donné pour les deux stratégies

effectif (ou non) de la prescription pendant toute une journée.

Pour la stratégie A, il est pertinent pour les calculs de coût qui seront présentés plus loin de distinguer parmi les négatifs ceux qui le sont par absence de prélèvement de ceux pour lesquels un prélèvement a été réalisé, mais à un instant où $[C(t_p)] < [C_o]$.

La figure 1 illustre toutes les situations possibles dans le cas des prélèvements déclenchés par turbidité (stratégie A) pour plusieurs jours. En associant des coûts à chaque situation et en les multipliant par la fréquence d'apparition de chacune d'entre elles sur une période représentative (par exemple une année),

on peut déterminer un coût moyen. Celui-ci peut être utilisé pour comparer et éventuellement optimiser les stratégies.

1.3. Coûts associés à chaque situation possible

On se place ici du point de vue du service chargé du contrôle de la conformité du rejet. Pour évaluer la stratégie de contrôle, il lui faut définir une fonction critère qui intègre :

- le coût du contrôle ;
- le bénéfice de la détection des dépassements de la prescription ;
- le coût des dépassements non détectés.

• Le coût du contrôle est assez facile à évaluer. Il comprend :

- le coût journalier fixe C_o d'exploitation du préleveur, hors coût de prélèvement ;
- le surcoût journalier fixe C'_o d'exploitation du turbidimètre en cas de suivi en continu ;
- le coût C_1 marginal unitaire de prélèvement et de l'analyse lorsqu'un prélèvement est réalisé.

• Le bénéfice de la détection d'un dépassement de prescription peut dans un premier temps être évalué à partir du coût C_2 (pour le responsable du rejet) de la pénalité due à la suite d'une détection. Pour le service de contrôle, cette pénalité sera considérée comme un bénéfice $-C_2$, car elle lui apporte une ressource qui lui permettra de financer le contrôle.

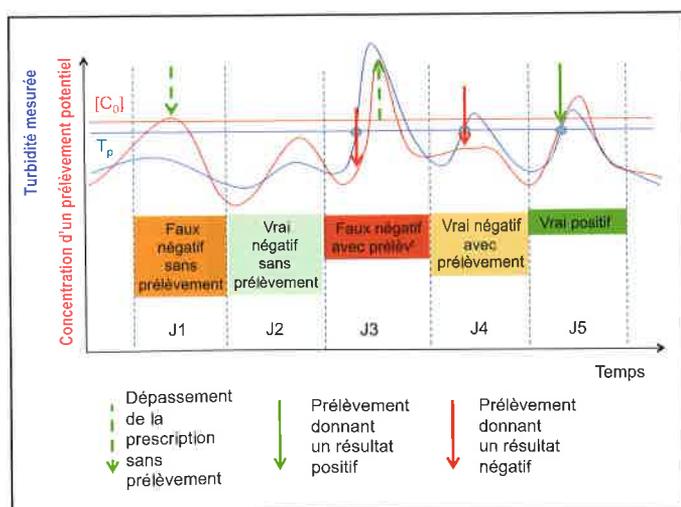


Figure 1. Situations possibles dans le cas des prélèvements déclenchés par turbidité (stratégie A). Les couleurs affectées à chaque situation traduisent leur caractère plus ou moins pénalisant en matière de coûts

Dans une perspective plus globale, il faudrait évaluer l'impact d'une détection de dépassement de prescription sur les pratiques du responsable du rejet et sur la qualité du milieu récepteur. On peut supposer que le montant de la pénalité est en relation avec les enjeux concernés (protection du milieu) dans une logique de « droit à polluer ». Dans ce cas, la pénalité perçue par le service de contrôle permettrait également de compenser les préjudices causés au milieu. On représentera ces préjudices par un coût C_e , supposé fixe, et permettant de les compenser.

- Les dépassements non détectés (FN_{SP}) n'ont pas de coût spécifique : pour le service de contrôle tous les jours sans prélèvement sont équivalents, que la prescription ait été respectée ou non, et pour l'environnement tous les rejets non conformes sont équivalents, qu'un prélèvement positif ait été réalisé ou non.

Cependant, une différence apparaît si l'on traite globalement l'ensemble service de contrôle + environnement : un dépassement détecté permet en théorie d'utiliser la pénalité perçue pour compenser les préjudices subis par le milieu récepteur, ce qui n'est pas le cas en l'absence de détection.

Selon ces hypothèses, les coûts associés aux différentes situations sont donnés dans le *tableau II*. Ils sont déclinés en deux versions. L'une est purement financière et récapitule les coûts et bénéfices pour le

service de contrôle. L'autre calcule un coût global en intégrant le coût des préjudices environnementaux.

C_1 , C_2 et C_e sont par convention positifs et représentent des coûts pour le service de contrôle. $-C_2$ est négatif et représente donc un bénéfice.

C_0 et C'_0 sont fixes mais seul C'_0 devra être pris en compte dans la comparaison des stratégies.

2. Évaluation des stratégies

2.1. Méthodologie

La méthode utilisée pour comparer les stratégies A et B sur un site donné est basée sur la simulation de prélèvements à partir d'une chronique de turbidité enregistrée sur ce site pour calculer les coûts moyens journaliers correspondants à chaque stratégie sur la période considérée.

Plus précisément on réalise successivement deux simulations.

La première permet de reconstituer des chroniques de concentrations réalistes, pouvant correspondre à la chronique de turbidité.

Pour ce faire, un signal $[C(t)]$ de la concentration en MES est simulé à partir du signal $T(t)$ en tenant compte de l'erreur résiduelle $\varepsilon(t)$ impliquée par une relation turbidité-MES linéaire :

$$[C(t)] = f(T(t)) = aT(t) + b + \varepsilon(t) \quad [\text{Équation 2}]$$

Pour chaque valeur de $[C(t)]$, une erreur de prédiction $\varepsilon(t)$ est simulée, en supposant que la variance de

Type de stratégie	Situation	Coûts pour le service de contrôle	Coûts environnementaux	Coûts globaux
Sans pilotage par la turbidité	VN_{AP}	$C_0 + C_1$	0	$C_0 + C_1$
	FN_{AP}	$C_0 + C_1$	C_e	$C_0 + C_1 + C_e$
	VP	$C_0 + C_1 - C_2$	C_e	$C_0 + C_1 + C_e - C_2$
Avec pilotage par la turbidité	VN_{AP}	$C_0 + C'_0 + C_1$	0	$C_0 + C'_0 + C_1$
	FN_{AP}	$C_0 + C'_0 + C_1$	C_e	$C_0 + C'_0 + C_1 + C_e$
	VP	$C_0 + C'_0 + C_1 - C_2$	C_e	$C_0 + C'_0 + C_1 + C_e - C_2$
	VN_{SP}	$C_0 + C'_0$	0	$C_0 + C'_0$
	FN_{SP}	$C_0 + C'_0$	C_e	$C_0 + C'_0 + C_e$

Tableau II. Coûts des différentes situations possibles dans l'hypothèse où la pénalité couvre les coûts environnementaux d'un dépassement de prescription et les coûts de contrôle

L'erreur est constante et que les erreurs successives entre $C(t_i)$ et $C(t_{i+j})$ sont indépendantes.

En appliquant l'équation 2 à une chronique de turbidité, on obtient une chronique de concentration. Ce calcul est répété n fois à l'aide d'une simulation par Monte Carlo qui génère n chroniques de concentrations, que l'on concatène pour constituer une chronique unique. La chronique de turbidité d'origine est également concaténée n fois pour obtenir une chronique de même longueur que la chronique de concentration, ces deux chroniques étant mises en relation pour la deuxième simulation.

Cette deuxième simulation utilise la chronique de turbidité pour déclencher (virtuellement) des prélèvements, soumis à des analyses (virtuelles elles aussi) dont les résultats sont issus de la chronique de concentration simulée.

Pour la stratégie A, le seuil de turbidité déclenchant le prélèvement a été pris égal à la valeur T_0 , ce qui correspond à la prescription $[C_0]$ par la fonction inverse de la relation $C = f(T)$:

$$T_0 = f^{-1}([C_0]) \quad \text{[Équation 3]}$$

Pour la stratégie B, il suffit de fixer l'heure (fixe) du prélèvement quotidien. On a choisi l'heure de pointe de turbidité de temps sec, vers 12 h.

Enfin, on identifie pour chaque journée la situation correspondante définie dans le tableau I, puis on évalue les fréquences correspondantes en divisant le nombre de jours d'occurrence de chaque par le nombre de jours de la période. Enfin, on multiplie ces fréquences par les coûts élémentaires indiqués dans le tableau II et on obtient le coût moyen d'une stratégie, sur la période donnée pour une prescription donnée.

On peut montrer que, pour une stratégie donnée, le coût global et le coût de contrôle ne diffèrent que d'un terme indépendant des performances de cette stratégie :

$$C_{\text{contrôle}} - C_{\text{Global}} = C_2 \times F(DP) \quad \text{[Équation 4]}$$

où $F(DP)$ désigne la fréquence de dépassement de la prescription (nombre de jours de dépassement/nombre de jours total considéré).

Les deux coûts sont donc équivalents pour la comparaison des stratégies A et B, ou pour l'optimisation de la stratégie A (optimisation non traitée dans cet article). Dans la suite, seul sera détaillé le cas du

coût pour le service de contrôle, dont la formulation est la plus simple.

2.2. Données utilisées

La méthode décrite ci-dessus a été appliquée sur les signaux de turbidité acquis sur le site de Clichy à Paris (Observatoire Opur). C'est un bassin versant urbain dont la superficie est de 942 ha desservis par un réseau d'assainissement unitaire. Les mesures de turbidité utilisées ont été acquises au pas de temps de 1 minute en 2006 (en atténuation FAU). Cette chronique a été découpée en jours, ce qui représente 343 jours (temps sec et temps de pluie) (figure 2).

Les distributions de turbidités instantanées sont illustrées figure 3. Elles montrent que de nombreuses valeurs sont réparties symétriquement autour d'un mode voisin de 250 FAU et correspondent à une gamme des valeurs courantes de temps sec comprise

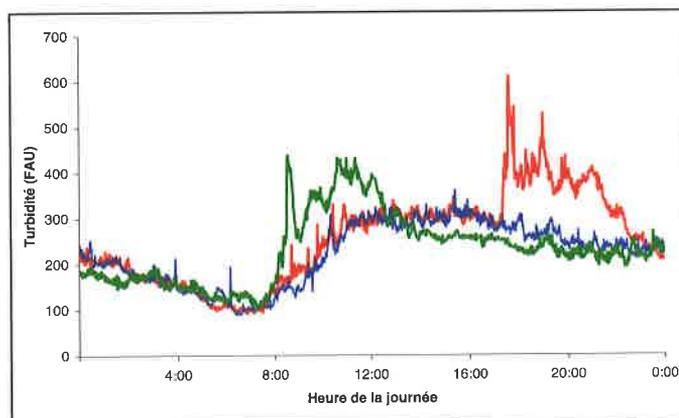


Figure 2. Exemples d'enregistrement de turbidité (chaque couleur correspond à une journée, en bleu une journée de temps sec, en rouge et vert deux journées de temps de pluie)

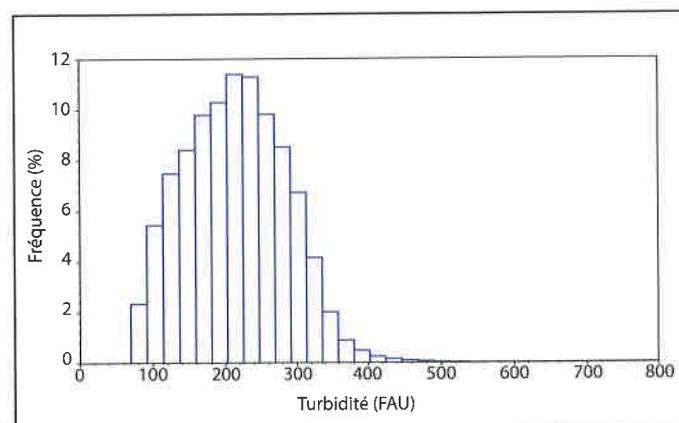


Figure 3. Distribution des turbidités instantanées

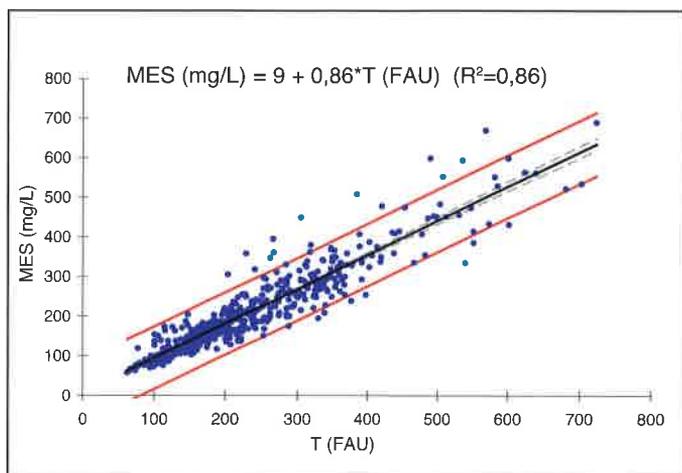


Figure 4. Relations turbidité-matières en suspension (MES) et incertitudes de prédiction associées (lignes rouges pleines). Les points bleus représentent les données utilisées pour construire ces relations et illustrent la qualité des ajustements

entre 100 et 350 FAU. Les valeurs les plus élevées peuvent atteindre 650 FAU, soit 570 mg/L.

La relation turbidité-MES (figure 4) est assez imprécise : de l'ordre de 80 mg/L (ce qui correspond à 90 FAU). Il s'agit de l'incertitude de prédiction qui inclut l'incertitude des analyses qui servent à établir les relations turbidité-MES. Cela est parfaitement justifié, dans la mesure où le résultat d'analyse fait foi. Il s'agit donc de prévoir des résultats d'analyse et non des valeurs réelles de concentration.

2.3. Gamme de paramètres testés

Les performances d'une méthode de détection dépendent en général de la fréquence d'occurrence des événements à détecter. Pour une chronique donnée, cette fréquence dépend du niveau de la prescription : plus on tolère des valeurs élevées, plus les valeurs dépassant la prescription seront rares. Puisque les chroniques disponibles ne correspondaient pas à des rejets soumis à autorisation, pour lesquels on aurait pu appliquer des préconisations réelles, nous avons défini des seuils arbitraires de concentration. Pour que les résultats obtenus sur différents sites puissent éventuellement être comparés, nous avons défini des seuils correspondant à des fréquences de prélèvement fixées, correspondant aux percentiles 50, 80, 90 et 95 calculés à partir de la distribution de la turbidité maximale journalière. Autrement dit, les prescriptions ont été fixées pour que la stratégie pilotée par

la turbidité déclenche en moyenne un prélèvement un jour sur deux, un jour sur cinq, un jour sur dix ou un jour sur vingt.

Pour évaluer le coût global d'une stratégie dans un contexte donné, il faut s'appuyer sur des valeurs de coûts. Ceux-ci sont déterminés par les conditions techniques du contrôle, à l'exception du montant de la pénalité qui peut être fixée plus ou moins arbitrairement. Pour simplifier le paramétrage du problème, C_0 et C'_0 n'ont pas été pris en compte et fixés à 0. De plus, le coût moyen annuel a été normalisé en divisant les résultats par C_2 . Le paramétrage des coûts se réduit donc à faire varier C_1/C_2 . Pour la présentation des résultats, il est plus pratique d'utiliser $\alpha = C_2/C_1$ pour lequel cinq valeurs ont été étudiées : 2, 5, 10, 20 et 50.

3. Résultats et discussions

3.1. Fréquence de dépassement de la prescription

Le tableau III présente les valeurs de prescription $[C_0]$ et les fréquences de dépassement $F(DP)$ observées sur les simulations pour chaque valeur de $[C_0]$. Il rappelle aussi les valeurs de turbidités correspondantes et leurs fréquences de dépassement. On voit que la fréquence de dépassement de la prescription (colonne 4) est souvent bien supérieure à la fréquence de dépassement du seuil de turbidité correspondant (colonne 1). En effet, le tirage au hasard des concentrations associées aux turbidités génère systématiquement des maximums journaliers bien supérieurs aux valeurs des maximums de turbidités converties en concentration par la relation $C = f(T)$.

% $T_{max} > T_0$	T_0 (FAU)	$[C_0]$ (mg/L)	F(DP)
(1)	(2)	(3)	(4)
50	380	336	92 %
20	490	430	38 %
10	530	464	20 %
5	660	577	5 %

Tableau III. Valeurs de prescription établies à partir de la distribution des turbidités sur chaque site et fréquence de dépassement correspondantes

3.2. Performances de la stratégie de prélèvement pilotée par la turbidité

Le taux de détection (*tableau IV*) est en général inférieur à 50 %. Cette performance relativement modeste est liée à la stratégie de prélèvement qui limite à un par jour le nombre de prélèvements. Compte tenu des incertitudes, le dépassement de la consigne de turbidité a une chance sur deux de conduire à un prélèvement négatif. Si la composante aléatoire de l'erreur de prédiction est importante, on pourrait réduire son impact en répétant les prélèvements pendant la période de dépassement de la consigne.

Les coûts journaliers de contrôle normalisés (c'est-à-dire rapportés au coût de la pénalité C_2) sont négatifs, ce qui signifie que la tâche de contrôle est « bénéficiaire » : les amendes perçues couvrent les frais variables de prélèvement et d'analyse. Il faudrait intégrer les coûts fixes pour compléter le bilan, mais il suffit de comparer directement ces coûts aux valeurs du tableau pour vérifier si le bilan est réellement positif. Enfin, les coûts de contrôle obtenus pour $C_2/C_1 = 50$ sont 2 à 5 fois plus faibles que pour $C_2/C_1 = 2$, car le coût normalisé des prélèvements (C_1/C_2) pèse beaucoup moins dans le budget.

3.3. Performances de la stratégie de prélèvement à heure fixe

Le *tableau V* récapitule les taux de détection et les coûts de contrôle optimum de la stratégie de prélèvement à heure fixe.

On voit que les taux de détection maximums sont variables mais assez faibles, souvent inférieurs à 10 %. Les coûts de contrôle sont en général positifs, car la fréquence de prélèvement quotidienne entraîne des coûts qui ne peuvent pas être compensés par les pénalités du fait des faibles taux de détection obtenus. La seule exception correspond à une valeur de pénalité élevée conjuguée avec une valeur de prescription très basse. La fréquence élevée de dépassement de la prescription permet de percevoir un montant de pénalités suffisant pour compenser les coûts de prélèvement.

Comme pour la stratégie A, les coûts obtenus pour $C_2/C_1 = 50$ sont plus faibles que pour $C_2/C_1 = 2$, mais cet effet est encore plus marqué, car il reflète essen-

[C ₀] (mg/L)	Taux de détection %	Coût journalier du contrôle rapporté au montant de la pénalité	
		C ₂ /C ₁ = 2	C ₂ /C ₁ = 50
336	27	-0,04	-0,20
430	32	-0,02	-0,07
464	40	-0,01	-0,04
577	59	-0,01	-0,02

Tableau IV. Taux de détection et coûts associés en fonction de la prescription pour deux valeurs de pénalités pour la stratégie asservie à la turbidité

[C ₀] (mg/L)	Taux de détection %	Coût journalier du contrôle rapporté au montant de la pénalité	
		C ₂ /C ₁ = 2	C ₂ /C ₁ = 50
336	7,6	0,43	-0,05
430	3,6	0,49	0,01
464	3,7	0,49	0,01
577	7,5	0,5	0,02

Tableau V. Taux de détection et coûts associés en fonction de la prescription pour deux valeurs de pénalités pour la stratégie de référence

tiellement les coûts de prélèvement et d'analyse, avec une faible compensation par les pénalités recueillies.

3.4. Comparaison des coûts entre les deux stratégies

La *figure 5* illustre la comparaison des coûts obtenus par la stratégie A (asservie à la turbidité, en ordonnée) et la stratégie B de référence (heure fixe optimum, en abscisse) rapportés au montant de la pénalité C_2 pour les différentes valeurs de prescription $[C_0]$ et de rapport des coûts C_2/C_1 choisies.

Comme on l'a vu plus haut, pour la stratégie systématique de référence les coûts sont en général positifs, sauf si le coût du prélèvement est faible et la prescription fréquemment dépassée ($C_2/C_1 > 10$; $[C_0] = f(T_{max50})$).

Du fait de ses meilleurs taux de détection permettant d'obtenir systématiquement des coûts négatifs, la stratégie pilotée par la turbidité est toujours bien moins coûteuse que la stratégie de référence : les points du graphique sont tous situés en dessous de la première diagonale (représentée en gras). Là encore, une fréquence élevée de dépassement de la consigne

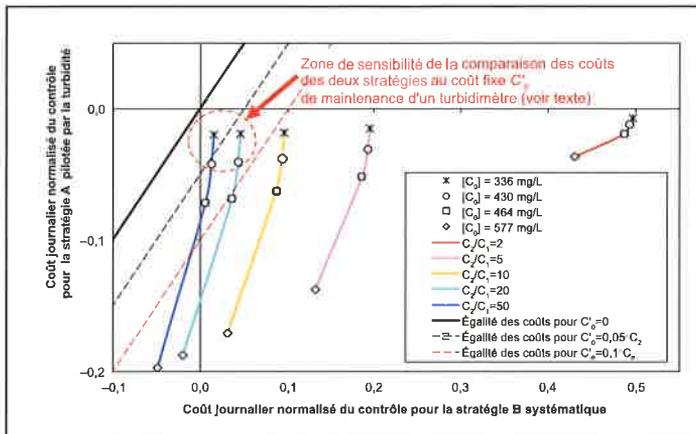


Figure 5. Comparaison des coûts de contrôle normalisés de la stratégie pilotée par la turbidité et de la stratégie de référence pour différentes valeurs de prescription (symboles) et pour différentes valeurs du rapport C_2/C_1 (couleurs). La droite pointillée correspond à l'égalité des coûts des deux stratégies

et un coût de prélèvement faible par rapport au bénéfice apporté par une pénalité constituent des facteurs favorables pour le bilan économique.

Les coûts fixes n'ont pas été pris directement en compte, car ils compliqueraient les représentations, qu'il faudrait paramétrer en fonction de C_0/C_2 et C_0/C_1 .

Le coût fixe de maintenance d'un préleveur C_0 joue de la même manière sur les coûts des deux stratégies et on peut en faire abstraction pour la comparaison.

En revanche, le coût fixe C_0 de maintenance d'un turbidimètre ne joue que sur la stratégie A, et peut modifier les résultats de la comparaison. Pour approcher l'impact de ce facteur, on a décalé sur la figure 5 la première diagonale qui matérialise l'égalité de coûts. Les résultats sont présentés pour deux valeurs arbitraires de C_0 : $0,05 \cdot C_2$ (tirets noirs) et $0,1 \cdot C_2$ (tirets rouges).

On voit qu'une valeur de C_0 comprise entre $0,03 \cdot C_2$ et $0,1 \cdot C_2$ serait suffisante pour que la stratégie A soit plus coûteuse que la stratégie B dans les cas les plus défavorables ($|C_0| \leq f(T_{maxj80})$ et $C_2/C_1 \geq 20$) : les points correspondants sont situés au-dessus des droites d'égalité des coûts décalées. Ces valeurs critiques de C_0 dépendent de la valeur de pénalité prise comme référence.

On peut préférer exprimer le coût critique de maintenance en fonction de C_1 , qui correspond à des coûts techniques objectifs. Il faut alors fixer une hypothèse de calcul pour C_2/C_1 . Si l'on admet que $C_2/C_1 = 20$ est

une valeur réaliste, il suffit que les coûts fixes rapportés à la journée de maintenance d'un turbidimètre C_0 soient inférieurs à $0,2 \cdot C_1$ pour que la stratégie A soit moins coûteuse que la stratégie B. Le cercle rouge pointillé matérialise ainsi la zone critique, où l'avantage de la stratégie A peut être annulé par le coût de maintenance du turbidimètre.

Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail est surtout méthodologique : il détaille la problématique d'évaluation des performances de stratégies de prélèvement et les modalités d'analyse des résultats pour une application de contrôle de la conformité d'un effluent à une prescription de concentration maximale journalière. Il apparaît que l'application étudiée s'apparente à un problème classique d'évaluation d'une méthode de détection ou de prévision d'événements peu fréquents, mais présente néanmoins des spécificités. Celles-ci ont été prises en compte dans une analyse détaillée des coûts et des bénéfices impliqués par un contrôle de conformité.

D'un point de vue pratique, les résultats mettent en évidence l'intérêt potentiel de l'asservissement d'un préleveur à une mesure en continu de turbidité pour un site unitaire.

Ils sont sensibles aux scénarios testés, résultant de la combinaison :

- d'un objectif, ici le contrôle du respect d'une préconisation définie par un paramètre (la concentration en MES) et une valeur seuil ;
- d'une chronique de turbidité ;
- d'incertitudes sur la correspondance entre les valeurs successives de turbidité et de la concentration en polluant à contrôler fournie par des analyses. Ces incertitudes sont définies par leurs valeurs en fonction de la valeur mesurée, et par la structure postulée des erreurs (par exemple, indépendance ou autocorrélation des erreurs sur des valeurs successives) ;
- d'une stratégie de prélèvement pilotée par la turbidité et d'une stratégie de référence.

En revanche, ils ne dépendent pas de la formulation des coûts (intégration ou non des coûts environnementaux).

Il serait intéressant de poursuivre ce travail, en modifiant dans un premier temps certains éléments du scénario :

- augmentation du nombre de simulations pour une configuration donnée;
- modification de la simulation des erreurs (autres valeurs d'incertitude de la conversion turbidité-MES, corrélation des erreurs pour des pas de temps successifs...);
- traitement d'autres chroniques de turbidité;
- amélioration de la définition de la prescription (concentration maximum moyenne sur une durée plutôt que concentration maximum instantanée);
- ajustement des valeurs de prescription pour compléter la gamme de fréquence de dépassement étudiée.

Dans un deuxième temps, on devra améliorer la stratégie pilotée par la turbidité pour augmenter le taux de détection, par exemple :

- en introduisant un délai entre la détection et le prélèvement pour prendre en compte la dynamique;
- en faisant plusieurs prélèvements à la suite d'un dépassement de la prescription de turbidité, avec un nombre et une fréquence à définir (par exemple six prélèvements séparés de 5 min), ce qui nécessitera de distinguer les coûts de prélèvement (équivalents pour un prélèvement ou une série groupée) et les coûts d'analyse (proportionnels au nombre de prélèvements);
- en asservissant le délai ou la fréquence impliqués dans les stratégies ci-dessus à la dynamique de montée du signal de turbidité.

Le dernier point ci-dessus peut ouvrir la voie à d'autres objectifs, tels que l'optimisation des prélèvements pour calibrer une relation turbidité-MES en maximisant la variabilité des analyses.

Cependant, la simulation de cas hypothétiques devra rapidement déboucher sur des applications à des cas réels, pour lesquels la méthode de simulation proposée permettra de tester des stratégies sur des enregistrements réalisés pendant une période préliminaire. Ces stratégies pourront alors être testées et optimisées hors ligne vis-à-vis des applications considérées, avant d'être appliquées en temps réel *in situ* et validées *a posteriori*.

Remerciements

Ce projet a bénéficié du soutien financier de l'Agence nationale de la recherche, « Notification de décision d'aide n° ANR 11 ECOT 007 01 du 13 décembre 2011 » dans le cadre du projet Mentor, ainsi que de l'Observatoire des polluants urbains, dans le cadre du programme OPUR4.

Liste des notations

A	Stratégie de prélèvement pilotée par une mesure en continu de turbidité
B	Stratégie de prélèvement de référence à heure fixe
$[C]$	Concentration
$[C_0]$	Prescription de concentration à ne pas dépasser
$[C(t)]$	Concentration à l'instant t
C	Coût
C_0	Coût fixe d'exploitation du préleveur, hors coût de prélèvement
C'_0	Surcoût fixe d'exploitation du turbidimètre en cas de suivi en continu
C_1	Coût unitaire de prélèvement et de l'analyse lorsqu'un prélèvement est réalisé
C_2	Montant de la pénalité lorsqu'un dépassement de prescription est détecté par un prélèvement
C_e	Coût environnemental induit par un dépassement de la prescription
DP	Dépassement de prescription
$F(DP)$	Fréquence de dépassement de la prescription
FN	Faux négatif (§ 1.2)
FN_{AP}	Faux négatif avec prélèvement (§ 1.2)
FN_{SP}	Faux négatif sans prélèvement (§ 1.2)
VN	Vrai négatif (§ 1.2)
VP	Vrai positif (§ 1.2)
T_0	Valeur de turbidité correspondant à la prescription $[C_0]$
t_p	Instant d'un prélèvement
T_p	Seuil de turbidité provoquant un prélèvement
$f()$	Notation générique pour exprimer qu'une variable est fonction d'une autre

Bibliographie

CAWCR – Collaboration for Australian weather and Climate Research (2016) : Forecast Verification - Issues, Methods and FAQ. <http://www.cawcr.gov.au/projects/verification> [consulté le 27/12/2016]

DELACOUR H., SERVONNET A., ROCHE C. (2009) : « Critères d'évaluation de la validité d'un test biologique ». *Revue francophone des laboratoires*; 39(412) : 41-8.

JOLLIFFE I.T., STEPHENSON D.B. (2004) : *Forecast verification. A practitioner's guide in atmospheric science*. Chichester, England : John Wiley. 240 p.

SCHAEFER J.T. (1990) : « The critical success index as an indicator of warning skill ». *Weather and forecasting*; 5 : 570-5.

SHAIKH S.A. (2011) : « Measures derived from a 2 x 2 table for an accuracy of a diagnostic test ». *J Biomet Biostat*; 2 : 128 (doi:10.4172/2155-6180.1000128).

VERSINI P.-A., JOANNIS C., CHEBBO G. (2015a) : *Guide technique sur le mesurage de la turbidité dans les réseaux d'assainissement*, Onema, Guide et Protocoles, 82 p., <http://www.onema.fr/Guides-et-Protocoles>

VERSINI P.-A., HANNOUCHE A., JOANNIS C., CHEBBO G. (2015b) : *Comment estimer les incertitudes affectant les mesures de concentrations et de flux polluants en réseau d'assainissement ?* Guide technique Mentor, 88 p.

Résumé

C. JOANNIS, A. HANNOUCHE, G. CHEBBO

Faisabilité et intérêt d'une stratégie de prélèvement pilotée par une mesure de turbidité. Méthodologie d'évaluation et exemple d'application

L'utilisation conjointe d'une mesure en continu d'un paramètre global de pollution (conductivité, turbidité...) et de prélèvements ponctuels suivis d'analyses au laboratoire semble une voie prometteuse pour bénéficier à la fois de la représentativité temporelle de la première et de la spécificité des secondes. L'intérêt potentiel d'une telle stratégie a été testé dans le cas d'un contrôle de conformité de la qualité d'un effluent, par rapport à une prescription exprimée comme une valeur maximum de concentration à ne pas dépasser. Après avoir formalisé le problème et identifié les différentes situations possibles et les coûts associés, des simulations ont été réalisées sur des enregistrements de turbidité issus d'un site unitaire suivi dans le cadre de l'Observatoire des polluants urbains (Opur). Dans un premier temps, des chroniques de concentration ont été générées à partir de ces enregistrements et d'une relation turbidité-matières en suspension (MES) adaptée,

en prenant en compte les incertitudes affectant cette conversion. Dans un deuxième temps, deux stratégies de contrôle ont été simulées sur ces chroniques de turbidité et concentration. L'une est une stratégie de prélèvement systématique, et l'autre une stratégie pilotée par la mesure de turbidité. Les deux stratégies ont été comparées en matière de coût, pour différentes hypothèses concernant les seuils de prescription et les coûts ou bénéfices unitaires. Les résultats montrent l'intérêt potentiel du pilotage des prélèvements par la turbidité, mais ils sont très dépendants des stratégies testées qui pour l'instant constituent des cas d'école. Cette étude a surtout un intérêt méthodologique, mais elle peut désormais être étendue à d'autres stratégies de contrôle, d'autres définitions de prescription, d'autres séries de données, et, moyennant quelques aménagements des critères d'évaluation, à d'autres objectifs.

Abstract

C. JOANNIS, A. HANNOUCHE, G. CHEBBO

Feasibility and advantages of a water sampling strategy controlled by a turbidity monitoring system. Assessment methodology and applications

Combining continuous measurement of a global pollution parameter (conductivity, turbidity), with discrete water sampling and laboratory analysis enables to harness both the temporal representativeness of the former and the specificity of the latter. The potential interest of such a strategy is investigated for a specific case study, where the conformity of a discharge to a regulation expressed as a maximum SS concentration was to be checked. Firstly, the problem is formalized by identifying all possible configurations and associated costs. Then simulations were performed using turbidity recordings made available on a combined sewer by Opur observatory. In a first step, these recordings were converted into SS concentrations by applying a proper turbidity-SS concentration relationship, and uncertainties implied by this conversion were

considered. In a second step two sampling procedures were simulated on the basis of turbidity and SS time series. The first one is systematic, with a constant time step, and the second one uses turbidity information to trigger the (virtual) sampler. The performance of both procedures expressed as costs are then compared, for different values of regulation values, and unit costs and benefits. The results show that using turbidity for driving a sampler is very interesting in this specific case study, but these results are heavily dependent on the procedures considered, which presently do not correspond to a real situation. So, the interest of the study lies chiefly in the methodological framework, which can be adapted and applied to other data, other procedures and other objectives.



Ce guide pratique vous permettra d'accéder aux connaissances indispensables sur les services publics de l'eau, de l'assainissement et des déchets et donne des clefs pour orienter son parcours professionnel.

