

Contrôle, régulation et sécurité en temps réel des ouvrages

La gestion patrimoniale des infrastructures, au plan opérationnel, inclut une surveillance des ouvrages en temps réel, en lien fort avec le contrôle et la régulation de leur fonctionnement, afin d'assurer la sécurité des usagers et de l'environnement. Cet article présente les principes et méthodes qui sous-tendent les actions au pas de temps fin pour des patrimoines tels que les digues, les barrages et les réseaux d'eau et d'assainissement et montre comment ces actions contribuent de manière déterminante à la connaissance de l'état du patrimoine.



Les principes et modalités d'exploitation en temps réel des ouvrages de stockage et de transport de l'eau sont primordiaux, que ce soit pour les objectifs de sûreté (sécurité des personnels d'exploitation et des personnes potentiellement impactées en cas de rupture, coupures d'eau, pol-

lution de l'eau distribuée) ou pour les objectifs d'optimisation de la gestion des ouvrages (optimisation de la production hydroélectrique ou de l'allocation de la réserve d'eau, minimisation des intrants, minimisation des fuites, contraintes de fonctionnement liées au processus de traitement, qualité...). C'est ce que développe cet article, à partir d'exemples tirés de domaines variés d'infrastructures : barrages, digues de protection, réseaux d'alimentation en eau potable, réseaux d'assainissement. Pour les barrages et les digues, nous mettons délibérément l'accent sur les aspects liés à la sécurité des personnes sans aborder les aspects liés à l'optimisation de l'exploitation. *A contrario*, ces aspects sont largement développés dans le cas des réseaux d'eau potable.

Méthodes et outils selon les types d'ouvrages

Barrages et digues

Obligations réglementaires concernant la surveillance

Le niveau de risque élevé pour les vies humaines et pour l'économie représenté par les barrages et les digues a amené le législateur à introduire de longue date des dispositions réglementaires pour en assurer la sûreté.

Ces dispositions ont été largement renforcées par les décrets de décembre 2007 et mai 2015 et leurs textes d'application, et sont désormais intégrées dans le Code de l'environnement.

Les barrages sont répartis en trois classes (A, B et C) selon leur hauteur et le volume de leur réservoir, ce qui est censé représenter – certes de façon imparfaite – les conséquences en cas de rupture. Les digues de protection sont elles aussi réparties en trois classes, selon le nombre de personnes protégées.

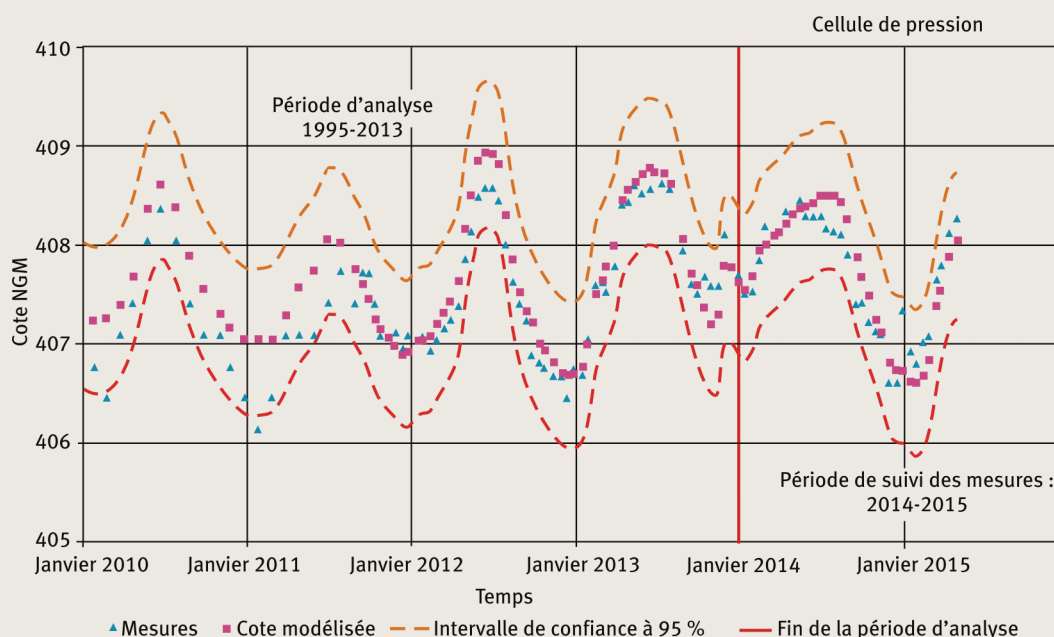
En ce qui concerne plus spécifiquement la surveillance et l'exploitation en temps réel de l'ouvrage, les obligations suivantes s'imposent à l'exploitant :

- produire un document décrivant l'organisation mise en place pour l'exploitation (aussi dénommé « consignes ») ;
- réaliser des tournées de surveillance visuelle et procéder aux mesures d'auscultation donnant lieu à un rapport périodique ;
- rapporter tout cela dans un rapport d'exploitation et d'auscultation dont la périodicité dépend de la classe de l'ouvrage.

L'organisation de l'exploitant

Les consignes mentionnées ci-dessus sont regroupées dans un document très complet détaillant en particulier l'organisation de l'exploitant, le dispositif d'auscultation, la périodicité et le contenu des tournées de surveillance visuelle et de mesures, le contenu des visites techniques approfondies (VTA) et des rapports périodiques, la conduite lors des crues ou de tout événement risquant de

❶ Résultat de l'analyse statistique des mesures d'un instrument sur la période 1995-2013 et extrapolation pour le suivi des mesures au-delà du 01/01/2014 (logiciel SURVEY).



mettre en jeu la sécurité de l'ouvrage (séismes, anomalies de comportement...). Les « consignes » font l'objet d'échanges approfondis entre l'exploitant et le service de l'État chargé du contrôle et peuvent évoluer si le besoin s'en fait sentir.

La conduite lors des crues est un point particulièrement important des consignes, d'autant plus si l'ouvrage est doté d'organes mobiles qui doivent être manœuvrés dans ces situations. Pour les barrages, la consigne en crues doit hiérarchiser les objectifs à remplir (ne pas dépasser la cote des plus hautes eaux, ne pas aggraver le débit et la cinétique de la crue en aval...) et détailler les moyens d'y parvenir, en particulier dans la chronologie d'ouverture des vannes. Les circuits d'information vers et depuis l'exploitant sont précisés. Tous les éléments importants de la chaîne doivent faire l'objet de dispositifs de secours et doivent être régulièrement testés. C'est dans cet esprit qu'EDF a par exemple développé un simulateur de crues pour entretenir la compétence de ses personnels d'exploitation.

L'étude de danger, obligatoire pour les barrages de classes A et B et pour les systèmes d'endiguement quelle que soit leur classe, contient de nombreuses rubriques dont une porte sur le système de gestion de la sécurité (SGS). Cette étude, réalisée tous les dix ou quinze ans (selon la classe de l'ouvrage) par un organisme agréé différent de l'exploitant, permet une analyse extérieure de l'organisation de l'exploitant, des moyens humains et techniques dont il dispose, de la qualification et des mesures de formation des personnels. L'étude de dangers se termine par des propositions de mesures visant à réduire les risques. Ces mesures peuvent être, entre autres, d'ordre organisationnel et entraîner, le cas échéant, une modification des consignes.

Suivi des ouvrages par auscultation

En appui à la surveillance visuelle périodique qui reste l'outil primordial, la réglementation impose que tous les barrages soient munis d'un système d'auscultation, afin d'assurer un suivi en temps réel du comportement des ouvrages.

Le dispositif d'auscultation doit permettre de connaître le comportement physique et hydraulique de l'ouvrage. Ce dispositif comprend en général :

- des appareils topographiques de mesure de déplacements (repères et piliers de visée) ;
- des appareils de mesures de mouvements internes à l'ouvrage (pendules, fissuromètres, extensomètres...) ;
- des appareils de mesures hydrauliques :
 - mesure de la cote du plan d'eau par sonde piézométrique et/ou échelle limnométrique ;
 - mesure des pressions d'eau en fondation, dans le corps et aux abords de l'ouvrage par piézomètres ou cellules de pressions interstitielles ;
 - mesures des débits de fuite évacués par le système de drainage par seuils ou empolement.

La périodicité des mesures est adaptée à chaque cas particulier et figure dans les consignes ; cela va de mesures faites en continu à des mesures faites annuellement. L'exploitation des mesures brutes permet une surveillance de premier niveau de l'ouvrage. Il est nécessaire d'utiliser des logiciels statistiques dédiés pour connaître et mettre en valeur, de manière plus fine, le comportement de l'ouvrage. Ces logiciels permettent de séparer les variations liées aux effets réversibles (variation de la cote du plan d'eau et de la température) et les variations irréversibles liées à l'effet du temps. Le logiciel SURVEY, développé à Irstea, comprend en plus, la variable expli-

▶ cative « pluie » basée sur des cumuls hebdomadaires de pluie précédant la mesure. Le suivi des mesures, entre deux analyses statistiques est réalisé par la correction des mesures brutes à partir des paramètres issus de la précédente analyse (figure 1). L'intervalle de confiance calculé permet de repérer les mesures sortant de la plage de variations attendues. En cas de mesure « anormale », dans un premier temps la mesure doit être vérifiée (problème de lecture ou d'appareillage, par exemple). Si cette mesure est confirmée, elle révèle un nouveau comportement qui doit être suivi dans le temps, mais qui peut être aussi une alerte, par exemple :

- élévation brusque du niveau piézométrique enregistré sur un piézomètre ou une cellule de pression qui révèle une présence d'eau dans l'ouvrage ;
- baisse d'un débit de drainage, signe d'un éventuel colmatage du système ;
- déplacement brusque d'un pendule révélateur d'un mouvement d'une partie de l'ouvrage ;
- ouverture brutale d'une fissure.

Ce type de constat demande une réponse d'urgence, d'abord sous la forme d'une intervention du bureau d'études en charge de l'analyse d'auscultation, puis par des mesures appropriées de gestion allant d'interventions sur tel organe de l'ouvrage jusqu'à un abaissement plus ou moins prononcé de la cote d'exploitation.

Particularités pour les digues de protection contre les submersions

Par rapport aux barrages, le contexte de la surveillance des digues présente plusieurs spécificités :

- les digues sont rarement en eau, ce qui, contrairement aux barrages, ne permet pas de les voir fonctionner dans des conditions proches de leur situation de projet. La surveillance en crue est donc primordiale car c'est la seule occasion de les observer en « conditions réelles » ;
- les digues sont rarement dotées de dispositifs d'auscultation. C'est donc essentiellement sur l'observation visuelle que repose leur surveillance. Cette observation visuelle doit se dérouler périodiquement pour déceler d'éventuelles dégradations et surtout en crues ainsi qu'indiqué ci-dessus ;
- du fait de leur construction ancienne, des techniques relativement sommaires employées et du manque d'informations sur leur comportement réel en crues, le niveau de sûreté des digues est nettement moins élevé que pour les barrages.

Dans un tel contexte, les consignes constituent le document primordial pour ces ouvrages. Outre les aspects liés à la surveillance qui sont comparables à ce qui est décrit plus haut pour les barrages, les consignes pour les systèmes d'endiguements doivent clairement afficher :

- le niveau de protection, niveau au-delà duquel de l'eau va s'introduire dans la zone protégée, par débordement sur un déversoir ou sur la crête ;
- le niveau de sûreté, niveau au-delà duquel la rupture de la digue est probable ;
- les mesures à prendre à l'approche de ces deux niveaux, en particulier en termes de mise en sécurité des populations censées être protégées.

Ainsi que l'ont montré la plupart des études de danger réalisées à ce jour sur des systèmes d'endiguement, le

niveau de sûreté peut être inférieur au niveau de protection apparent du système, la digue pouvant se rompre bien avant que le niveau d'eau n'atteigne le niveau de débordement.

Les digues de l'Agly (Pyrénées-Orientales) étaient récemment dotées de consignes avant que ne survienne une crue en mars 2013, d'occurrence vingt à trente ans. Ces consignes répondaient aux attendus développés ci-dessus. Leur mise en œuvre lors de l'événement de mars 2013 a permis l'évacuation préventive de la population concernée dans un délai raisonnable avant la rupture de la digue qui s'est produite en deux endroits lorsque le niveau du fleuve avoisinait celui de la crête de l'ouvrage. Aucune victime n'a été à déplorer suite à ces ruptures.

Réseaux

L'exploitation au jour le jour des réseaux hydrauliques implique un monitoring de leur fonctionnement, et donc la collecte et le traitement en temps réel de l'information qui en résulte. Les données ainsi collectées sont d'un intérêt opérationnel évident à très court terme. Elles n'en méritent pas moins aussi un archivage rigoureux, dans l'objectif de les organiser, au sein du système d'information (SI) du service gestionnaire, en séries chronologiques rattachables à des éléments de patrimoine bien identifiés, ou à des ensembles de ces éléments (secteurs géographiques). L'intérêt de conserver en mémoire de telles informations réside en effet dans leur exploitation possible *a posteriori* pour améliorer, et formaliser au sein de modélisations, la connaissance du patrimoine, de son fonctionnement et de l'évolution de son état. Cette interaction entre niveaux opérationnel et informationnel de la gestion patrimoniale des infrastructures, ainsi qu'entre échelles de temps très court et long, est illustrée par deux exemples, l'un pour l'alimentation en eau potable, l'autre pour l'assainissement.

Réseaux d'alimentation en eau potable (AEP)

L'optimisation énergétique des réseaux d'eau potable fait l'objet de travaux depuis plusieurs décennies et l'évolution des moyens de calcul autorise maintenant des simulations et calculs en quasi temps réel (entre quelques secondes et quelques minutes pour de grands réseaux) par des techniques de programmation dynamique, linéaire, par les graphes ou par utilisation d'algorithmes génétiques.

L'augmentation des moyens de mesure mis en place pour lutter contre les pertes (sectorisation des réseaux, pré-localisation acoustique) et connaître les consommations (télé-relevé des compteurs domestiques) apporte une grande quantité de données qui, une fois validées, aident à la prévision de la demande (fuites et consommations) par zone de distribution et son utilisation pour prédire et optimiser les actions à mener dans un horizon de quelques heures à quelques jours pour des pas de temps de plus en plus fins.

Dans le même temps, la miniaturisation des systèmes d'acquisition et leur capacité à transmettre leurs informations sans support filaire augmentent la capacité d'auscultation en temps réel de l'état hydraulique du système (débit, pression, commande) et de l'état qualitatif de l'eau (conductivité, chlore libre, température). Grâce à ces mesures, il est possible de déclencher des alarmes en

cas de comportement anormal (algorithmes d'apprentissage et analyse en composantes principales), mais il est aussi possible de les utiliser pour piloter, au plus près des besoins, les installations, comme par exemple ajuster la pression au minimum nécessaire pour desservir correctement les abonnés tout en limitant le niveau de fuites (Elhay *et al.*, 2015).

Pour satisfaire à des critères comme le temps minimal de détection, la maximisation de la probabilité de détection ou encore la minimisation du volume consommé, il est fait appel à des algorithmes de positionnement d'équipements protégeant au mieux les usagers et le système. Lorsqu'une alarme est activée, il est nécessaire de prendre les contre-mesures qui s'imposent ; celles-ci peuvent être simulées avant application, de même que l'impact prédit d'une pollution en fonction de ces actions.

Au sein de l'unité de recherche « Environnement, territoires et infrastructures » d'Irstea, l'équipe GPIE (Gestion patrimoniale des infrastructures liées à l'eau) développe des logiciels de simulation de régime permanent et d'aide au dimensionnement et à la gestion des réseaux d'eau sous pression (Porteau avec ses modules Opointe, Zomayet, Qualité-Thermic). Ils sont à la base des outils utilisés pour les recherches sur la sécurité et la gestion en temps réel d'événements anormaux.

Le projet SecurEau (<http://www.secureau.eu/>) qui s'est déroulé de 2009 à 2013 a permis :

- de tester de nombreux produits polluants chimiques, biologiques et radiologiques ou nucléaires (CBRN) et leurs interactions avec les canalisations et les désinfectants ;
- de développer des capteurs rapides et peu chers pour la qualité (chlore, conductivité, température, pression) dans le but d'équiper de nombreux points de surveillance des réseaux ;
- de développer des algorithmes de positionnement de ces capteurs pour divers objectifs de protection.

Dans sa continuité, le projet SMaRT-Online^{WDN} (figure 2) a complété les travaux de SecurEau pour :

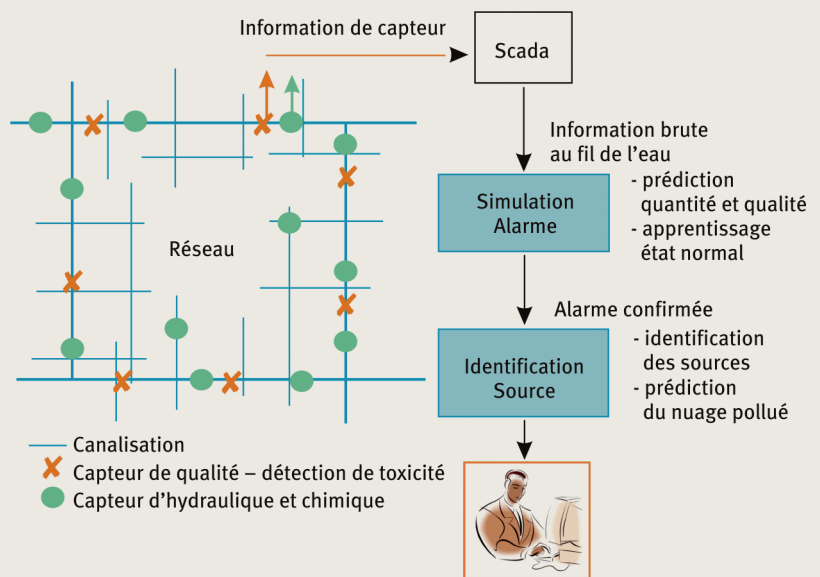
- gérer en temps réel les données issues des mesures ;
- apprendre le comportement « normal » du système ;
- déclencher des alarmes en cas de dépassement de seuils ;
- simuler les impacts prévisibles tout en traçant la ou les sources de provenance potentielles.

L'utilisation des outils de gestion et de surveillance en temps réel va trouver son extension dans la meilleure connaissance des systèmes, par des calages fins et répétés des paramètres des modèles hydrauliques (état de surface des canalisations impactant la perte de charge, évolution des caractéristiques des pompes) et des modèles de qualité (loi de décroissance du chlore, évolution de la turbidité). Ces évolutions participeront ensuite aux critères de décision pour le renouvellement des installations et la définition des plans d'actions de lutte contre les pertes, tout en donnant des indications sur le dimensionnement (figure 3).

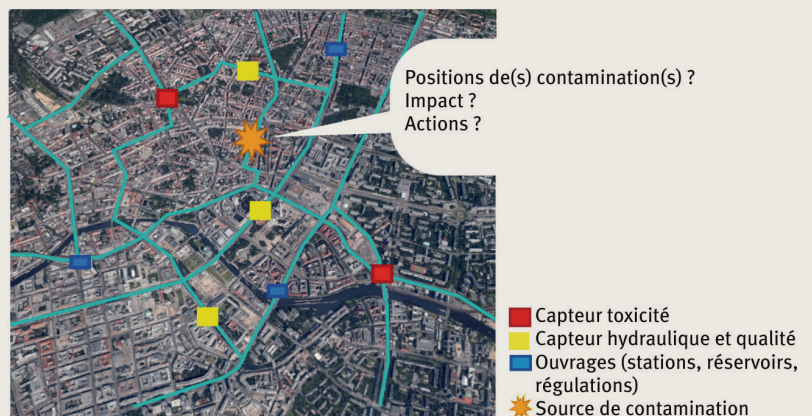
La modélisation participe à l'amélioration de la connaissance des données patrimoniales par son exigence en paramètres devant être renseignés correctement.

De nombreux systèmes d'information géographique (SIG) comprennent le tracé des réseaux, mais n'ont été renseignés qu'à des fins, au pire de simples plans, au mieux de gestion patrimoniale des conduites. Le calcul hydraulique et ensuite de la qualité demandent à ce que le graphe du réseau soit conforme à la circulation de l'eau et que les paramètres agissant sur le calcul de perte de charge soient exacts, sous peine de résultats faux. En premier lieu, le simple fait de transférer les données vers les modèles permet de détecter des non-conformités de graphe comme une antenne non connectée par un té sur une canalisation principale mais simplement « dessinée » en superposition (pas de nœud de connexion avec trois conduites). En second lieu, le calcul va détecter les anomalies de diamètres (vanne représentée par un petit linéaire de diamètre non renseigné et convertie en une donnée bloquante). Enfin, le calage permettra de repérer les anomalies de charge, ou de sens de circulation (maille ouverte au niveau de conduite « mal accrochée »).

2 Concept général de SMaRT-Online^{WDN}



3 En cas de contamination toxique du réseau d'eau potable, l'opérateur sera assisté d'un outil de gestion de ce type d'événement.



► Réseaux d'assainissement

Les systèmes d'assainissement sont dimensionnés de manière à atteindre *a minima* les performances définies dans l'arrêté du 21 juillet 2015 (entrant en vigueur à compter du 1^{er} janvier 2016). Il revient alors au maître d'ouvrage de mettre en place un dispositif d'auto-surveillance adapté à la taille de l'unité de traitement sur lequel s'appuie le service en charge du contrôle pour établir la conformité de l'installation. Ainsi, sur la base des débits journaliers sont établis le calcul des flux entrée-sortie, les rendements, les situations inhabituelles (fortes pluies) avec dépassement des capacités hydrauliques de la station. Au-delà de cet aspect réglementaire, il faut ajouter que le suivi des débits est un apport indispensable à l'exploitant pour la gestion au quotidien de la station d'épuration, au niveau des installations de prétraitements (injection de réactifs), de l'asservissement des débits de recirculation...

À plus long terme, les chroniques de débits en entrée des ouvrages de traitement sont nécessaires au dimensionnement de nouveaux ouvrages, à la réhabilitation des stations ou au suivi de l'efficacité des politiques de réhabilitation du réseau. Disposer de chroniques pluriannuelles des débits entrants journaliers permet en effet de modéliser ces derniers dans le cadre théorique de l'analyse statistique des séries temporelles. Les débits entrants sont à cet effet mis en relation avec les données météorologiques journalières de pluviométrie et d'évapotranspiration obtenues auprès de la station de Météo France la plus proche du bassin versant concerné. Ces données permettent de caler localement un modèle estimant la hauteur de la nappe phréatique. Comme illustré par la figure 4, le débit journalier entrant en station peut alors être décomposé en :

- une part dite d'« eau claire parasite météorique » (ECPM) directement proportionnelle à la pluie du jour, supposée due principalement aux branchements non conformes collectant des eaux pluviales de toitures ;
- une part dite « eau claire parasite phréatique » (ECP) fonction de la hauteur de la nappe, causée par l'inétanchéité des collecteurs qui drainent alors celle-ci, et modulée par un effet annuel ;

- une part d'eau usée stricte, estimée en retranchant du débit entrant mesuré les deux parts précédentes, et modulée par des effets annuel (baisse tendancielle de l'eau potable consommée, et donc de l'eau usée rejetée, évolution démographique), saisonnier (vacances scolaires influant sur l'occupation des logements) et hebdomadaire (variation de la consommation d'eau selon le jour de la semaine).

L'estimation de l'effet des années concernées par la série temporelle sur le terme ECPP permet d'apprécier l'incidence des travaux de rénovation des collecteurs, sensible après 2002 sur la figure 4.

Conclusions

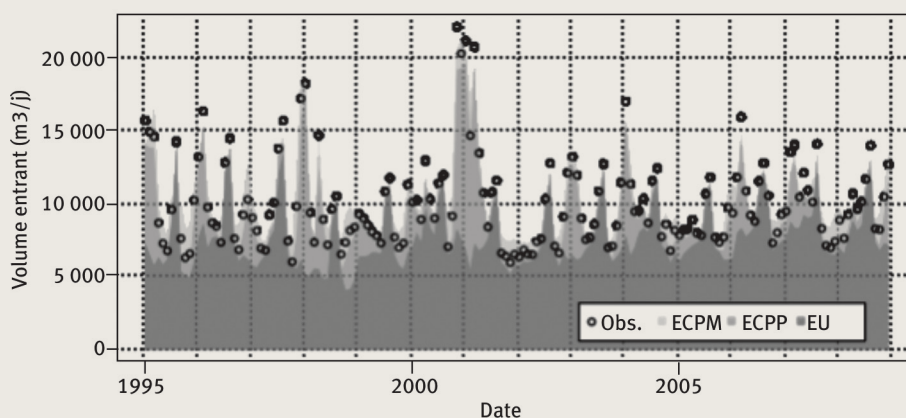
Nous avons décrit les principes et modalités d'exploitation en temps réel des ouvrages de stockage et de transport de l'eau, en mettant délibérément l'accent sur :

- les aspects liés à la sécurité des personnes pour le domaine des barrages et des digues ;
- les objectifs d'optimisation de la gestion des ouvrages pour les réseaux d'alimentation en eau potable et les réseaux d'assainissement.

Cela amène à densifier les réseaux de mesures grâce à une nouvelle génération de capteurs, le plus souvent télétransmis. Ces modalités de gestion amènent à collecter et exploiter de grandes quantités de données qui nécessitent des méthodes et outils spécifiques pour leur archivage et leur analyse. Cet aspect est développé dans l'article « Collecter, formaliser, qualifier et stocker les données pour gérer les patrimoines » (pages 80-85 de ce même numéro).

Nous avons montré que le suivi en temps réel participait aux objectifs d'optimisation de la gestion et de sécurité des personnes, et qu'il pouvait aussi permettre d'optimiser les investissements de grosse maintenance et de modernisation des ouvrages, rejoignant en cela les aspects développés dans l'article « Méthodes de programmation à court terme des travaux d'entretien et de rénovation du patrimoine » (pages 62-69 de ce même numéro). ■

4 Séries temporelles des volumes entrants observés (Obs.) entre 1995 et 2008 sur la station de Biganos (Gironde), décomposés en parts météorique (ECPM), phréatique (ECP) et usée (EU) – d'après Le Gat (2014).



Les auteurs

Paul ROYET et Huguette FÉLIX

Irstea, UR Recover, 3275 Route de Cézanne,
CS 40061, F-13182 Aix-en-Provence Cedex 5, France

✉ paul.royet@irstea.fr

✉ huguette.felix@irstea.fr

**Denis GILBERT, Olivier PILLER,
Yves LE GAT et Alain HUSSON**

Irstea, UR ETBX, centre de Bordeaux
F-33612 Cestas Cedex, France

✉ denis.gilbert@irstea.fr

✉ olivier.piller@irstea.fr

✉ yves.legat@irstea.fr

✉ alain.husson@irstea.fr

EN SAVOIR PLUS...

✉ ROYET, P., HOONAKKER, M., FÉLIX, H., 2012, *Les mesures d'auscultation : principes et outils – le rapport d'auscultation*, Colloque CFBR « Auscultation des barrages et des digues – Pratiques et perspectives », nov. 2012, Chambéry, 16 p. http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/col2012-2-01-mesures_d_auscultation-principes_et_outils.pdf

✉ DEGOUTTE, G., CRUCHON, P., LE DELLIU, P., MONIÉ, N., ROYET, P., 2009, *Nouvelle réglementation française concernant la sécurité des barrages et des digues*, 22^e Congrès CIGB, Brasília, mai 2009, Q91.

✉ LE GAT, Y., DROUILLARD, M., COUALLIER, V., LECLERC, C., 2014, *Estimation des ECP en réseau séparatif*, Congrès SHF, Bordeaux, 19-20 mars 2014.

✉ ELHAY, S., PILLER, O., DEUERLEIN, J., SIMPSON, A.R., 2015, A Robust, Rapidly Convergent Method that Solves the Water Distribution Equations for Pressure Dependent Models, *Journal of Water Resources Planning and Management*, Accepté.