

## Gestion opérationnelle des transports d'eau dans les canaux et les rivières

**Les canaux d'irrigation ont permis le développement de l'agriculture, mais aussi l'alimentation en eau pour l'industrie et les ménages. Après un rappel historique de leur développement, de leur importance stratégique et des évolutions récentes, les auteurs nous démontrent ici la nécessité d'une gestion efficace et moderne des transports d'eau, afin d'économiser la ressource prélevée au milieu naturel.**

### Historique

Des vestiges de canaux d'irrigation datant de plusieurs millénaires ont été découverts dans diverses régions du monde : en Mésopotamie (plus de huit mille ans), en Jordanie et en Égypte (plus de cinq mille ans), au Sri Lanka (plus de quatre mille ans). Ces constructions ont été concomitantes avec le développement de l'agriculture, pour l'approvisionnement en denrées des grandes cités en émergence (Rapport UNEP, 2000).

Les procédés de conception et de gestion de ces ouvrages étaient déjà très sophistiqués pour l'époque. Les Romains concevaient leurs ouvrages, il y a plus de deux mille ans, en tenant compte de règles de priorités pour les divers usages collectifs ou individuels (eau potable, fontaines, thermes publics, bassins, latrines, etc.). Les hauteurs des prises dans les aqueducs et les sections des conduites étaient réglées et dimensionnées pour gérer ces priorités, ainsi que les débits alloués aux divers usages, en fonction de la disponibilité en eau (Leveau, 2006). En particulier, les usages collectifs étaient prioritaires par rapport aux usages individuels. L'aqueduc du Pont du Gard a une pente moyenne de 25 cm par km (minimum : 8 cm/km et maximum : 45 cm/km), sur une longueur de 50 km, ce qui représente des prouesses technologiques à une époque où n'existaient ni les GPS différentiels ni les théodolites lasers (photo ①).

Plus récemment, des inventeurs et ingénieurs ont perfectionné ces techniques mêlant génie civil et hydraulique pour la conception, la construction ou la gestion de ces ouvrages pour l'irrigation, mais aussi pour l'utilisation de la force hydraulique, l'alimentation en eau des cités ou la navigation (Léonard de Vinci au quinzième siècle, Pierre-Paul Riquet au dix-septième siècle).

En France, certains canaux d'irrigation avaient été construits dès la fin du dix-neuvième siècle afin de lutter contre le Phylloxéra (ex. : Canal de Gignac construit entre 1870-1890). Au milieu du vingtième siècle, des aménagements importants ont été créés dans un but d'aménagement du territoire et de développement économique (sociétés d'aménagement régional : SCP – Société du Canal de Provence, Groupe BRL, CACG – Compagnie d'aménagement des coteaux de Gascogne) avec des canaux d'irrigation qui sont encore actuellement les plus grands de France et aux techniques de gestion les plus sophistiquées.

Les projets en cours d'étude ou de réalisation en France sont plus rares, mais existent quand même, comme le projet Aqua-Domitia, pour alimenter en eau et sécuriser le sud-ouest du Languedoc-Roussillon. On peut remarquer que ce dernier projet est en conduite sous pression, pour des raisons techniques et économiques qui seront évoquées dans cet article. Ces projets sont devenus de plus en plus politiques, du fait de la pression sur la ressource disponible, des conséquences sur les populations et les milieux naturels et d'enjeux stratégiques (ex. : abandon du projet de liaison Nîmes- Barcelone). Mais, si les projets de construction de nouveaux réseaux sont rares en France, ceux de modernisation ou de réhabilitation sont très nombreux pour faire face aux nouvelles contraintes imposées aux deux extrémités de ces réseaux : la ressource de plus en plus rare à leur amont et les usages de plus en plus nombreux et exigeants à leur aval (ex. : canal de Gignac, de Saint-Martory, de Saint Julien, etc.).

Actuellement, en moyenne dans le monde, l'eau prélevée dans le milieu naturel est utilisée à 80 % pour l'irrigation. La grande majorité de cette eau (encore



📌 Le pont du Gard est l'aqueduc romain le plus haut : une construction datant de deux mille ans, reflet de la grande maîtrise technique des Romains.

environ 80 %) est transportée par des canaux à surface libre, le restant provenant de pompages dans les nappes souterraines. Ces nombreux réseaux de canaux d'irrigation, anciens ou récents, ont une importance stratégique énorme en lien avec l'activité économique, dont la production agricole, l'emploi des populations rurales et parfois de filières industrielles aval, l'alimentation des populations locales ou l'exportation :

- au Pakistan, le plus grand périmètre irrigué d'un seul tenant au monde (16 millions d'hectares dans la vallée de l'Indus) génère 90 % de la production agricole nationale grâce à 61 000 km de canaux primaires et secondaires, 1,6 millions de km de canaux tertiaires et quaternaires ;
  - au Maroc, les périmètres irrigués ne représentent que 10 % de la surface agricole utile, mais ils contribuent pour 45 % (année moyenne) à 70 % (année sèche) à la production agricole nationale. Ils génèrent également 33 % de l'emploi rural et 75 % des exportations agricoles.
- La fin du vingtième siècle a connu, globalement dans le monde, un ralentissement relatif de l'investissement dans de nouveaux canaux. Les raisons sont en partie liées à des préoccupations environnementales croissantes et au constat que les aménagements existants fonctionnaient en deçà des prévisions. L'accent fut mis sur la réhabilitation ou la modernisation de réseaux existants et l'étude des raisons techniques, politiques, sociologiques et économiques de ces sous-performances (création de l'IIMI – *International Irrigation Management Institute* – en 1984 ; Kuper, 2011). Mais on assiste actuellement à la construction de nouveaux canaux d'irrigation dans de nombreuses régions du monde, aux dimensions parfois pharaoniques. Ceci est lié aux demandes croissantes et souvent préoccupantes des divers usagers (agricoles, urbains, industriels) : Chine (*South to North transfer canals*, quatre canaux d'environ 300 m<sup>3</sup>/s chacun), Inde

(Narmada, 1 133 m<sup>3</sup>/s), Vietnam, Soudan, Égypte, etc. Les bailleurs de fond nationaux et internationaux participent au financement de ces nouvelles constructions ou réhabilitations devant le constat que, sans cela, les famines seront de plus en plus nombreuses et fréquentes. Les enjeux présents et futurs sur la gestion de l'eau n'ont en particulier sur les réseaux de transport d'eau n'ont en effet jamais été aussi importants. En se limitant aux enjeux alimentaires, on peut évoquer les objectifs de la FAO (*Food and Agriculture Organization*) pour 2030 qui fixent une augmentation de 80 % de la production agricole mondiale, mais avec une contrainte sur la mobilisation de nouvelles ressources en eau qui ne pourra pas dépasser + 12 %. Les experts en alimentation de l'Organisation des Nations-Unies et de la Banque mondiale préconisent un « investissement massif dans le domaine de l'agriculture pour augmenter et sécuriser la production alimentaire afin de satisfaire la demande mondiale et d'enrayer l'augmentation du prix des denrées alimentaires ».

Mais ces nouveaux canaux sont conçus de manières très différentes de tous ceux antérieurs au milieu du vingtième siècle : ils sont équipés d'ouvrages automatisés ou automatisables. Cela autorise une régulation par l'aval pouvant offrir des performances hydrauliques, une qualité de distribution, une sécurité des infrastructures et une évolutivité excellentes (cf. article de Malaterre *et al.*, page 44 de ce même numéro). Leur futur succès espéré ne dépend pas uniquement de cela, mais c'en est une condition *sine qua non*. Une étude réalisée en Australie (Queensland) a évalué et comparé diverses options pour réduire la consommation en eau sur les grands périmètres irrigués du *Goulburn Murray System*. La conclusion de cette étude est que l'automatisation des canaux d'irrigation a le plus fort potentiel d'économies en terme de volumes et pour un coût unitaire (au m<sup>3</sup>) le plus faible.

### ► Systèmes hydrauliques concernés

Les systèmes évoqués dans le chapitre précédent et les objets principaux étudiés dans cet article sont principalement les canaux d'irrigation. Cela est lié au fait que ces canaux d'irrigation sont les plus gros préleveurs d'eau du milieu naturel vers leurs divers usages anthropiques. Par ailleurs, ces canaux sont équipés de nombreux ouvrages de régulation (manuels historiquement ou automatiques plus récemment) qui en font des systèmes sur lesquels on peut agir. Même si les méthodes de gestion de ces ouvrages ainsi que les technologies mises en œuvre ont beaucoup évolué (principalement au cours des cinquante dernières années), ces canaux d'irrigation ont toujours été conçus pour être gérés.

Mais les canaux dont les usagers sont exclusivement des agriculteurs sont de plus en plus rares. La ressource d'eau brute intéresse effectivement également les usagers industriels (ex. : fermes aquacoles, fabricants de spiruline, caves coopératives, papeteries, pétrochimie, refroidissement de centrales, etc.) et urbains (communes pour l'eau potable et la sécurité incendie, lotissements pour les jardins, piscines, lavage de voiture, etc.). L'urbanisation croissante, voire galopante autour des grandes villes, accentue ce phénomène. Ainsi, le canal de Provence distribue son eau à parts égales entre ces trois familles d'usagers. Le canal de Gignac, situé à trente minutes de Montpellier, a vu ses usagers urbains et industriels s'accroître de manière très importante (actuellement, les surfaces agricoles sont encore majoritaires, mais en nombre d'usagers, les urbains sont majoritaires). Ces évolutions ont des conséquences importantes pour les gestionnaires de ces réseaux, tant sur les aspects sociaux, politiques, économiques que techniques. On comprend facilement que la demande en eau d'un urbain sera très différente de celle d'un agriculteur, avec des quantités moindres mais des fluctuations importantes, avec des pics de consommation les soirs et les week-ends. Cela complique la gestion. Mais, en revanche, les usagers industriels et urbains peuvent apporter des ressources financières permettant d'assurer la pérennité de ces réseaux, dans un contexte agricole parfois très difficile.

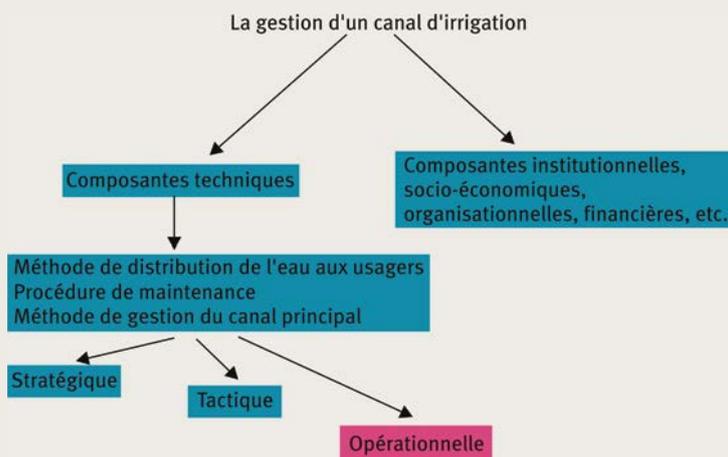
Certains cours d'eau (rivières, fleuves) sont également l'objet, depuis des périodes bien plus récentes, de ce que l'on peut appeler une « gestion opérationnelle » à un sens qui sera explicité plus bas. Pour cela, il faut qu'ils soient équipés de barrages de stockage ou d'ouvrages de régulation. On peut citer, par exemple, les rivières réalimentées par des barrages dans le système Neste (gérés par la CACG, pour des usages irrigation et soutien d'étiage) et le Rhône (géré par la CNR – Compagnie nationale du Rhône, pour des usages de production hydroélectrique et de gestion de la navigation et des crues). Il y a également parfois des systèmes couplés mixtes rivières et canaux, comme le système Durance (le fleuve Durance et son canal, pour des usages irrigation, production hydroélectrique et environnementaux, avec en particulier l'étang de Berre).

Les concepts de gestion présentés dans cet article sont globalement utilisables pour la gestion de ces différents types de réseaux de transport d'eau (plus ou moins propre, plus ou moins rare). Les conditions sont que ce transport se fasse dans des réseaux à surface libre et qu'il existe des ouvrages (barrages, vannes, seuils, pompes, etc.) pour pouvoir exercer une action sur ces systèmes. En effet, dans les réseaux en conduites fermées, les problématiques sont relativement différentes et les problèmes de gestion sont plus simples à résoudre. Ainsi, les systèmes de type voies navigables (ex. : canal du Midi ou de la Marne), aménagements hydroélectriques (ex. : Rhône, Durance), stations d'épuration (ex. : station d'Achères), réseaux d'assainissement, stades d'eau vive, réseaux de drainage (Wateringues au nord de la France et en Belgique, canaux aux Pays Bas) présentent des similitudes. Les similitudes entre ces problématiques, liées à l'analyse de la gestion opérationnelle de ces systèmes hydrauliques à surface libre, sont attestées par le fait que tous ces types de systèmes ont été modélisés et étudiés à l'aide du logiciel SIC<sup>2</sup> développé à Irstea Montpellier (cf. article de Dorchies *et al.*, page 48 de ce même numéro).

### Différents types et niveaux de gestion

Les gestionnaires des systèmes hydrauliques à surface libre, comme ceux évoqués ci-dessus, doivent s'acquitter de nombreuses tâches (figure 1). Ainsi pour eux, le terme de gestion peut vouloir dire beaucoup de choses de natures différentes. On peut ainsi distinguer des composantes institutionnelles, socio-économiques, organisationnelles, financières, dont nous ne parlerons pas ici, et des composantes plus techniques liées à la gestion des ouvrages hydrauliques. À l'intérieur même de ces composantes techniques, on peut distinguer les activités liées à la distribution de l'eau aux usagers (au niveau des canaux secondaires, tertiaires et des prises), aux procédures de maintenance (des canaux, siphons, dégrilleurs, vannes, seuils, capteurs, automates, etc.), et enfin à la gestion qui nous intéresse le plus ici, qui est celle du ou des canaux principaux et de leurs ouvrages. Ces canaux sont les adducteurs principaux dans les périmètres irrigués, et sont caractérisés par leur dimension et par le fait qu'ils sont généralement en eau tout au long de la saison d'irrigation. Sur le canal de Gignac, ces canaux principaux sont constitués du tronc commun et des deux canaux rive droite et rive gauche (pour une longueur

#### 1 Les différents types de gestion d'un canal d'irrigation.



totale d'environ 50 km), avec des débits de l'ordre de 1,5 à 4 m<sup>3</sup>/s. Sur les gros canaux d'irrigation, évoqués en introduction, ces débits peuvent aller jusqu'à plusieurs dizaines (BRL, SCP en France), centaines (South to North transfer en Chine, Fordwah au Pakistan), ou plus de 1 000 m<sup>3</sup>/s (Narmada en Inde). Une des conséquences de cette taille, et ce qui justifie qu'on va se focaliser sur la gestion de ces canaux, est qu'il est difficilement envisageable de les remplacer par des réseaux sous pression (en conduites fermées), et que pour autant leur importance stratégique pour l'ensemble du périmètre justifie qu'on s'intéresse à leur automatiser. L'idée est d'en faire des tuyaux « virtuels », c'est-à-dire que ce ne sont pas de vrais tuyaux, mais qui fonctionnent comme des tuyaux : ils fournissent l'eau lorsque les robinets sont ouverts (ex. : augmentation de la demande) et ils ne débordent jamais (ex. : diminution de la demande, débit maximum). Au-delà de quelques m<sup>3</sup>/s, il est difficile, voire impossible techniquement (actuellement la limite technique est d'environ 10 à 20 m<sup>3</sup>/s) et plus coûteux (actuellement le seuil est de l'ordre de 2 m<sup>3</sup>/s) de faire un gros tuyau plutôt qu'un canal à surface libre. Le projet Aqua-Domitia (pour lequel la solution tuyau a été choisie) est de l'ordre de grandeur de cette limite économique.

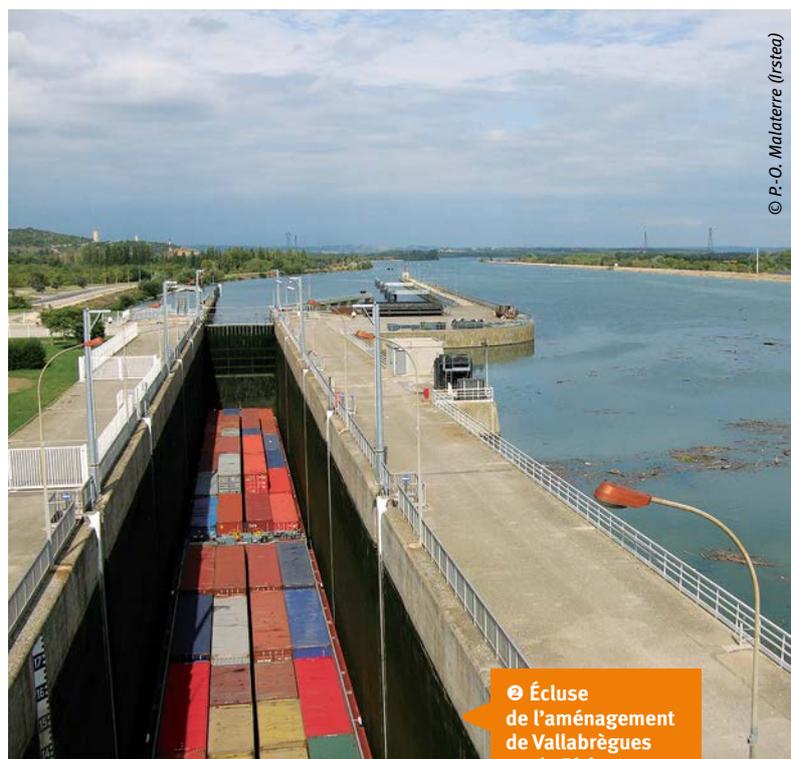
La gestion de ces canaux principaux peut elle-même être divisée en trois niveaux de gestion : stratégique, tactique, opérationnelle (ou temps réel). Ces terminologies proviennent du domaine de la gestion industrielle, et s'appliquent donc à tous les procédés de fabrication, quels qu'en soient les objets produits (voitures, ordinateurs, etc.).

### Gestion stratégique

En gestion industrielle, on utilise la notion de « gestion stratégique », qui correspondrait, dans notre cas, au choix de conception, d'emplacement et de dimensionnement des infrastructures (construction de barrages, d'ouvrages, etc.) afin d'atteindre les objectifs présents et futurs des aménagements. Le pas de temps de cette gestion stratégique est de quelques années à quelques dizaines d'années : dimensionnement et aménagement : comment construit-on le réseau ? Où prend-on la ressource ? Quel gabarit de canal ? Quelles réserves en ligne ? Pour quels usages ? Comment distribuera-t-on l'eau ?... Par exemple, l'étude d'une seconde alimentation du canal de Gignac par le barrage du Salagou est du niveau de cette gestion stratégique. L'extension du canal Philippe Lamour (BRL) avec le projet Aqua-Domitia en est également un exemple.

### Gestion tactique

La « gestion tactique », ou programmation d'allocation de l'eau, concerne le système global : ressource, canaux, et usagers. Elle consiste à définir une tactique d'allocation de l'eau en fonction des ressources disponibles, des besoins éventuellement affectés de priorités, des contraintes techniques liées à l'infrastructure existante (Parent, 1991) et des contraintes de programmation liées à la méthode de distribution choisie. Son pas de temps est de l'ordre de la semaine à quelques mois. En cas de pénurie ou de restriction (arrêtés sécheresse), on va modifier la manière de distribuer l'eau aux usagers, modifier le tour d'eau, modifier les temps ou les durées d'arrosage, modifier les débits autorisés, etc.



Écluse de l'aménagement de Vallabrègues sur le Rhône.

© P.-O. Malaterre (Iristea)

### Gestion opérationnelle

La « gestion opérationnelle », ou gestion temps-réel, ou régulation, concerne le canal d'irrigation et ses ouvrages. Elle vise à satisfaire les objectifs de distribution définis par la gestion tactique avec les moyens (infrastructures, réserves) rendus disponibles par les choix de la gestion stratégique. Son pas de temps varie généralement de quelques minutes (ex. : 100 s sur les ouvrages du Rhône gérés par la CNR – photo ② – quelques secondes à quelques minutes pour des algorithmes locaux ou globaux implémentés ou testés sur le canal de Gignac, 15 mn pour le canal de la SCP, etc.) à quelques heures (ex. : une heure pour les lâchures des barrages ou du canal de la Neste gérés par la CACG), voire très rarement quelques jours (cf. Niger avec l'algorithme Bival développé par la Sogreah avec radio transmission d'une mesure de niveau).

Par la suite, pour simplifier la terminologie employée, le terme de gestion s'appliquera à cette gestion opérationnelle, qui est l'objet principal de cet article, comme indiqué dans son titre. Afin d'assurer une gestion correcte aussi bien dans l'espace que dans le temps, le gestionnaire a la charge de manœuvrer les ouvrages mobiles implantés le long du canal dont il est responsable. Ces vannes, seuils, ou pompes permettent de modifier des pertes de charge locales, et par conséquent de contrôler indirectement les niveaux, débits ou volumes d'eau dans le canal. Les contraintes relatives aux méthodes de régulation sont fréquemment évoquées dans la littérature (Goussard, 1993 ; Plusquellec *et al.*, 1994). En particulier, certaines méthodes nécessitent des berges horizontales sur la totalité ou une partie de chaque bief, alors

► que d'autres sont compatibles avec des berges parallèles au fond du canal, avec des conséquences sur les coûts en génie civil. En outre, ces méthodes de régulation ont des impacts différents selon qu'il existe ou non des volumes de stockage intermédiaires (possibilité ou non de répondre rapidement à des demandes imprévues, en attendant que l'eau arrive de l'amont).

Les problématiques concernées par cette gestion, principalement opérationnelle, mais également tactique et stratégique ont été souvent uniquement quantitatives : comment distribuer de l'eau en quantités, instants et durées satisfaisantes pour les usagers concernés, compte tenu de contraintes sur la ressource, les réseaux, et la main d'œuvre. Mais, récemment, et de plus en plus, ces problématiques de gestion concernent également les aspects qualitatifs : comment éviter, limiter ou gérer les développements d'algues (cf. article de Belaud *et al.*, page 50 de ce même numéro) ou les dépôts de sédiments ? Comment réagir face à une pollution accidentelle (ex. : un avion d'épandage avec 800 litres d'un mélange contenant 90 litres d'insecticide s'écrase dans le canal BRL Philippe Lamour, le 8 juin 2012, source : S. Barbier, Midi-Libre) ?

Par ailleurs, même si les problématiques étudiées sont principalement liées à des contextes de pénurie, les dimensions épisodes pluvieux et crues sont également prises en compte, pour sécuriser les réseaux, ses ouvrages et ses riverains, ainsi que la manière de faciliter les évacuations des eaux pluviales. Enfin, les externalités positives (aménités) des canaux d'irrigation sont également de plus en plus intégrées dans les objectifs de gestion (ex. : Crau avec recharge de nappes, végétation ripisylve, haies, biodiversité, etc.).

### Apports des concepts issus de la gestion industrielle

Un canal d'irrigation peut être considéré, au-delà de son esthétisme, comme un système de production, au même titre qu'une usine de fabrication de voitures, de chaussures ou de biscuits (Rey, 1996). Cette vision permet d'utiliser les concepts développés par les chercheurs en gestion industrielle (ex. : Centre de gestion scientifique de l'École nationale supérieure des Mines de Paris).

L'analogie, entre un canal d'irrigation et un système de production, conduit à définir le produit considéré comme un hydrogramme, c'est-à-dire un débit fonction du temps  $Q(t)$ , éventuellement associé à des qualités physico-chimiques données. Le catalogue de produits est décliné selon quatre critères :

- le produit hydrogramme (ex. : un débit de 25 l/s pendant 24 h, un débit de 50 l/s pendant 10 h),
- le mode d'accès à l'eau (ex. : une prise gravitaire, une alimentation sous pression à 12 bars),
- les contraintes sur la commande (ex. : faire une demande trois jours à l'avance, respecter le calendrier d'arrosage mis au point en début de saison d'irrigation),
- les contraintes sur les séries de commande (ex. : refaire une nouvelle demande pour chaque arrosage, faire une commande pour tous les arrosages du mois à venir).

Une fois cette analogie établie, les concepts utilisés pour les systèmes de production peuvent être appliqués aux

canaux d'irrigation. Une quinzaine de concepts sont généralement retenus, dont les principaux et les plus pertinents dans notre cas sont :

- matière première et approvisionnement (ressource, barrage, pompage, etc.),
- moyens de production/processus de fabrication (infrastructure, moyens humains, etc.),
- machines (régulateurs, vannes, seuils, etc.),
- stock (réservoirs tampon, stockage dans les biefs, etc.),
- commande (à la demande, au tour d'eau, etc.),
- flux (flux tirés ou également flux tendu, *i.e.* déclenchés par la commande, que l'on appelle aussi communément dans notre cas des canaux la « régulation par l'aval » ; flux poussés, *i.e.* plan de production déterminé en fonction de prévision de vente, que l'on appelle aussi dans notre cas « régulation par l'amont »),
- planification et ordonnancement (règle de distribution, manœuvre des vannes, seuils, etc.).

La notion de flux est très importante. Elle correspond exactement à la notion de régulation ou commande par l'amont (flux poussés) ou par l'aval (flux tirés, flux tendu, juste-à-temps). Elle est directement corrélée à tous les autres concepts (commande, planification, machines, etc.). En particulier, une production à flux tirés est bien adaptée à une distribution à la demande, alors qu'une production à flux poussés est bien adaptée à une distribution au tour d'eau (dans ce cas, le calendrier d'arrosage est mis au point en début de saison d'irrigation pour les usagers). Dans les industries de pointe (automobile, électronique), les méthodes de production sont passées du flux poussé (usines Ford dans les années 1950) au flux tendu (usines Toyota dans les années 1980, usines Dell dans les années 2000). Les techniques nécessaires sont plus complexes, mais les avantages en termes de diminution des stocks, de diminution des pertes (exemplaires invendus) et d'adéquation aux besoins des usagers sont indéniables. La même évolution est en cours sur les canaux d'irrigation depuis quelques dizaines d'années (historiquement les premiers ouvrages hydrauliques permettant une telle distribution de l'eau par l'aval étaient les vannes Avis® et Avio® développées par la société grenobloise Neyrtec, au milieu du vingtième siècle, devenue ensuite Neyrpic puis Gec-Alsthom Fluide). Bon nombre de canaux en cours de modernisation et la plupart des nouveaux canaux en cours de construction, ou en projet, introduisent ces notions de régulation par l'aval (flux tirés).

### Des machines et des hommes

L'analogie avec la gestion industrielle a fait apparaître un certain nombre de concepts clefs. Les machines pour la gestion opérationnelle des transports d'eau dans les canaux et les rivières sont généralement : des vannes, des seuils fixes (ex. : bec-de-canard) ou mobiles, parfois mais plus rarement des pompes. Ces machines sont manipulées par des opérateurs manuels dans la plupart des cas des réseaux gérés de manière traditionnelle. Mais elles peuvent également être manipulées par des actionneurs, avec des algorithmes implémentés localement dans des automates programmables (PLC, *Programmable Logic Controller*) ou à distance dans des superviseurs (SCADA,

*Supervisory Control And Data Acquisition* – figure 2), et à partir de mesures acquises *in situ* en temps réel, dans le cas de réseaux modernes automatisés. Les notions d'automatisation et les contraintes et avantages associés sont explicitées dans l'article de Malaterre *et al.*, page 44 de ce même numéro).

### Machines statiques

Il ne faut pas croire que quand on parle de machines, et en ce qui nous concerne de vannes ou de seuils, il s'agit forcément d'ouvrages sophistiqués, voire même mobiles. Il existe en effet des ouvrages très simples, comme les seuils « bec-de-canard » qui sont capables de maintenir un niveau relativement constant à leur amont, et ce même en présence de variations importantes de débits. Par ailleurs, ces seuils bec-de-canard, du fait de leur principe de fonctionnement, diminuent les temps de retards le long de ces réseaux. Les inconvénients sont des risques de sédimentations à leur amont, qui peuvent être limités par l'ajout de vannes mobiles autorisant les chasses. Étant des ouvrages statiques, les problèmes sont limités au moment de leur conception, et leur gestion est très simple (voire en l'occurrence inexistante). Mais peu ou pas d'évolutions sont possibles, si par exemple on veut changer le niveau de la consigne régulée. Par ailleurs, le niveau régulé est situé à l'amont immédiat du seuil, ce qui correspond à une régulation par l'amont, avec les inconvénients que cela engendre (faible efficacité hydraulique, contrainte rigide de distribution de l'eau au tour d'eau).

### Machines dynamiques, solutions « hardware »

Afin de diminuer les inconvénients des seuils bec-de-canard évoqués précédemment, il est possible d'utiliser des ouvrages dit hydromécaniques, principalement développés au cours du vingtième siècle. Ces ouvrages fonctionnent uniquement sur des principes d'équilibres mécaniques en interaction avec l'eau (pression, poussée



3 Vanne mixte sur le canal du Tadla au Maroc.

© P.-O. Malaterre (Irstea)

d'Archimède). Ainsi, les vannes Amil® maintiennent à leur amont un niveau quasi constant. Ces vannes ont été développées dans les laboratoires Neyrtec (puis Neyrpic et Gec-Alsthom) dans les années 1930 à 1960, à Grenoble et dans leurs ateliers au Maroc et en Algérie. Des réglages permettent de faire varier un peu la consigne de fonctionnement, et les écoulements sous un tablier radial trapézoïdal évitent les problèmes de sédimentation à leur amont. Les vannes Begmann® et Vulgter® sont d'autres solutions technologiques avec des objectifs proches, de maintenir un niveau amont quasi constant.

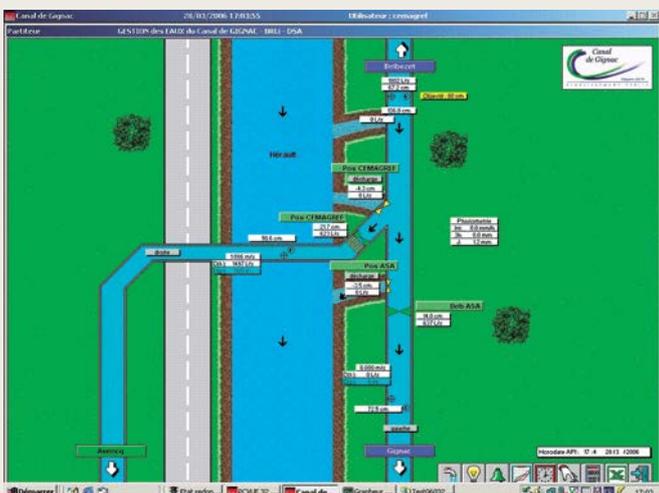
Des vannes Avis® et Avio® basées sur des principes similaires, mais pour une régulation du niveau aval ont été également développées ensuite par le même constructeur. Enfin, une vanne, appelée vanne mixte (photo 3), proposant une combinaison de ces deux fonctionnements amont et aval suivant les conditions hydrauliques, a également été mise au point.

Ces vannes sont souvent combinées avec des prises de type « modules à masques », qui ont la propriété de distribuer des débits connus et de manière assez précise (à +/- 5 % ou 10 %), même en présence de fluctuations de leur niveau d'alimentation autour du niveau nominal. L'avantage de ces ouvrages est d'être robuste, de ne pas nécessiter de capteurs, ni moteurs électriques, ni systèmes de communication. Ils ont par contre l'inconvénient d'être peu évolutifs, si par exemple les consignes de gestions changent de manières saisonnières ou définitives, et de n'autoriser que des régulations locales, c'est-à-dire sans utilisation simultanée d'informations provenant de divers points de mesures.

### Machines dynamiques, solutions « software »

Afin de surmonter les inconvénients évoqués précédemment pour les vannes hydromécaniques, la solution qui est de plus en plus utilisée est basée sur l'utilisation de vannes motorisées, pilotées de manière manuelle ou automatique (cf. article de Malaterre *et al.*, page 44 de ce même numéro) avec des algorithmes implémentés soit

2 Écran du logiciel superviseur SCADA du canal de Gignac.





④ Utilisation d'un superviseur SCADA à la Société des eaux de Marseille.

© P.-O. Malaterre (Iristea)

en local dans des automates programmes (PLC), soit à distance dans des superviseurs (SCADA, photo ④). Dans tous ces cas, des informations doivent transiter des capteurs vers les actionneurs. Diverses technologies existent pour ces différents compartiments. Le principal avantage est d'autoriser toute sorte de fonctionnement, par l'amont, par l'aval, ou mixte, en boucle ouverte ou en boucle fermée, en télécommande à distance ou en régulation automatique, algorithmes mono-variables (ex. : PID, proportionnel intégral dérivé – figure ⑤) ou multi-variables (ex. : LQG, linéaire quadratique gaussien), etc. Il y a une grande souplesse d'évolution, car l'intelligence est dans des lignes de programmation informatique, « faciles » à modifier. ■

### Les auteurs

**Pierre-Olivier MALATERRE, Jean-Pierre BAUME, David DORCHIES et Cyril DEJEAN**

Iristea, centre de Montpellier, UMR G-EAU  
Gestion de l'eau, acteurs et usages  
361 rue J.F. Breton, BP 5095  
34196 Montpellier Cedex 5

✉ [pierre-olivier.malaterre@irstea.fr](mailto:pierre-olivier.malaterre@irstea.fr)

✉ [jean-pierre.baume@irstea.fr](mailto:jean-pierre.baume@irstea.fr)

✉ [david.dorchies@irstea.fr](mailto:david.dorchies@irstea.fr)

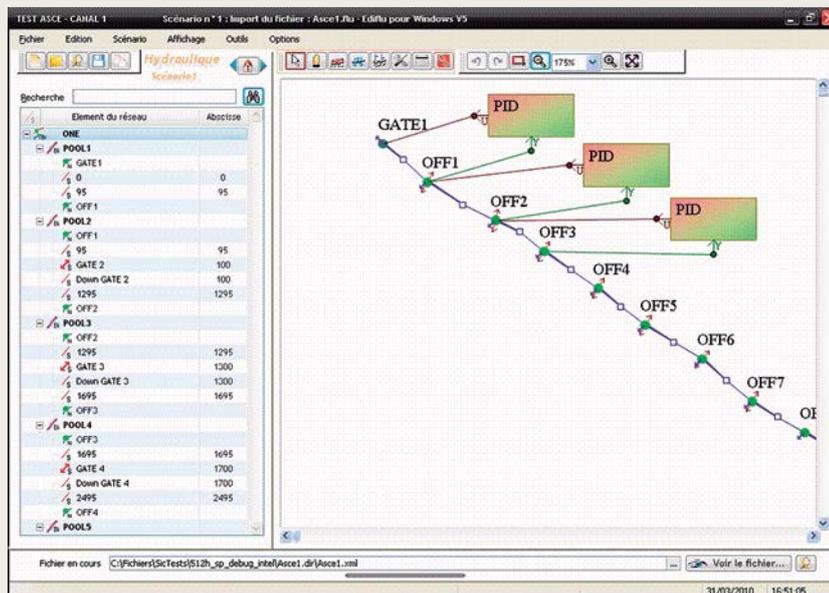
✉ [cyril.dejean@irstea.fr](mailto:cyril.dejean@irstea.fr)

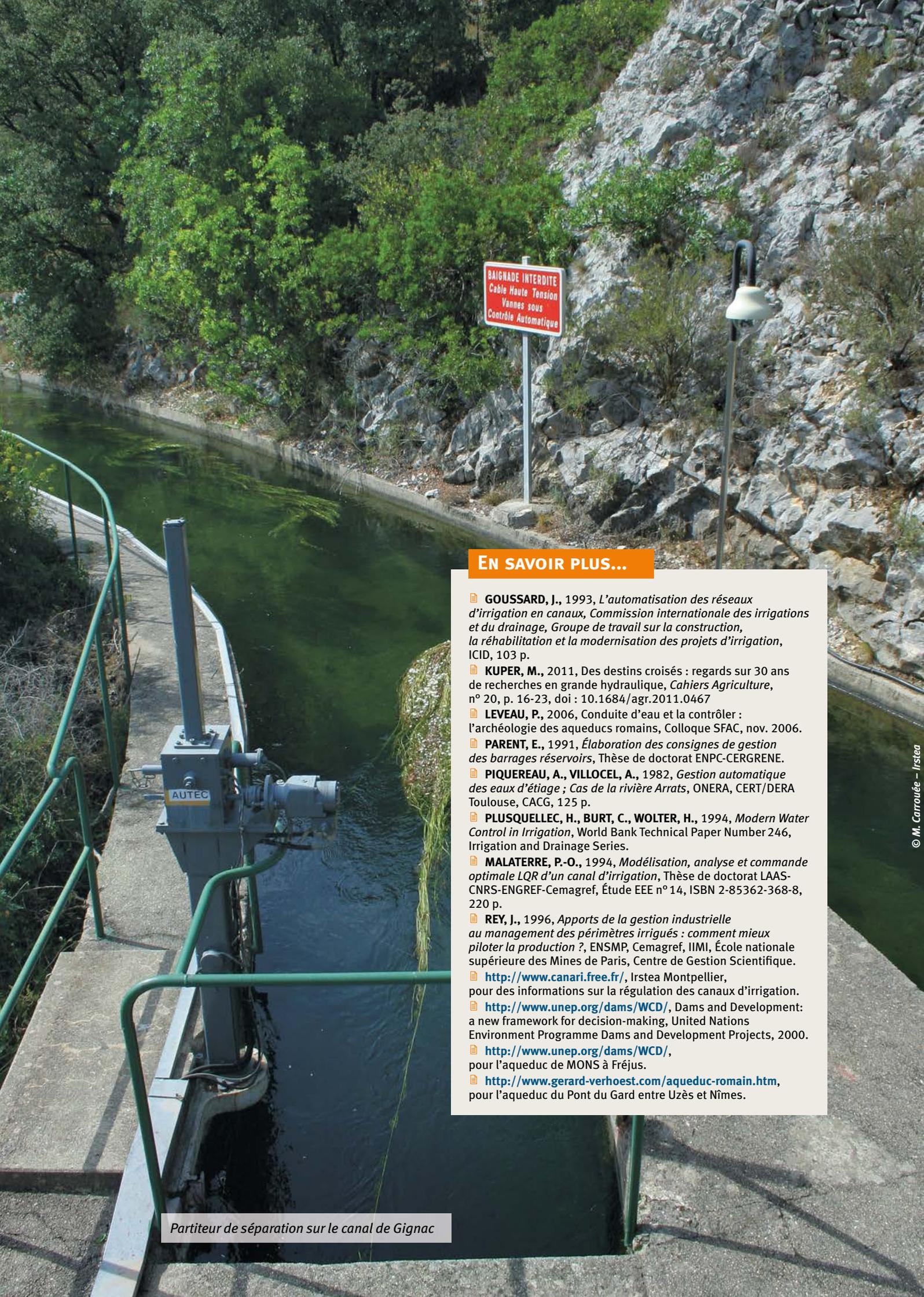
**Gilles BELAUD**

Montpellier Supagro, UMR G-eau  
Gestion de l'eau, acteurs et usages  
BP 5095, 34093 Montpellier Cedex 05

✉ [belaud@supagro.inra.fr](mailto:belaud@supagro.inra.fr)

- ⑤ Écran du logiciel SIC<sup>2</sup>, un simulateur de canaux d'irrigation développé par Iristea Montpellier permettant de mettre au point et de tester des règles de gestion.





## EN SAVOIR PLUS...

- 📖 **GOUSSARD, J.**, 1993, *L'automatisation des réseaux d'irrigation en canaux*, Commission internationale des irrigations et du drainage, Groupe de travail sur la construction, la réhabilitation et la modernisation des projets d'irrigation, ICID, 103 p.
- 📖 **KUPER, M.**, 2011, Des destins croisés : regards sur 30 ans de recherches en grande hydraulique, *Cahiers Agriculture*, n° 20, p. 16-23, doi : 10.1684/agr.2011.0467
- 📖 **LEVEAU, P.**, 2006, Conduite d'eau et la contrôler : l'archéologie des aqueducs romains, Colloque SFAC, nov. 2006.
- 📖 **PARENT, E.**, 1991, *Élaboration des consignes de gestion des barrages réservoirs*, Thèse de doctorat ENPC-CERGRENE.
- 📖 **PIQUEREAU, A., VILLOCEL, A.**, 1982, *Gestion automatique des eaux d'étiage ; Cas de la rivière Arrats*, ONERA, CERT/DERA Toulouse, CACG, 125 p.
- 📖 **PLUSQUELLEC, H., BURT, C., WOLTER, H.**, 1994, *Modern Water Control in Irrigation*, World Bank Technical Paper Number 246, Irrigation and Drainage Series.
- 📖 **MALATERRE, P.-O.**, 1994, *Modélisation, analyse et commande optimale LQR d'un canal d'irrigation*, Thèse de doctorat LAAS-CNRS-ENGREF-Cemagref, Étude EEE n° 14, ISBN 2-85362-368-8, 220 p.
- 📖 **REY, J.**, 1996, *Apports de la gestion industrielle au management des périmètres irrigués : comment mieux piloter la production ?*, ENSMP, Cemagref, IIMI, École nationale supérieure des Mines de Paris, Centre de Gestion Scientifique.
- 📖 <http://www.canari.free.fr/>, Irstea Montpellier, pour des informations sur la régulation des canaux d'irrigation.
- 📖 <http://www.unep.org/dams/WCD/>, Dams and Development: a new framework for decision-making, United Nations Environment Programme Dams and Development Projects, 2000.
- 📖 <http://www.unep.org/dams/WCD/>, pour l'aqueduc de MONS à Fréjus.
- 📖 <http://www.gerard-verhoest.com/aqueduc-romain.htm>, pour l'aqueduc du Pont du Gard entre Uzès et Nîmes.