
Vers le concept de criticité, appliqué, en géographie, aux basses eaux

Utilité pour les territoires de l'aire méditerranéenne française sous forçages anthropique et climatique

1. Introduction

L'eau et la vie sont certes inégalement réparties, mais en outre, pas identiquement réparties. Ceci entrave le développement des sociétés, faisant apparaître des situations locales de tension, dont l'intensité et la fréquence varient selon le contexte climatique et la densité des populations, donc de la demande. De surcroît, avec le changement climatique en cours et la hausse des besoins en eau (y compris la « réserve » à laisser aux milieux naturels), le niveau des tensions est susceptible de s'élever, et la fréquence des très basses eaux de s'accroître. Dans le sud-est de la France, l'aire soumise au climat méditerranéen est particulièrement concernée par la question de la fragilité des ressources en eau en période estivale, d'une part parce qu'il s'agit d'une saison très peu arrosée, et d'autre part, parce que la qualité de l'ensoleillement est telle que cette région attire (de plus en plus ?) des populations (aussi bien temporaires – tourisme – que pérennes – retraité(e)s) chaque année davantage. De plus, l'impact d'une modification du régime climatique (une diminution des apports pluviométriques, une augmentation du nombre de jours sans pluie, des extrêmes plus marqués, etc.) affectera nécessairement plus les bassins alimentés par des ressources très localisées, tels les cours d'eau situés en rive droite du Rhône (Gardon, Cèze, Ardèche, etc.), en basse Provence (Sorgues, Argens, etc.), que les bassins de vie bénéficiant de l'influence des grands fleuves allogènes à l'aire climatique méditerranéenne (Rhône, Durance, etc.).

La réflexion sur le risque de manque ou de pénurie en eau de qualité propre aux usages sur ces territoires peut dès lors être envisagée de manière classique, en combinant l'occurrence (manifestation plus ou moins rare) d'un aléa dont l'intensité est inversement proportionnelle à la fréquence, et à la vulnérabilité des enjeux (ce qui peut être endommagé ou détruit). Cependant, on peut aussi s'interroger sur la façon dont le risque se construit (physique vs anthropique ; succession des étapes, retentissement d'un facteur sur les autres, etc.), sur la façon dont l'évolution (des éléments structurels, des forçages extérieurs, etc.) conduit ou non à s'approcher d'une situation critique, dans laquelle, ou en fonction de laquelle, l'état du système producteur du risque peut lui-même être modifié. Cela renvoie à tout ce qui peut être fait, ou advenir, à partir de l'accroissement de connaissances sur ce que constitue

l'avènement d'une situation critique : équilibre dynamique, aspect technique, réglementaire, politique, etc.

Dans ce travail, nous proposons de décliner cette dernière approche particulièrement sur la question des basses eaux. Dans un premier temps, une étude du risque est menée sur les variables essentielles (pluie, débit, demande, etc.) par le biais d'une approche statistique (généralement gaussienne), à l'issue de laquelle des indicateurs robustes et synthétiques sont élaborés pour définir un état de basses eaux. Ces derniers sont ensuite mis en relation (combinaison empirique reportée sur une « cible » à 4, 8 ou 12 variables) puis (ou ?) par modélisation bayésienne, afin de déterminer l'état de tension ou de criticité en basses eaux du territoire concerné. Enfin, altération et modification de l'hydro-éco-système peuvent être abordées.

Cette triple approche sera illustrée par des exemples de traitements opérés sur des variables caractéristiques des territoires méditerranéens.

2. Aspects fonctionnels et structurels d'un anthropo-hydro-système susceptible de tensions croissantes progressives

Pour définir un état de basses eaux et la criticité (éventuelle) d'une situation de basses eaux, nous nous sommes appuyés sur les approches développées pour l'analyse des risques et les études de danger (Tixier *et al.*, 2002). Ces dernières suggèrent de décomposer le système (cadre structurel) afin d'en fixer les limites, d'en identifier les éléments structurels et de déterminer leurs liens (hiérarchie) et leur nature (flux, processus, état, etc.).

Ainsi, un état de basses eaux peut être aussi bien défini par des facteurs météorologiques (pluie, température, etc.), que par des facteurs physiographiques (topographie, géologie, etc.). Il est également influencé par la présence humaine, qui se traduit essentiellement par des prélèvements directs (pour l'usage domestique, agricole, etc.) et des modifications du milieu naturel (imperméabilisation des sols, aménagements hydrologiques, variation du niveau de qualité de l'eau, etc.).

En plus des quatre types de variables mises en évidence dans la figure 1, que l'on peut également regrouper en termes d'entrée (apports, etc.), de sortie (prélèvements, etc.) et d'état (qualité eau, etc.), le système « basses eaux » peut être complété par l'intégration de facteurs subjectifs, traduisant la perception sociale de l'état de la ressource, ce qui a un impact fort sur, par exemple : la fréquentation des sites de baignade, le déclenchement des mesures de restrictions, etc.

3. Caractérisation d'un état de basses eaux par approche gaussienne

Une fois les variables descriptives du système « basses eaux » identifiées, il faut ensuite les traduire en une information capable de quantifier ou qualifier l'état final de basses eaux. Pour cela, le recours à des indicateurs statistiques est envisagé. En effet, il s'agit d'une approche généralement employée pour l'étude des situations d'étiage (Smakhtin, 2001 ; Lang Delus, 2011 ; Roche *et al.*, 2012), et qui, de plus,

autorise la création de seuils moins arbitraires que ceux fixés dans les études sur les pénuries en eau (Molle et Mollinga, 2003 ; Margat, 2005 ; Rijsberman, 2006).

Néanmoins, cette méthode exige de prendre en compte des variables descriptives des basses eaux qui puissent suivre une distribution statistique commune ou être ajustées à des lois qui permettent aussi bien de les comparer que de les combiner. C'est pourquoi le choix de recourir à des variables gaussiennes, qui permettraient assez facilement de créer des seuils statistiques (écart-type, par exemple), auxquels il serait possible d'associer des périodes de retour, en fonction des fréquences, semble pertinent.

Cette approche implique néanmoins de considérer des variables générales et mesurées avec un pas de temps important, cas de figure envisageable pour analyser le phénomène des basses eaux dans une spatialité et avec une temporalité relativement grande. En revanche, pour l'étude du phénomène à des échelles locales, à des pas de temps plus courts (journaliers), et/ou pour une analyse très locale (mais qui aurait un sens et un impact très fort à plus petite échelle) ou à des pas de temps très courts (horaires), il semble nécessaire de prendre en compte des variables sub-gaussiennes (susceptibles d'être transformées, par exemple, par anamorphose), mais qui pourraient se révéler aussi fondamentalement non gaussiennes. Ainsi, le choix de structures statistiques semblables ou compatibles (anamorphoses) est donc lié aussi à l'objectif recherché. Les espaces importants et les pas de mesure amples conduisant généralement (et inversement) à des variables gaussiennes ou qui peuvent le devenir.

De plus, si l'échelle spatio-temporelle détermine en grande partie la structure statistique d'une variable, le choix de l'information à extraire d'une même variable est lui aussi susceptible de conduire à utiliser des lois de distribution dissemblables. Par exemple, à partir de la chronique longue (1966 – 2013 ; Banque Hydro) disponible à la Fontaine de Vaucluse, si on cherche à modéliser la série des débits moyens mensuels d'août reconnus comme un indicateur de l'étiage de cette source karstique, il convient d'utiliser une loi de Galton (log-normale). Par contre, si l'on souhaite modéliser les étiages au sens strict, c'est-à-dire, par exemple, la moyenne des trois débits finaux, les plus faibles d'un cycle, alors une loi de Gauss donne d'excellents résultats (Kabo, 2014).

Cette situation s'explique assez facilement. Le mois d'août intègre nécessairement des précipitations souvent orageuses, qui peuvent être importantes. Ces apports, qui, en fait, souvent, relèvent strictement du cycle suivant, sont à intégrer dans l'appréciation des basses eaux de la Fontaine de Vaucluse. En prenant les valeurs vraies de l'étiage, cet apport potentiel est alors nul. Par ailleurs, le caractère gaussien des étiages, mesurés depuis presque un demi-siècle, ne doit pas surprendre car il renvoie à l'immense réservoir karstique (mont Ventoux, plateau d'Albion, montagne de Lure, etc.), percé de cavités majeures dont la profondeur est supérieure à 700 m pour certaines, qui alimente la source.

Toutefois, dans certains cas, il peut être utile de transformer l'information pour la rendre gaussienne. Cela peut se faire par un traitement plus complexe de l'information, une variable non gaussienne en un indicateur qui le soit. Un exemple

peut être illustré avec l'analyse menée sur les débits mesurés à la station de Générargues sur le bassin de Mialet (Gardon amont), issus aussi de la Banque Hydro. En retenant, sur la période de 1962 à 2013, les 60 minima journaliers de chaque trimestre (soient $4 \times 60 = 240$ valeurs annuelles de débit), on obtient une distribution parétienne.

Si on travaille sur cette structure parétienne discrète et que l'on ajuste un modèle de Pareto, la série des pentes des droites ainsi déterminées devient gaussienne. Un même constat, sous le même processus de transformation, peut être également fait pour les débits journaliers estivaux (de juin à août) pour la même période (1962-2013).

De la même manière, il est possible de transformer une information purement qualitative en variable gaussienne quantitative. Afin d'illustrer ce propos, les niveaux de limitations et de restrictions des usages de l'eau, déclenchés par arrêtés préfectoraux au cours de la période 2002 – 2012, sur les bassins de la Cèze et du Gardon (30) ont été traités. Ainsi, pour chaque année, et pour chaque bassin, les jours pour lesquels un niveau a été activé ont été comptabilisés, suivant une pondération particulière (niveau 0 = 0,5 ; niveau 1 = 1 ; niveau 2 = 2, etc.).

Néanmoins, cette démarche, qui consiste à transformer de manière plus ou moins complexe une information afin d'obtenir un indicateur gaussien, ne garantit pas une conservation totale de l'information pertinente, mais la nouvelle variable obtenue est rendue comparable et combinable. Mais, de plus, le processus de calcul et la réflexion menée autour du traitement sont peu intuitifs et appréhendables, selon les publics.

Malgré ses exigences et ses contraintes méthodologiques, une approche gaussienne généralisée permettrait de tout ramener au paramètre de dispersion de la loi de Gauss. Elle sera donc privilégiée pour l'étude sur les basses eaux.

Détermination de la criticité en basses eaux par modélisation bayésienne

Les indicateurs, élaborés de manière indépendante, sont ensuite combinés, pour définir un niveau de tension global de basses eaux, grâce à un modèle bayésien.

Utilisé depuis peu dans l'analyse de phénomènes hydrologiques (Khan et Coulibaly, 2006) ou encore pour l'étude de la ressource en eau (Bromley *et al.*, 2005 ; Castelletti et Soncini-Sessa, 2007 ; Giné Garriga *et al.*, 2009 ; Dondeynaz *et al.*, 2013 ; Molina *et al.*, 2013), ce modèle probabiliste de causalité semble être un outil adapté à la question des basses eaux. En effet, il s'agit d'un outil de modélisation causale en domaine incertain, à la confluence entre statistiques multivariées et Intelligence Artificielle. Il se fonde sur une approche bayésienne des probabilités, mises à jour au fur et à mesure que de nouvelles informations sont acquises.

Le modèle bayésien est de plus un modèle à base d'indicateurs, qui autorise l'intégration de données issues de thématiques de natures différentes, et capable d'appréhender l'interaction entre les phénomènes (Fusco, 2003 ; Naïm *et al.*, 2008).

En renseignant les probabilités de chacun des indicateurs dans le système défini initialement, la combinatoire des variables devrait conduire à la définition d'un indice de criticité de basses eaux, qu'il est possible de représenter graphiquement, pour plus de lisibilité, sous la forme d'un radar.

Le modèle devra ensuite être ajusté et/ou validé par la simulation de situations passées connues (retours d'expériences), aussi bien marquées dans l'humide que dans le sec.

Il est d'ailleurs possible d'introduire, non seulement des variables relatives aux milieux physiques, mais aussi des variables relatives à la demande sociale et économiques, et des variables représentant des décisions administratives, qui seront, de ce fait, testées par confrontation à la modélisation des autres variables (physiques et anthropiques). Les décisions sont-elles en accord avec ce que le radar montre par ailleurs ? Si oui, c'est qu'elles sont justes et bien fondées. Si non, il faut alors s'interroger sur, d'une part, la construction de l'indice et, d'autre part, sur le processus de décision. Il y a donc là une dimension réflexive particulièrement intéressante dans une perspective de gestion dynamique des territoires.

Accessoirement, toute cette démarche devrait pouvoir être mise sous une forme ergonomique (logiciel) pour être largement testée et appliquée si elle s'avère pertinente.

Bibliographie

- Bromley J., Jackson N.A., Clymer O.J., Giacomello A.M. et Jensen F.V. (2005). The use of Hugin® to develop Bayesian networks as an aid to integrated water resource planning. *Environmental Modelling & Software*, vol. 20, p. 231-242.
- Castelletti A. et Soncini-Sessa R. (2007). Bayesian Networks and participatory modelling in water resource management. *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, p. 1075-1088.
- Dondeynaz C., Lopez Puga J. et Carmona Moreno C. (2013). *Bayesian networks modelling in support to cross-cutting analysis of water supply and sanitation in developing countries*, www.hydrol-earth-syst-sci.net/17/3397/2013/
- Fusco G. (2003). *La mobilité quotidienne dans les grandes villes du monde: application de la théorie des réseaux bayésiens*, <http://cybergeo.revues.org/4251>
- Giné Garriga R., Pérez Foguet A., Molina J.L., Bromley J. et Sullivan C. (2009). Application of Bayesian networks to assess water poverty, *Actes du colloque ICSMM 2009*, CIMME, Barcelone.
- Kabo R. (2014). *Caractérisation de l'état de basses eaux de la Fontaine de Vaucluse à partir d'une chronique longue de débits*. Mémoire de master 1 de géographie, Université d'Avignon, 96 p
- Khan, M. S. et Coulibaly P. (2006), Bayesian neural network for rainfall-runoff modeling. *Water Resources Research*, vol. 42, n° 7
- Lang Delus C. (2011). *Les étiages: définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires*, <http://cybergeo.revues.org/24827>

- Margat J. (2005). Quels indicateurs pertinents de la pénurie d'eau ? *Géocarrefour*, vol. 80, n° 4, p. 261-262.
- Molina J.L., Pulido-Velazquez D., Garcia-Arostegui J.L. et Pulido-Velazquez M. (2013). Dynamic Bayesian Networks as a Decision Support tool for assessing Climate Change impacts on highly stressed groundwater systems. *Journal of Hydrology*, vol. 479, p. 113-129.
- Molle F et Mollinga P. (2003). Water Poverty Indicators: Conceptual Problems and Policy Issues. *Water Policy*, vol. 5, n° 5, p. 529-544.
- Naïm P., Wuillemin P.H., Leray P. et Becker A. (1999, 2004, 2008). Mise en œuvre des réseaux bayésiens. *Réseaux bayésiens, 3^e édition*. Paris, Eyrolles, p. 187-212.
- Rijsberman F.R. (2006). Water Scarcity: Fact or Fiction? *Agricultural Water Management*, vol. 80, n° 1-3, p. 5-22.
- Roche P-A., Miquel J. et Gaume E. (2012). *Hydrologie quantitative - Processus, modèles et aide à la décision*, Springer, Paris.
- Smakhtin V.U. (2001). Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, vol. 240, n° 3-4, p. 147-186.
- Tixier J., Dusserre G., Salvio O. et Gaston D. (2002). Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 15, n° 4, p. 291-303.