

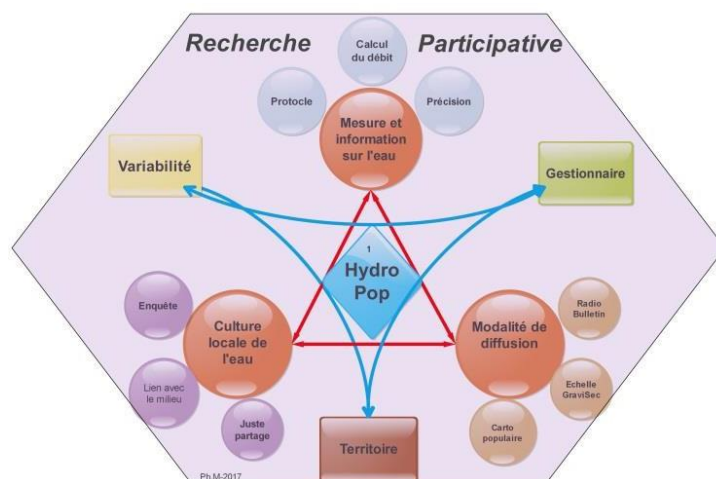


De l'hydrologie populaire et participative ?

HydroPop 2 (2018-2021)

RAPPORT FINAL CHAPITRE SUR LA DEMARCHE PARTICIPATIVE

(Juillet 2021)



Responsables scientifiques

Philippe MARTIN

Professeur des universités, Avignon Université, ESPACE UMR 7300,
CNRS, Avignon Université, Aix Marseille Université, Université Côte d'Azur

Pierre – Alain AYRAL

Enseignant-Chercheur, IMT Mines Alès, UMR Hydrosiences Montpellier



HydroPop-2 : Rapport final

Dans ce document ne figure uniquement que le chapitre consacré à la démarche participative, chapitre rédigé par Pierre-Alain Ayral, Stéphane Ecrepont et Sophie Sauvagnargues.

Table des matières

1.	Sur la démarche participative (PAA, SE et SS).....	4
1.1.	Rappel sur la stratégie mise en œuvre	4
1.1.1.	Organiser la participation	4
1.1.2.	Susciter la participation	7
1.1.3.	Recueillir la participation	8
1.2.	Bilan des étés 2019 et 2020	8
1.2.1.	Volontaire lecteur	9
1.2.2.	Volontaire observateur	10
1.2.3.	Volontaire expert	12
1.3.	Que retenir de cette stratégie de sciences citoyennes ?	13
1.4.	Remerciements	14
1.5.	Références	15

1. Sur la démarche participative (PAA, SE et SS)

Dans le cadre du premier volet du projet HydroPop une démarche de science participative a été engagée afin de sensibiliser la population à la problématique de la sécheresse, de tester différentes configurations d’actions participatives, d’évaluer ces démarches et d’entrevoir comment cette science citoyenne pouvait contribuer à un programme de recherche dédié aux basses eaux (Martin Ph. et al. 2019).

Cette démarche ainsi que les premiers résultats ont été présentés par Ayral P-A. et al. (2019) et la plateforme de cartographie participative dédiée a été développée par Pottier B. (2017) puis optimisée en 2019 notamment sur le volet *responsive* (adaptabilité de la plateforme aux smartphones et aux tablettes) (Mvoula-Ntsoumou S., 2018).

Il s’agissait donc dans le cadre du second volet du programme HydroPop de poursuivre cette démarche lors des étés 2019 et 2020. Après un rappel de la stratégie mise en œuvre, les résultats obtenus seront présentés puis discutés.

1.1. Rappel sur la stratégie mise en œuvre

La stratégie d’observation participative mise en place dans le cadre d’HydroPop s’organise autour de 3 axes : la définition des profils des observateurs, les démarches pour encourager la participation et enfin la mise en place d’une plateforme cartographique participative pour recueillir les contributions des volontaires. Une synthèse de ces 3 axes est présentée ici.

1.1.1. Organiser la participation

De manière à tester un large éventail de démarches participatives, 3 profils d’observateurs ont été définis (Ayral P-A. et al. 2019) : les volontaires lecteurs, observateurs et experts.

Le volontaire lecteur

Directement inspirée des démarches de *CrowdHydrology* et notamment des travaux de Lowry C. S. & Fienen M. N. (2012), cette action consiste à proposer des aménagements en bordure de cours d’eau pour permettre aux contributeurs de réaliser et de transmettre une mesure de hauteur d’eau. Plusieurs sites ont ainsi été définis et équipés avec une échelle limnimétrique et un panneau explicatif (voir un exemple sur la Fig.1 et 2).



Fig.1 – Environnement de l’échelle lecteur de Bastide (Crédit photo P-A. Ayral)



HydroPop, un programme de recherche pour vous et avec vous sur la ressource en eau !

Comment nous aider ? Faire une mesure de hauteur d'eau sur l'échelle limnimétrique et nous la transmettre

4 étapes pour faire la mesure :

- 1- Se positionner « au mieux » : en face de l'échelle avec le regard au plus proche du niveau d'eau
- 2- Repérer la hauteur de l'échelle en mètre (**ici 1 m**)
- 3- Repérer la dizaine de centimètres au dessus du niveau de l'eau (**ici 60 cm**)
- 4- Lire au centimètre près (le rectangle noir mesure 1 cm) – **ici 4 cm** – **La hauteur d'eau est donc 0,54 m**

N'hésitez pas à estimer la hauteur avec plus de précisions (au mm) si les conditions sont bonnes !



La station de Bastide (Code station BAS)

Nous envoyer :
le code station (BAS),
la date et l'heure,
la hauteur lue à l'échelle et/ou
une photo



Soyez prudent lors de vos observations, vérifiez bien que vous êtes en condition de basses eaux (faible vitesse et faible hauteur d'eau), privilégiez des observations hors d'eau et dans tous les cas soyez vigilant à l'accès du cours d'eau qui peut être difficile (pente, glissant, embroussaillé,...). Ne prenez pas de risque !

Par SMS au **07 79 88 12 40** / Par mail **hydropop@univ-avignon.fr**
Sur Internet **<http://hydropop.mines-ales.fr>** Onglet « Lecteur » ou sur le Carnet

Fig.2 – Mode d'emploi des échelles lecteurs. Exemple sur le site Bastide

Différents choix de localisations ont été testés en proposant des sites de baignade très fréquentés, des sites situés sur des chemins de randonnées et des lieux identifiés en collaboration avec les gestionnaires de bassin et/ou des élus. Pour transmettre la hauteur d'eau lue, le lecteur dispose de plusieurs moyens dont le SMS, le mail, la plateforme cartographique participative et depuis l'été 2020 pour certaines échelles d'un carnet de terrain à disposition (voir au premier plan de la Fig.1).

Le volontaire observateur

Le volontaire observateur va, au grès de sa pratique du bassin versant, faire remonter différentes observations géoréférencées sur la plateforme. L'équipe de recherche a développé un guide précisant les observations qui intéressaient les chercheurs (algues, asssecs, les sources taries, ...) mais les observateurs restent libres des observations remontées sur la plateforme de cartographie participative Martin Ph. et al., 2019). Un exemple du formulaire complété en ligne sur la plateforme cartographique par un observateur est donné sur la figure 3.



Fig.3 – Exemple de formalisme d'une observation

Ce sont les différentes actions de communication autour du projet qui vont permettre de motiver les observations des volontaires.

Le volontaire expert

Avec l'objectif d'approfondir le test des contributions possibles en sciences citoyennes un profil de volontaire expert a été défini. Il s'agit d'établir avec un nombre réduit de personnes un protocole visant à organiser un suivi hydrométéorologique au fil de l'été. Ce protocole est coconstruit entre les chercheurs et les volontaires. Plusieurs actions sont possibles telles que le suivi de la hauteur d'eau, de la température, de la pluviométrie, de la conductivité. En appui de ces mesures, les chercheurs peuvent mettre à disposition des volontaires du matériel spécifique (des pluviomètres, des conductimètres, des échelles limnimétriques, ...). Un exemple de chronique de hauteurs d'eau est donné sur la figure 4.

Les volontaires experts sont sélectionnés en fonction de leurs motivations, de leurs localisations géographiques ou de leurs compétences spécifiques. Un suivi régulier entre l'équipe de recherche et les volontaires est organisé durant la période d'observation et les relevés sont implémentés régulièrement sur la plateforme.

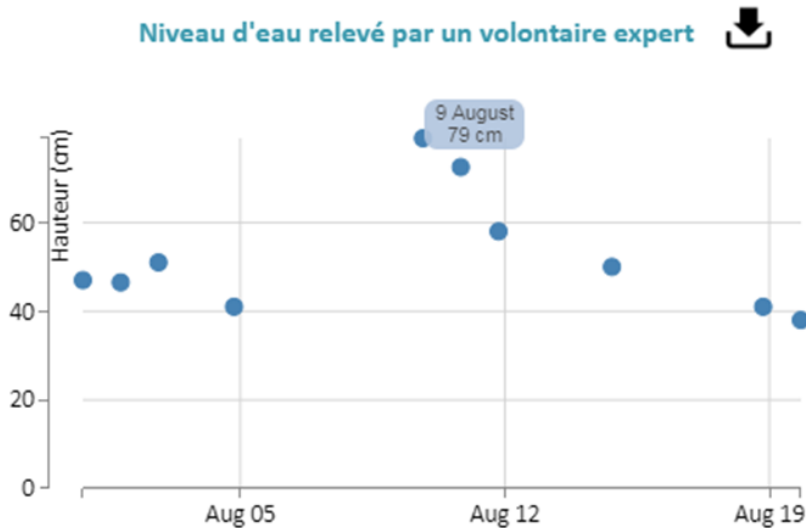


Fig.4 – Exemple de relevés d'un volontaire expert

1.1.2. Susciter la participation

Pour s'assurer de la participation citoyenne au regard des choix méthodologiques présentés plus haut, plusieurs démarches ont été engagées pour susciter cette participation. La figure suivante en présente une synthèse (Fig. 5).



Fig.5 – Susciter la participation (Crédit photo : J-F. Didon-Lescot)

Ces démarches regroupent ainsi la réalisation :

- d'un logo,
- de teeshirts facilement identifiables, portés par l'équipe de recherche et distribués aux volontaires experts,

- de flyers distribués sur les marchés en 2017 puis déposés chaque année sur les principaux lieux fréquentés l'été (mairies, syndicats d'initiative, campings, ...)
- d'émissions de radio hebdomadaires (Radio Interval)
- de communications régulières avec la presse et la télévision régionale,
- de conférences auprès de la population.

1.1.3. Recueillir la participation

Une plateforme cartographique participative a été développée en 2017, avec des outils libres, pour recueillir les données fournies par les différents observateurs et l'équipe de chercheurs. Cette plateforme a été présentée dans le rapport du premier programme HydroPop (Martin Ph. et al., 2019), dans l'article de Ayrat P-A. et al. (2019) et dans le mémoire de Master 2 de Pottier B. (2017). L'interface d'accueil est présentée dans la figure suivante.



Fig.6 – Page d'accueil de la plateforme cartographique en ligne. À noter la possibilité de télécharger le guide d'utilisation et la possibilité de consulter le site en français et en anglais.

<https://hydropop.mines-ales.fr/>

Cette plateforme permet donc d'informer sur le projet, d'encourager la participation pour les différents profils de volontaires, de télécharger en français et en anglais les différents guides, d'afficher les informations hydrologiques collectées par le collectif de chercheurs, d'enregistrer et de géolocaliser des observations et de rajouter une valeur de hauteur d'eau sur les échelles lecteurs.

1.2.Bilan des étés 2019 et 2020

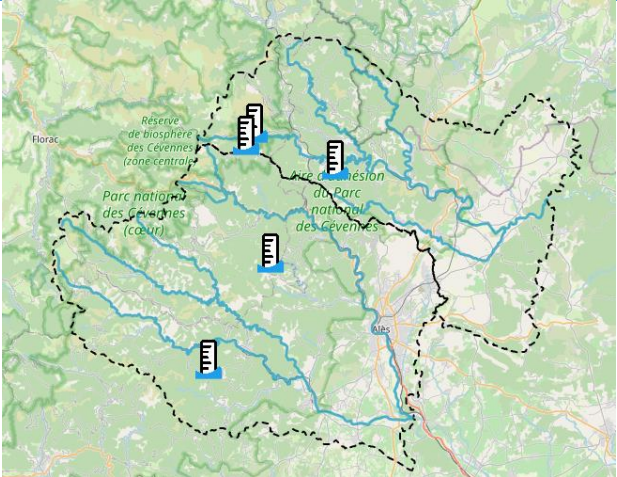
Un bilan des observations réalisées lors des étés 2019 et 2020 de chaque profil de volontaire va être réalisé dans cette section. Il est important de préciser que les conditions d'observations de l'été 2020 ont été impactées par la crise sanitaire liée à la Covid-19. La crise sanitaire a en effet fortement perturbé ce volet du programme de recherche. Il était prévu de nombreuses actions auprès des scolaires, des animateurs du CPIE¹ du Gard et auprès de collectivités locales n'ont pu se dérouler comme prévu. A ce

¹ CPIE : Centre Permanent d'Initiatives pour l'Environnement

titre, Il n'y a pas eu en 2020 de manifestations de sensibilisation auprès du public comme en 2018. La communication en 2020 s'est fait essentiellement « au bord de l'eau » où nous avons encouragé les personnes présentes au bord de l'eau à contribuer au programme de recherche participative ou à les sensibiliser à la problématique des basses eaux et des sécheresses dans les Cévennes.

1.2.1. *Volontaire lecteur*

Avec l'intégration du bassin versant amont de la Cèze au périmètre du projet HydroPop, de nouvelles échelles lecteurs ont été progressivement installées pour couvrir ce nouveau territoire. Pour 2019 et 2020 se sont ainsi 5 échelles lecteurs qui ont été réparties sur les bassins versants étudiés (Tabl.1).

Les échelles lecteurs	
<p>(1) Sur la Gourdouze à Vialas (amont pont de la D37)</p> <p>(2) Sur le Luech à Vialas (Lieu de Baignade)</p> <p>(3) Sur le Luech au Chambon</p> <p>(4) Sur le Galeizon au Pont de la Fage (Saint-Martin-de-Boubaux)</p> <p>(5) A l'exutoire du bassin versant des Bastides (bassin versant de Valescure)</p>	

Tabl.1 – Localisation des échelles lecteurs

Le nombre de relevés est passé de 40 sur l'été 2019 à un peu moins de 60 en 2020, avec un maximum de 26 observations pour l'échelle en place au niveau du Pont de la Fage sur le Galeizon (en 2020). A l'exception de l'échelle située sur le Luech au Chambon, la couverture temporelle des mesures effectuées est régulière avec toutefois un décrochage du nombre d'observations à partir du 15 août et de la diminution de la fréquentation des abords des cours d'eau.

Il est intéressant de noter que certaines échelles sont lues régulièrement par les riverains avec des objectifs assez différents, c'est le cas par exemple de l'échelle installée sur la Gourdouze qui est régulièrement lue par les pratiquants de canyoning et les élus de la commune pour suivre l'évolution des niveaux de basses eaux.

En 2020, des jaugeages réguliers ont été réalisés lors des tournées hebdomadaires pour établir une courbe de tarage pour le site de la Gourdouze et les observations des lecteurs ont pu être transformés en débit. Les résultats sont présentés sur la figure 7.

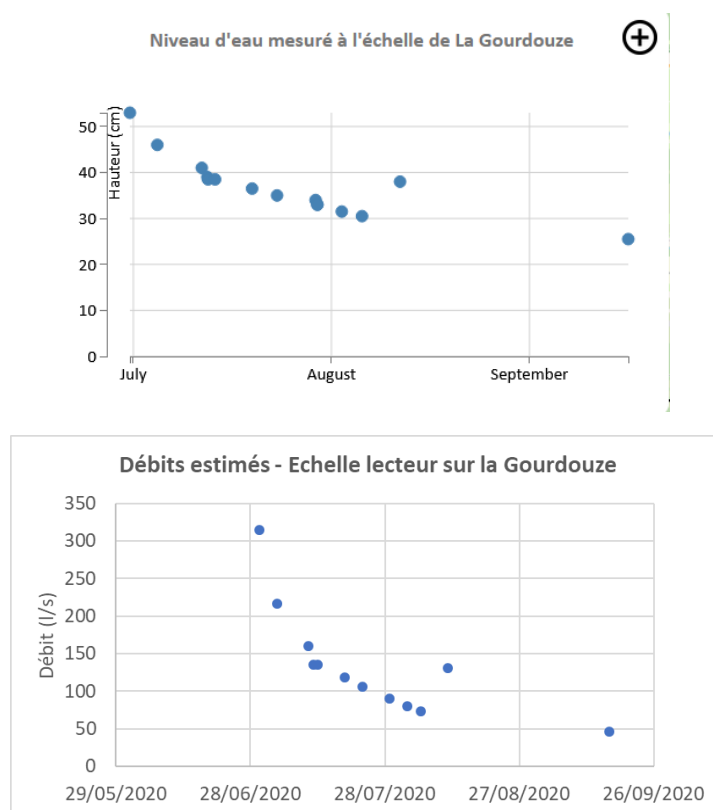


Fig.7 – Relevés échelle lecteur de la Gourdouze et transformation en débits

Après un début difficile lors de l'été 2018, les résultats obtenus en 2019 et 2020 sont très positifs pour 4 échelles sur 5 et semblent en nette progression entre les 2 dernières années, en considérant notamment qu'il n'y pas eu beaucoup de communications autour de ces échelles en 2020. Il est également intéressant de noter que ces échelles semblent pouvoir répondre à un besoin local de suivi du niveau de l'eau des cours d'eau et pourrait ainsi être une solution à moindre coût pour organiser ce suivi local.

1.2.2. *Volontaire observateur*

Une vingtaine d'observations avaient été collectée lors de l'été 2018 (Martin Ph. et al. 2019), résultat doublé lors de l'été 2019 avant de revenir au même ordre de grandeur pour l'été 2020. Lors de l'été 2019, la présence médiatique de l'équipe a été importante avec de nombreux articles dans la presse locale, un reportage sur France 3 et de nombreuses conférences, cette communication accrue explique sûrement l'augmentation des observations qui restent toutefois modestes au regard de l'investissement fourni. Le bilan en 2020, sans actions de communication trop importante, revient au niveau initial de 2018 et vient confirmer l'importance de la médiatisation pour l'obtention de ces informations.

Sur le fond des observations, on retrouve essentiellement des vues des cours d'eau, la présence d'algues mais également quelques messages qui s'interrogent sur des pratiques d'irrigations qualifiées dans le corps du message "d'abusives"... (Fig.8). Difficile toutefois, au regard du nombre de résultats, de tirer des conclusions sur les préoccupations environnementales des observateurs.



Fig.8 – Une observation sur les pratiques agricoles

En analysant l'ensemble des contributions, on s'aperçoit lors de chaque année du petit nombre de contributeurs qui réalisent généralement plusieurs observations comme par exemple un observateur qui a réalisé plus de la moitié des observations lors de l'été 2020. Cette constatation est cohérente avec la répartition des observations qui restent très localisées spatialement comme on peut le voir sur la figure suivante (Fig. 9).

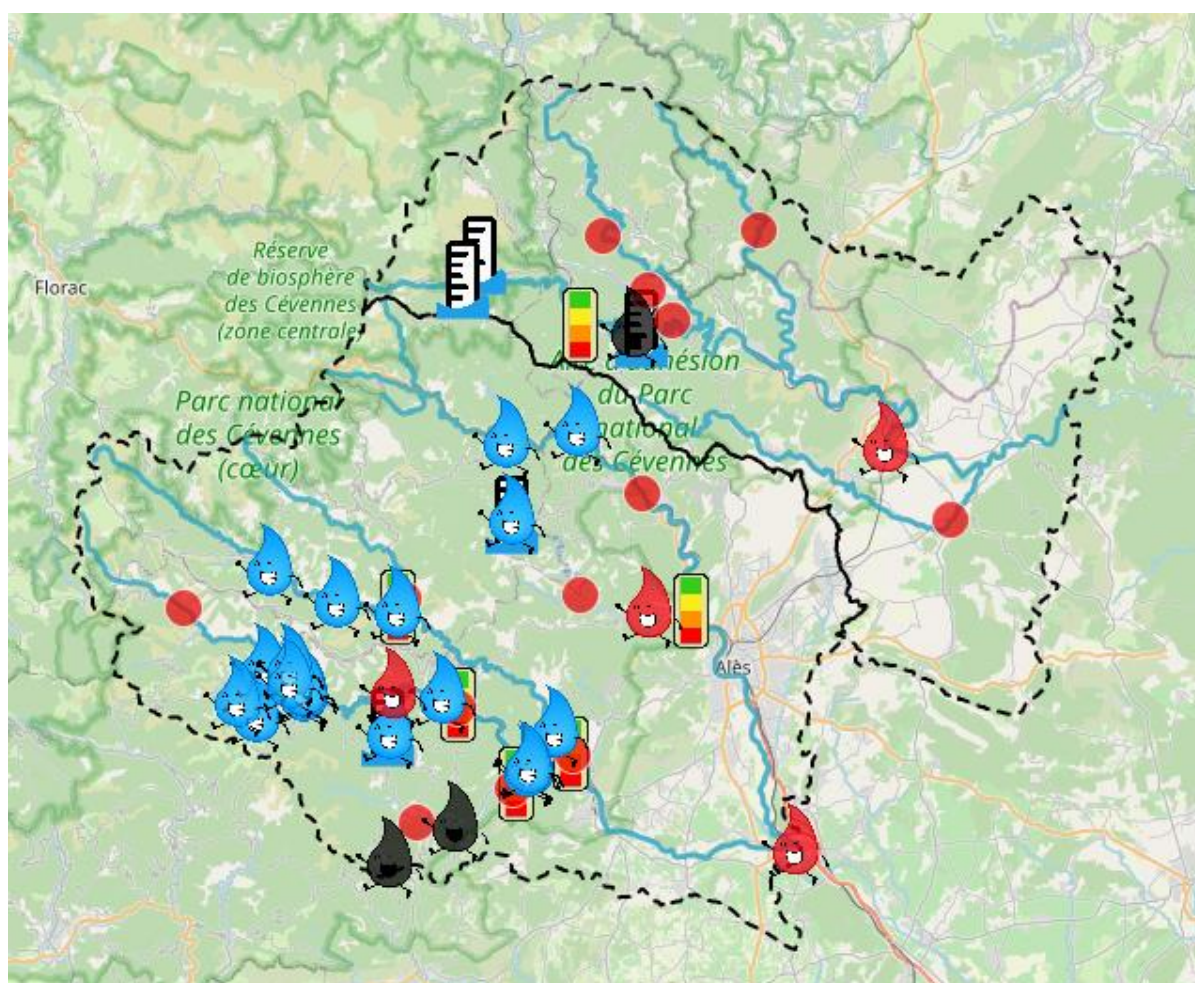


Fig.9 – Bilan des observations suite à l'été 2020 (gouttes en bleu)

Ce nombre réduit d'observations ne permet pas actuellement un gain scientifique pour la compréhension des processus d'étiage. L'effort nécessaire sur le volet communication pour espérer de plus nombreuses observations paraît difficile à mettre en œuvre et sans garantie de succès, tout du moins dans les conditions actuellement définies pour ce profil.

1.2.3. *Volontaire expert*

Ce sont 11 volontaires experts qui ont été mobilisés de 2018 à 2020. Le tableau suivant présente les différentes localisations des experts et les paramètres suivis, en collaboration avec l'équipe de recherche généralement de juin à septembre. Des protocoles individualisés ont été établis avec chacun d'eux en fonction de leurs disponibilités, de leurs intérêts et de leurs localisations géographiques. La mise en place de ces protocoles, le suivi au cours de l'été ont été particulièrement enrichissant pour l'équipe de chercheurs.

Cours d'eau	2018	2019	2020	H. d'eau	Temp.	Cond.	Pluie	Débit	Médias
Gardon	x								Photo
Gardon		x	x				x		
Gardon			x	x		x			Photo
Le Rieu	x	x	x	x	x		x		
La Borgne	x			x					
Le Galeizon	x	x	x	x	x				
Le Galeizon	x								Photo
La Cèze	x	x	x	x			x		
La Cèze		x	x				x		
La Luech		x	x				x	x	
Le Luech		x	x	x			x		

Tabl.2 – Bilan des experts mobilisés et des mesures hydrométéorologiques associées. Pour le débit il s'agit d'une mesure du débit d'une source.

Les résultats acquis par les volontaires experts sont de très bonnes qualités avec une très bonne fiabilité dans le temps et tout à fait conforme aux engagements pris. Un exemple est donné sur la figure 10 avec le limnigramme relevé à Saint-Ambroix durant l'été 2020.

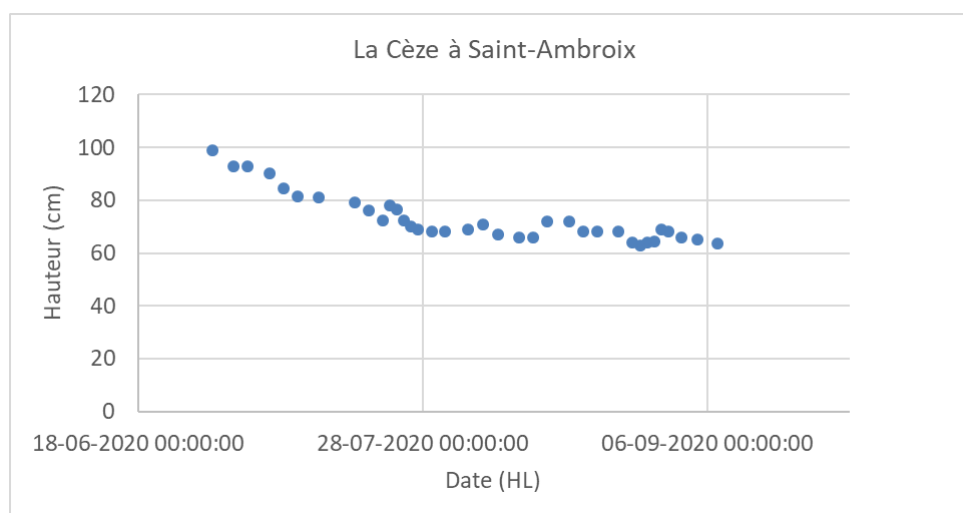


Fig.10 – Relevés de hauteurs d'eau sur la Cèze à Saint-Ambroix durant l'été 2020

La motivation des volontaires et leur intérêt pour la thématique du projet de recherche est tout à fait indéniable et a fortement contribué à la qualité des données collectées. Une étape de présentation des résultats du projet à chaque expert, individuellement, sera réalisée une fois ce rapport publié et en s'appuyant sur un document de synthèse de ce dernier. Le temps nécessaire pour l'équipe de recherche consacré à cette démarche a été très important mais a permis en plus des données de recueillir l'expertise des volontaires sur une thématique et des bassins versants qu'ils connaissent bien.

1.3. Que retenir de cette stratégie de sciences citoyennes ?

Les objectifs de cette démarche participative étaient (1) de tester différents profils de volontaires, (2) d'évaluer l'intérêt des sciences participatives pour sensibiliser le grand public aux problématiques des basses eaux dans les Cévennes et (3) d'évaluer les potentialités scientifiques de ce type de données pour la compréhension des processus liés aux étiages.

Les échelles lecteurs ont produit un résultat satisfaisant et laissent entrevoir des potentialités très intéressantes tant pour les scientifiques que pour les gestionnaires (EPTB et collectivités locales). En effet, si le choix de la localisation est important pour l'obtention de résultats, le dispositif à mettre en œuvre est « léger » et peu coûteux ce qui peut permettre d'ajuster la localisation en fonction des résultats obtenus après la ou les 2 premières saisons d'observation. L'affichage présent sur le site et invitant le grand-public de passage à effectuer une mesure de hauteur d'eau peut être l'occasion de sensibiliser ce dernier à une ou plusieurs problématiques liées à la protection de la ressource en eau. En ce sens ces échelles sont un véritable outil de sensibilisation.

Les résultats obtenus dans le cadre du projet montre qu'il est possible avec ce type de dispositif de suivre la hauteur d'eau durant tout l'été avec toutefois une diminution nette des observations à partir du 15 août et de la chute de la fréquentation des cours d'eau. Dans certains cas, si la configuration du contrôle aval du lieu d'installation est stable, il est également possible d'établir une courbe de tarage et donc d'associer des débits aux mesures de hauteur, voire de permettre aux « lecteurs » d'estimer eux-mêmes le débit en affichant la courbe de tarage (activité non testée dans le cadre du projet).

Concernant la collecte des données, « les lecteurs » ont privilégié le SMS même si quelques mails ont également été reçus. À noter que le système du carnet a été un succès pour les 2 sites équipés, malgré le vol de l'un d'eux au cours de l'été. En général les contributeurs inscrivaient la hauteur lue sur le carnet et envoyaient cette valeur par SMS.

Pour des besoins de connaissances qui ne nécessitent pas un suivi à pas de temps fin, ce système de mesure participatif, s'il est accompagné par des relais locaux, pourraient parfaitement répondre à des attentes opérationnelles de gestionnaires, voire de scientifiques.

Il est intéressant de noter qu'au moins une échelle a trouvé une utilité pour certains acteurs locaux suite à son installation. Des guides accompagnant des sorties canyonings nous ont en effet signalé regarder l'échelle avant chaque sortie. Il est donc tout à fait possible de penser qu'en inscrivant certaines échelles dans la durée, des usages locaux de cette dernière se mettront en place progressivement.

Le bilan sur les observations est beaucoup plus contrasté. Il faut tout d'abord souligner l'effort très important en termes de communication débuté en 2018, renforcé en 2019 et qui aurait dû être encore renforcé en 2020 en associant de nouveaux acteurs (CPIE du Gard, scolaires) et les réseaux sociaux. Malheureusement avec la crise sanitaire la stratégie de renforcement n'a pu être engagée pour 2020. Il est donc difficile de savoir si cette campagne aurait pu permettre de constater une augmentation forte des observations (qui sont redevenues en 2020 équivalentes à celles de 2018, pour mémoire).

Scientifiquement, les données recueillies par les volontaires "lecteurs" sont difficilement exploitables et en l'état, n'apportent pas d'éléments pertinents *a contrario* des données obtenues avec les 2 autres profils. Sur le volet sensibilisation, vu le lien entre cette action et toutes les actions de communication entreprises, le bilan est positif même s'il est difficile d'en avoir une estimation quantitative. Il est en effet impossible de disposer des audiences des émissions radios, télévisuelles ou des indicateurs sur la lecture des articles de presse. On peut toutefois préciser que le site a été consulté par plus de 1 300 adresses IP (*Internet Protocol*) différentes depuis 2019.

Si le bilan des résultats obtenu avec ce profil de volontaire est mitigé, il faut toutefois noter que pour être efficace il serait sûrement nécessaire de l'inscrire dans la durée, en mobilisant d'autres acteurs et les réseaux sociaux, ce qui était prévu mais n'a pas pu être testé.

Le profil « expert » mis en œuvre présente des résultats très satisfaisants, notamment sur le volet scientifique. Les données obtenues sont en effet de grande qualité et les échanges avec les contributeurs ont été très riches pour les chercheurs impliqués. L'objectif de sensibilisation est ici beaucoup moins présent dans la mesure où les contributeurs sont généralement très sensibilisés (et intéressés) par la thématique, donc bien conscients des enjeux sur la ressource en eau. Monter un groupe d'observateurs experts est donc un gage de succès sachant toutefois que cela demande un engagement fort de l'équipe en charge de ce réseau qu'il faut animer très régulièrement et qu'un des enjeux est sûrement de maintenir l'intérêt de ces observateurs sur la durée. Ici en effet, il s'agissait au mieux d'une sollicitation sur 3 étés. Ceci dit, plusieurs experts se sont portés volontaires pour garder des liens avec l'équipe de recherche.

La plateforme cartographique participative s'est révélée être un outil précieux dans le cadre de ce projet de recherche tant pour collecter les données des volontaires que celles du collectif de chercheurs et en permettant l'affichage de ces données et la communication autour du projet. Cette plateforme a été développée avec des outils libres et reste à disposition des gestionnaires pour être éventuellement reprise en totalité ou en partie.

1.4.Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier l'ensemble des contributeurs bénévoles, impliqués et motivés, qui ont participé à cette démarche. En espérant que le bilan ait été aussi positif et riche pour eux que pour nous.

1.5. Références

AYRAL P.-A., POTTIER B., SAUVAGNARGUES S., MARTIN P., BRACHET N., CICILLE P., DIDON-LESCOT J.-F., DOMERGUE J.M., DOUGUÉDROIT A., GRARD N., LOPEZ C., MVOULA S. & SPINELLI R., 2019 - A Participatory Webmapping Platform for the Low Flow Monitoring in Cévennes Area (France). *Geo-Eco-Trop*, 43, (4), 489-502.

LOWRY C.S. & FIENEN M.N., 2012 - CrowdHydrology : Crowdsourcing Hydrologic Data and Engaging Citizen Scientists. *Ground Water*, 1-6, 10.1111/j.1745-6584.2012.00956.x.

MARTIN P., AYRAL P.-A., CICILLE P., DIDON-LESCOT J.-F., DOUGUÉDROIT, ANNICK, & SAUVAGNARGUES, SOPHIE, 2019 - *HydroPop : De l'hydrologie populaire et participative ?* Rapport final Projet HydroPop ZABR Agence de l'Eau RMC, 152 p.

MVOULA-NTSOU MOU S., 2018 - *Étude des basses eaux en régions méditerranéennes : Constitution d'une base de données et premières analyses hydrologiques*. Master 2 Observation de la Terre et Géomatique. Université de Strasbourg, 71 p.

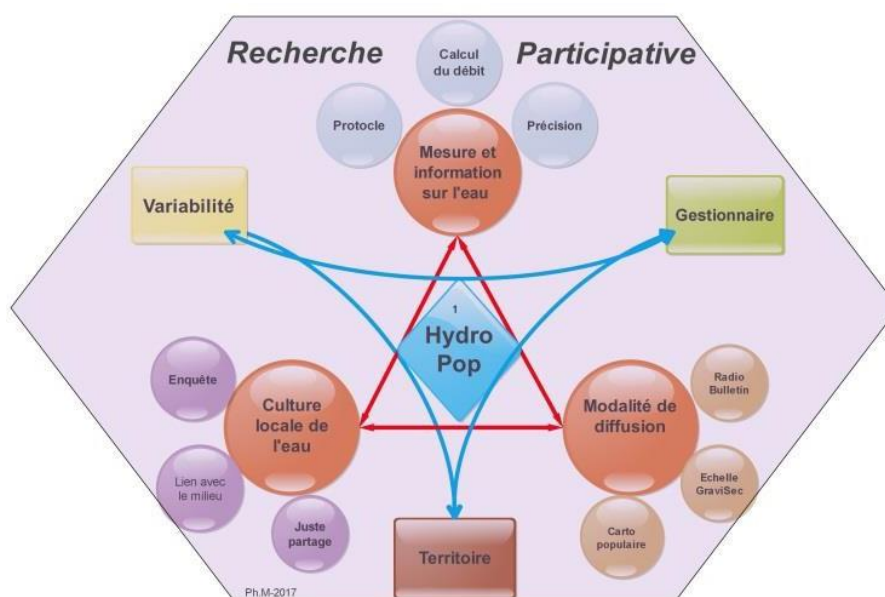
POTTIER B., 2017 - *Élaboration d'une plateforme cartographique participative sur le suivi des basses eaux dans le bassin versant des Gardons*. Mémoire de Master 2 Carthagéo. Université Panthéon Sorbonne, 74 p.



De l'hydrologie populaire et participative ?

HydroPop 2 (2018-2021)

RAPPORT FINAL CHAPITRE SUR LA GESTION DE CRISE (Juillet 2021)



Responsables scientifiques

Philippe MARTIN

Professeur des universités, Avignon Université, ESPACE UMR 7300,
CNRS, Avignon Université, Aix Marseille Université, Université Côte d'Azur

Pierre-Alain AYRAL

Enseignant-Chercheur, IMT Mines Alès, UMR Hydrosiences Montpellier



HydroPop-2 : Rapport final

Dans ce document ne figure uniquement que le chapitre consacré à la gestion de crise, chapitre rédigé par Pierre-Alain Ayrat, Nathalie Dubus, Sarah Hassini, Sophie Sauvagnargues et Florian Tena-Chollet.

Table des matières

1.	Simuler les crises sécheresses (PAA, ND, SH, SS et FTC)	4
1.1.	Documenter les crises sécheresses	4
1.1.1.	Des retours d'expérience	4
1.1.2.	Implémentation de frises chrono-systémiques	6
1.1.3.	Un focus sur la commune de Vialas (48)	9
1.2.	Une journée de simulation.....	9
1.2.1.	Une commune fictive	9
1.2.2.	3 temps de jeu.....	10
1.2.3.	2 simulations réalisées.....	12
1.3.	Conclusion et perspectives	13
1.4.	Remerciements	14
1.5.	Références	14

1. Simuler les crises sécheresses (PAA, ND, SH, SS et FTC)

Ce second volet du programme HydroPop a permis d'aborder une nouvelle dimension de l'étude de la sécheresse en s'intéressant à sa gestion de crise à l'échelle locale. En effet, si la gestion de crise face aux inondations est bien connue (Ayrat P-A. et al, 2015., Sauvagnargues S. et Ayrat P-A., 2015 ; Sauvagnargues S. et al, 2017 ; Sauvagnargues S. et al, 2019) celle liée aux sécheresses est bien moins développée et peut être qualifiée d'émergente tout particulièrement sur les Cévennes (Hassini S., 2019 ; Ayrat P-A. et al, 2019).

L'objectif de cette tâche était donc de voir comment l'ingénierie pédagogique et les recherches développées au Laboratoire des Sciences des Risques (LSR) sur la gestion de crise (Sauvagnargues S. et al, 2018) étaient susceptibles de permettre une simulation de crise sécheresse.

Il s'agit dans ce chapitre de présenter les principales étapes de cette recherche explicitée plus en détail dans le mémoire de Hassini S. (2019). C'est à partir de la documentation de plusieurs sécheresses à l'International, en France et dans les Cévennes que les bases du scénario de gestion de crise ont été développées, ce dernier ayant été testé lors de deux simulations réalisées durant l'été 2019.

1.1. Documenter les crises sécheresses

Le réalisme attendu d'un exercice de gestion de crise requiert une étape préalable de retour d'expérience d'événements passés pour identifier la ou les cinétiques de ces événements, les actions et décisions mises en œuvre par les collectifs mobilisés et les difficultés rencontrées par ces mêmes collectifs. Les éléments ainsi dégagés peuvent servir de socle lors de la construction du scénario.

1.1.1. Des retours d'expérience

Cette question du retour d'expérience (RETEX) a été théorisée notamment par la Sécurité Civile française qui a produit un guide méthodologique qu'il est possible de déployer après chaque événement catastrophique (DGSCGC, 2006). Cette méthodologie permet de rassembler dans un même document les principaux enseignements d'un événement au travers de différentes fiches regroupant les items suivants :

- la description de l'événement,
- le détail de sa chronologie,
- le contexte et les constats,
- les causes et les conséquences,
- le cycle de décision,
- une synthèse.

Le tableau 1 présente le détail de chacune des fiches organisées sous la forme de tableaux à compléter.

Dans le cadre de ces travaux six événements ont été étudiés. Ces événements présentent des cinétiques différentes, de quelques mois estivaux à plusieurs années, et se situent sur des territoires et des échelles de gouvernance différents (de la collectivité locale à l'Etat). On retrouve ainsi la sécheresse de la Californie de 2012 à 2017, celle de la ville du Cap en Afrique du Sud de 2015 à 2018, celles de 1976 et 2003 en France, celle du Doubs en 2018 et celles de 2016 et 2017 sur la commune de Vialas située dans les Cévennes (48). Pour l'ensemble de ces événements les fiches RETEX ont été complétées et sont consultables dans les annexes du mémoire de Hassini S. (2019).

EVENEMENT		
Intitulé		
Nature du REX		
Période		
Domaine		
Catégorie		
Type		
Sous type		

CHRONOLOGIE		
Date	Evénement	Observation

CONTEXTE ET CONSTAT		
Données météorologiques	Vent	
	Températures	
	Précipitations	
Situation géographique		
Difficultés		
Organismes impliqués		
Partage des responsabilités		
Difficultés de commandement		

CAUSES ET CONSEQUENCES		
Causes	Manque de précipitations, fortes chaleurs	
Conséquences	Humaines	
	Matérielles	
	Economiques	
	Environnementales	
	Sociales	
Prévention		
Protection		

CYCLE DES DECISIONS		
Renseignement	Acteurs	
Analyse	Diffusion de l'alerte	
	Définition des priorités	
	Décisions	
Moyens	Effectifs mobilisés	
	Réquisition du matériel	
	Ouvertures Centres Hébergement	
	Actions des secours	

SYNTHESES		
Enjeux		
Problématique	Signal d'alerte	
	Information aux populations	
	Organisation du commandement	
	Organisation des secours	
	Communications et informations	
	Autres	
	Organisation des secours	
	Communications et informations	

Tabl.1 – Fiches méthodologiques « RETEX » (DGSCGC, 2006)

Cette collecte conséquente d'informations a permis de recueillir beaucoup de « matière », tout particulièrement sur les conséquences des sécheresses, sur les réseaux sociaux (*droughtshaming*), sur les jeux d'acteurs, les décisions politiques et les conflits possibles entre les différents acteurs. Le tableau 2 propose un extrait de ce travail sur « *les causes et les conséquences* » de la sécheresse californienne entre 2012 et 2017.

Ce travail d'investigation sur des événements pour certains très anciens ne va pas sans difficultés et il est souvent impossible de remplir toutes les « cases » des tableaux du RETEX. A noter que c'est également le cas pour les événements récents (ici le Doubs en 2018) où le bilan de la catastrophe était toujours en cours d'évaluation lors de la rédaction de ce travail.

Si les retours d'expérience permettent d'acquérir la « matière » pour construire le scénario, ils restent assez statiques et ne permettent pas de bien mettre en évidence les jeux d'acteurs, l'emboîtement des échelles de décision et finalement la cinétique de ces événements complexes. Une démarche de construction de frises chrono-systémiques (Bergeret A. et al, 2015) a donc été mise en place pour rendre dynamique les éléments recueillis dans les différents RETEX.

CAUSES ET CONSEQUENCES		
Causes	Manque de précipitations, fortes chaleurs	
Conséquences	Humaines	Nombreux morts dans les incendies
	Matérielles	Très nombreux incendies 147 millions d'arbres morts
	Economiques	2015 : 1,8 milliards de dollars de perte sèche pour l'agriculture Prix des fruits et légumes en hausse
	Environnementales	
	Sociales	« droughtshaming »
Facteurs aggravants	Très grosse consommation pour le tourisme et l'économie (golf p.e) Nombreux détournements ou vols d'eau Cultures d'amande, très friandes en eau (4L pour une amande) Reventes de « droits à l'eau » entre Etats	
Facteurs atténuants	Los Angeles, des balles pare-soleil en plastique ont permis d'économiser 1,7 millions de m ³ entre août 2015 et mars. MAIS construction de ces balles a coûté 2,9 millions de m ³ d'eau Dessalement de l'eau à San Diego	

Tabl.2 – « Causes et conséquences » pour la sécheresse de la Californie 2012-2017 (Hassini S. 2019)

1.1.2. Implémentation de frises chrono-systémiques

Développé par le Labex ITEM (Laboratoire d'Excellence Innovations et Transitions territoriales en montagne) dans les années 2010, cet outil à vocation pluridisciplinaire a pour objectif de comprendre les changements passés et à venir en intégrant sur une frise les éléments spatiaux et temporels des phénomènes étudiés (Bergeret A. et al, 2015). L'objectif est donc ici de l'utiliser pour mettre en évidence les dynamiques spatio-temporelles des crises sécheresses.

La structure de la frise chrono-systémique développée dans le cadre de ces travaux comprend 3 parties :

- le rappel des conditions environnementales (climatiques, hydrologiques et sur les ressources en eau souterraine),
- le contexte économique et social au niveau national et local, celui des acteurs économiques ainsi que les réponses sociétales,
- les décisions politiques.

Les relations de résistance, de causalité et d'adaptation sont tracées entre les différents éléments positionnés pour chacune des parties dans le temps.

Des frises ont été réalisées sur cette trame pour tous les événements étudiés et cités précédemment (Hassini S., 2019) et ont conduit à 2 modèles génériques pour une situation de sécheresse d'importance nationale puis locale. A titre d'illustration, 2 frises chrono-systémiques sont présentées ci-dessous, la première concernant la sécheresse caniculaire de l'été 2003 en France et la seconde le modèle « générique » de crise sécheresse à l'échelle locale (Fig.1 et Fig.2).

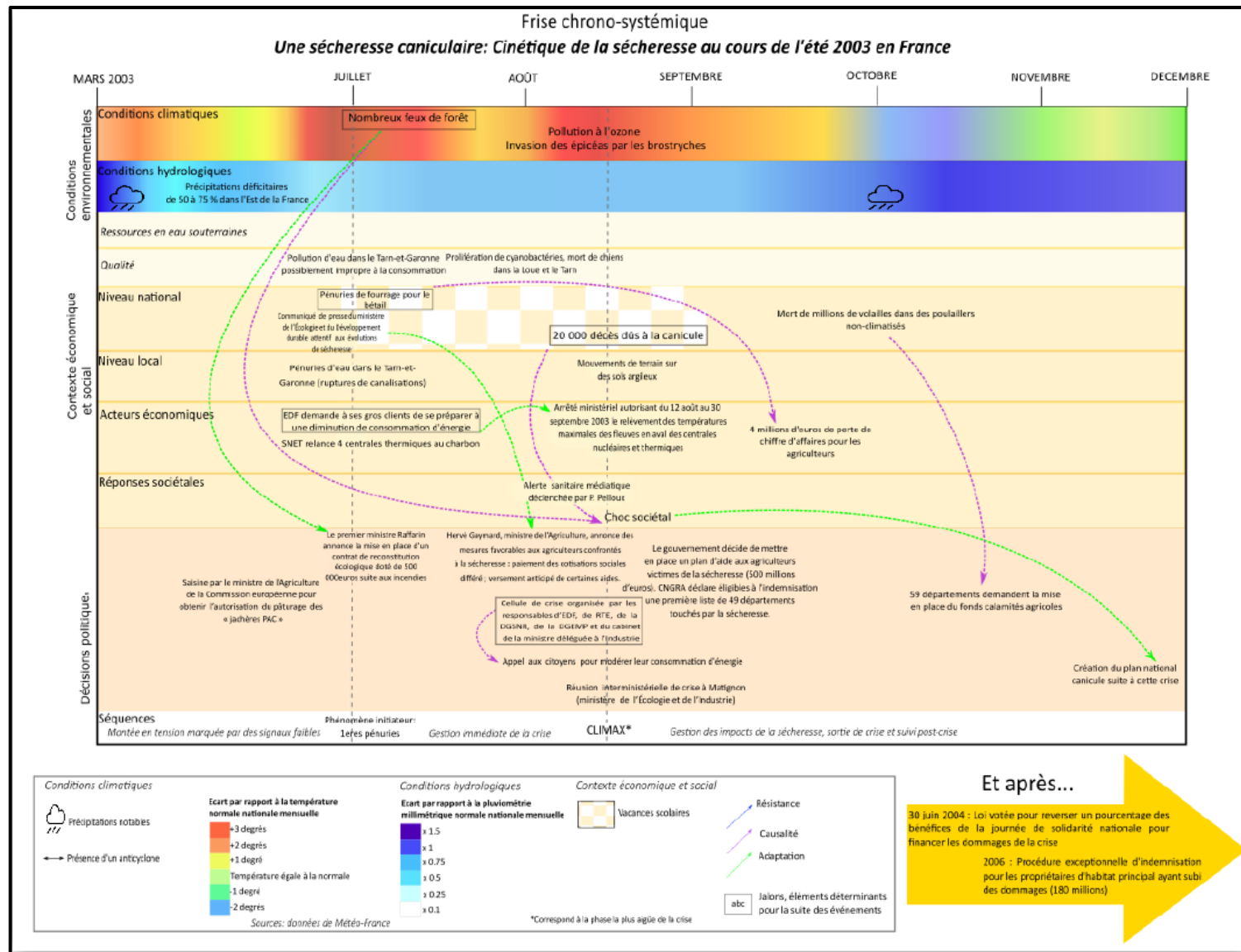


Fig.1 – Frise chrono-systémique de la sécheresse de 2003 en France (Hassini S. 2019)

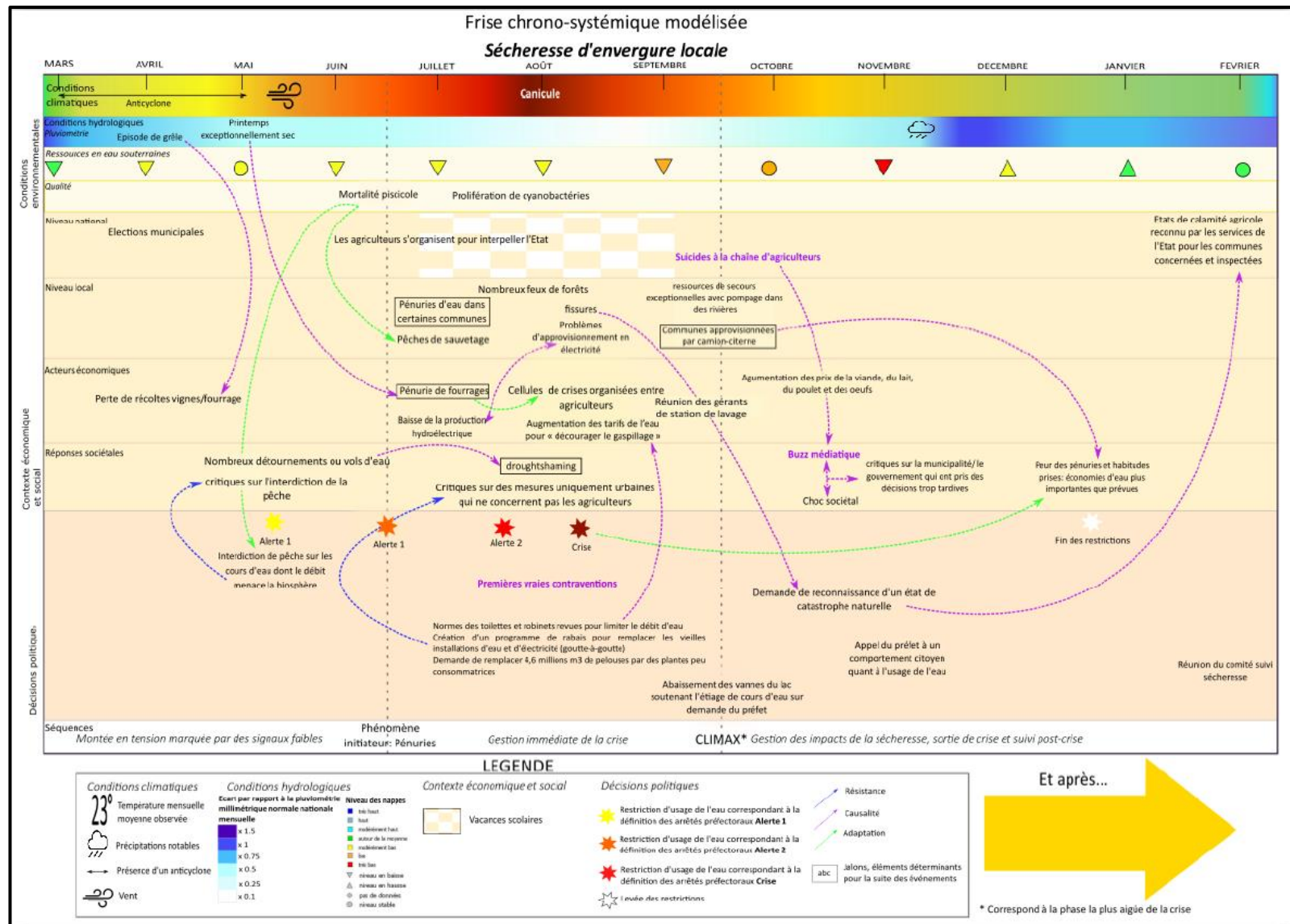


Fig.2 – Frise chrono-systémique d'une sécheresse d'envergure locale (Hassini S. 2019)

Les différents retours d'expérience réalisés ont permis de compléter les frises chrono-systémiques et notamment les versions génériques qui vont constituer les bases du scénario de gestion de crise sécheresse. Pour s'assurer du réalisme nécessaire que se doit d'avoir ce scénario un focus a été fait sur la commune cévenole de Vialas qui a connu en 2016 et 2017, 2 épisodes de sécheresse remarquables.

1.1.3. Un focus sur la commune de Vialas (48)

Vialas est une commune de 450 habitants, située dans le département de la Lozère, qui occupe la partie amont du bassin versant du Luech affluent de la Cèze. Les sécheresses des étés 2016 et 2017 ont engendré sur la commune une impossibilité d'alimenter une partie de la population en eau potable (AEP) dès le début du mois d'août. La municipalité a donc dû gérer cette crise sur les 2 années consécutives, ce qui lui a permis d'acquérir un retour d'expérience et une stratégie qui s'est affinée d'une année à l'autre.

Particulièrement intéressés par la problématique, les élus de la commune ont accepté de participer à la démarche en nous accordant un entretien dont le compte rendu est disponible dans le mémoire de Hassini S. (2019), et en acceptant de tester la simulation de gestion de crise développée par l'équipe de recherche. Ce retour d'expérience, qui cadre parfaitement avec la cible visée par le projet HydroPop, a été capital car il a permis d'adapter les éléments dégagés précédemment à l'échelle internationale et nationale aux problématiques liées plus particulièrement aux Cévennes.

Si l'ossature de construction d'un scénario de gestion de crise est restée conforme aux travaux menés classiquement sur les risques naturels, il est apparu rapidement qu'il était nécessaire pour les crises sécheresses de porter une attention particulière sur la cinétique de l'événement, généralement très lente, et sur l'absence ou le peu de situations d'urgence à traiter. La réalisation des frises chrono-systémiques a permis d'aborder ces points particuliers en décrivant différents types de cinétique et en proposant un modèle général à l'échelle nationale et locale. Il est également important de noter que le focus porté sur la commune de Vialas a permis d'assurer le réalisme du scénario, point fondamental à respecter lors de la construction d'un scénario de gestion de crise.

1.2. Une journée de simulation

Le scénario de gestion de crise sécheresse a été organisé sous la forme d'une journée de simulation pour « étaler » autant que possible cette montée en tension autour de la ressource en eau. Il s'organise autour d'une commune fictive, Saint-Hydro-du-Pop et de 3 temps de jeu. Cette simulation a été testée 2 fois dans les locaux du simulateur de gestion de crise du LSR (plateforme SimulCrisse).

1.2.1. Une commune fictive

La commune fictive de Saint-Hydro-du-Pop (Fig.3) répond à plusieurs caractéristiques nécessaires à la simulation d'une gestion de crise sécheresse sur le périmètre cévenol d'HydroPop :

- c'est une commune rurale de moyenne montagne typique des Cévennes,
- le nombre d'habitant varie de 600 à 2 500 en été, avec un centre bourg et 2 hameaux,
- elle dispose d'un cours d'eau principal avec des lieux de baignade, d'un parcours de pêche privé, et de plusieurs canyons favorables à la pratique du canyoning,

- on retrouve un camping, un centre de vacances et une piscine municipale sur le territoire ainsi qu'une station-service et de lavage,
- 2 agriculteurs sont présents sur la commune : le premier propose une activité de maraîchage située en bordure d'un béal (canal d'irrigation gravitaire) et le second plus en amont développe une activité d'élevage d'ovins,
- le réseau AEP a été dimensionné et il est représenté ici sur la Fig.3.

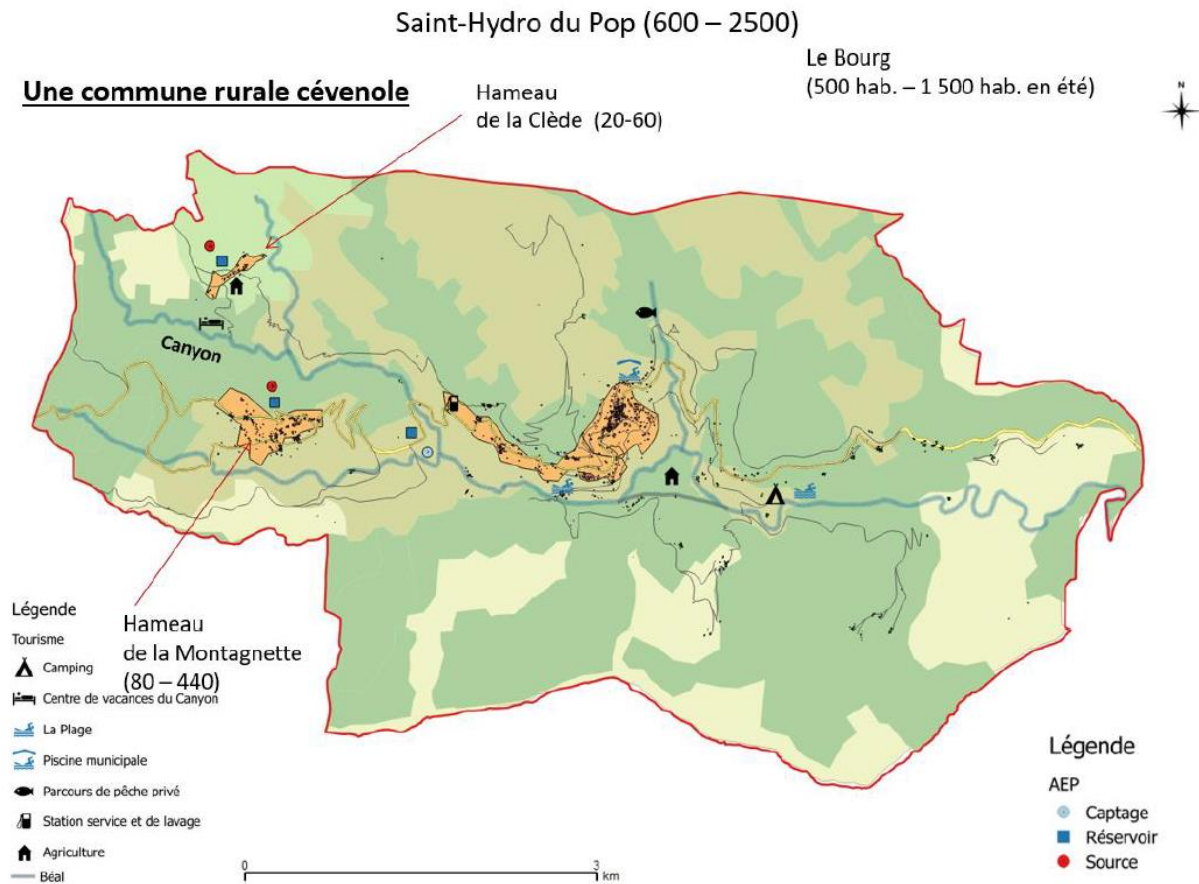


Fig.3 – Saint-Hydro-du-Pop

L'objectif avec cette commune fictive est qu'elle soit représentative d'une commune rurale de moyenne montagne cévenole et que ses principales caractéristiques puissent être assimilées rapidement par les participants à la simulation lors du briefing préalable.

1.2.2. 3 temps de jeu

La simulation de gestion de crise sécheresse s'organise sur 1 journée réunissant 6 joueurs qui vont représenter des acteurs clés de la commune (Maire, 1^{er} Adjoint, Directeur des Services Techniques...) et de 2 à 3 animateurs autour de 3 temps de jeu (Fig.4). Il s'agit en effet d'établir une progression en positionnant les membres de la cellule de crise le 15 juin, puis le 10 juillet et enfin le 10 août pour une séquence plus longue (de 1h à 1h30). Chaque temps de réflexion est organisé autour des arrêtés préfectoraux sécheresses du niveau 1 jusqu'au niveau de crise. Les 2 premiers temps de jeu sont organisés sous la forme d'une réunion d'environ 45 minutes où les joueurs prennent connaissance de la situation, des événements en cours et produisent un relevé de décision qui va influencer sur les prochains temps de jeu.

Pour les réunions du 15 juin et du 10 juillet, les interactions entre les joueurs et les animateurs sont limitées. Les animateurs assurent simplement la présentation de la situation et distribuent des cartes aux différents joueurs indiquant un événement sur la commune. Des exemples de ces cartes sont donnés sur la figure 4.

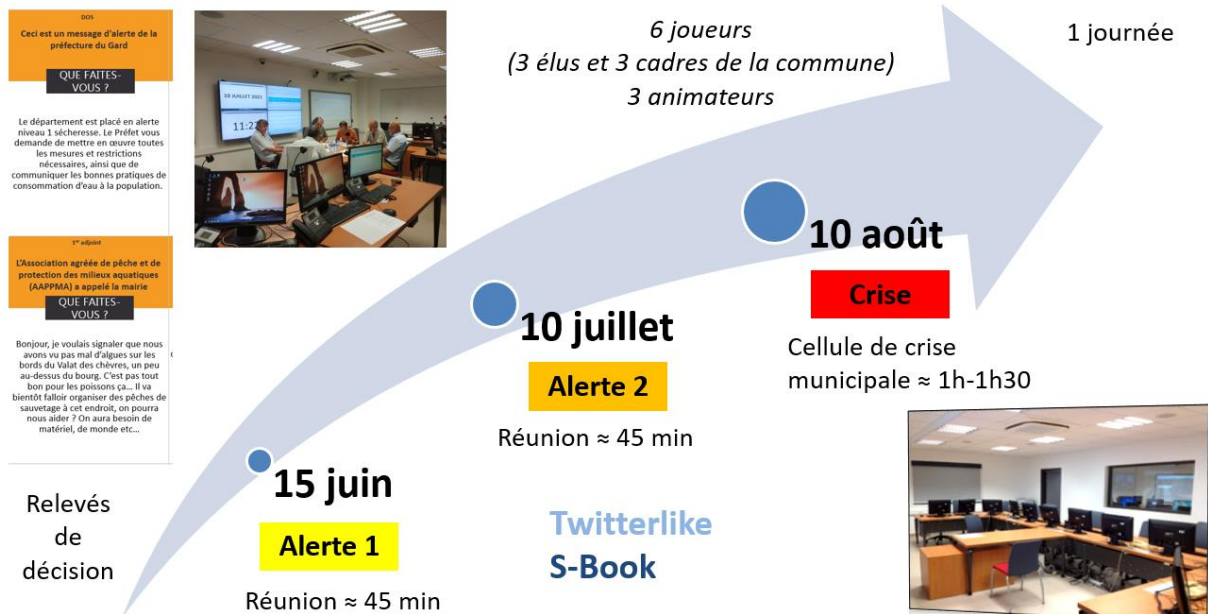


Fig.4 – Montée en puissance de la simulation de crise (Ayrat P-A. et al, 2019)

Lors de la troisième séquence les animateurs quittent la salle « joueurs » et ces derniers vont devoir s'organiser sous la forme d'une cellule de crise et activer le Plan Communal de Sauvegarde (PCS) de la commune car le niveau de crise le justifie. A partir de ce moment-là, des interactions par téléphone entre l'animation et la cellule de crise vont se mettre en places.

Le tableau suivant présente les principaux moments clés des 3 séquences qui s'articulent autour de l'évolution du niveau de crise sécheresse et proposent des événements associés que les joueurs vont devoir gérer en anticipant, autant que possible, la séquence suivante, avant d'arriver à la dernière séquence où la situation va nécessiter la mise en œuvre du PCS.

15 juin Alerte 1	10 juillet Alerte 2	10 août Crise
<input type="checkbox"/> Arrêté préfectoral avec les premières restrictions et information de la population à faire <input type="checkbox"/> Station de lavage de la commune <input type="checkbox"/> Signalement d'algues sur un valat de la commune <input type="checkbox"/> Interrogation sur l'ouverture d'un captage AEP supplémentaire, gestion du béal	<input type="checkbox"/> Arrêté préfectoral avec les premières restrictions : diminution de 50% de la consommation, premières interdictions <input type="checkbox"/> Vidange de la piscine municipale <input type="checkbox"/> Problématiques liées à l'irrigation (agrément Vs professionnel) <input type="checkbox"/> Gestion des acteurs économiques	<input type="checkbox"/> Arrêté préfectoral avec les premières restrictions et interdictions <input type="checkbox"/> Festival de Jazz dans 5 jours <input type="checkbox"/> Tension très importante sur les réserves en AEP <input type="checkbox"/> Fermeture béal et interdiction de l'irrigation <input type="checkbox"/> Interdiction de baignade <input type="checkbox"/> Interdiction de la pratique du canyoning

Tabl. 3 – Les moments clés de la simulation (Ayrat P-A. et al, 2019)

Une journée de simulation type débute donc à 9h30 avec une phase de briefing (30 minutes), suivie des 2 premières séquences (de 45 minutes chacune) avec en début d'après-midi la dernière séquence et le débriefing (d'une durée de 30 min à 1h).

1.2.3. Deux simulations réalisées

Deux journées de simulation ont été réalisées pour tester le scénario le 28 mai 2019 et le 2 juillet 2019. Le premier journée (« crash test ») avait pour objectif de tester la jouabilité et a donc rassemblé un panel de six chercheurs ou ingénieurs du domaine des jeux sérieux et/ou experts des questions liées à la ressource en eau notamment sur le domaine méditerranéen (Fig.5).



Fig.5 – Simulation du 28 mai 2019

La seconde journée (« crash test ») a rassemblé des élus (dont 3 de la commune de Vialas), un représentant d'un syndicat de bassin et un Professeur d'Université (Fig.6). Il s'agissait cette fois de s'intéresser tout particulièrement au réalisme du scénario et aux objectifs pédagogiques et opérationnels qu'il sera possible de valider au travers de cette simulation. Un film a été réalisé à cette occasion et il est disponible à cette adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=FS5Y21K9jp0> (film vue 250 fois au 26/04/2020).



Fig.6 – Simulation du 02 juillet 2019

Les premiers enseignements de ces journées tests de simulation montrent que la simulation fonctionne et apparaît réaliste notamment aux élus et gestionnaires qui ont participé. Les mécaniques de jeu mises en œuvre avec un formalisme de type “réunion” pour les 2 premières séquences et “cellule de crise” pour la dernière semblent également fonctionner avec un bémol toutefois sur la transition du passage en crise qui gagnerait à être mieux présentée. Les joueurs ont en effet mis du temps à changer l’organisation développée lors des 2 premières séquences de la matinée.

D’un commun accord les joueurs ont bien souligné l’absence de stress et de pressions pour organiser et prendre les décisions, ce qui est conforme aux objectifs souhaités qui étaient de s’extraire des conditions de gestion de crise traditionnellement simulées et se rapportant à des phénomènes à cinétique rapide (crues éclair, incendie de forêt, accident industriel, ...).

Concernant les premiers enseignements à tirer, ils sont très encourageants. Les éléments liés à la sensibilisation semblent bien pris en compte, notamment au travers de la lecture et de la mise en place des différents arrêtés sécheresses. L’observation des différentes séquences donnent également des éléments concrets qui pourraient être intégrés dans le volet sécheresse des PCS (qui restent largement à construire, comme par exemple la mise en place de dispositifs de veille des niveaux de remplissage des stockages, des procédures de distribution d’eau en bouteille à la population, des stratégies pour fermer ou ouvrir les lieux de baignade, etc....).

Le printemps 2020 devait être l’occasion de réaliser de nouvelles simulations en variant les publics (élus, gestionnaires, ingénieurs territoriaux, associations à vocation de sensibilisation à l’environnement...). Malheureusement, la crise sanitaire et les règles de distanciation sociale associées ont rendu impossible la réalisation de ces simulations. L’équipe de recherche reste toutefois mobilisée pour réaliser ces simulations et poursuivre les recherches associées sur cette thématique.

1.3. Conclusion et perspectives

Cette nouvelle tâche intégrée dans le second volet d’HydroPop avait pour objectif de simuler une tension sur la ressource en eau à l’échelle communale. Il s’agissait donc dans un premier temps de tester si l’ingénierie pédagogique et les recherches développées dans le cadre du simulateur de gestion de crise du LSR permettaient de mettre en œuvre un scénario de gestion de crise sécheresse dont les modalités en termes de cinétique notamment, sont très différentes des événements généralement simulés (crues éclair, incendies de forêt, accidents industriels, ...). Ces travaux ont été largement menés dans le cadre du travail de recherche de Hassini S. (2019) et présentés dans le cadre d’une communication internationale (Ayrat P-A. et al. 2019).

Pour réaliser cette tâche un premier travail de RETEX a été réalisé en l’associant avec une démarche originale de construction de frises chrono-systémiques. Grâce à ces frises chrono-systémiques, il a été possible de préciser la dynamique lente de ces phénomènes et de comprendre les interactions entre les acteurs et les processus de décisions associés. Ces frises ont donc permis d’établir le socle du scénario, avec un appui très important et à souligner du RETEX des élus de la commune de Vialas, qui a subi 2 sécheresses consécutives en 2016 et 2017. Il est enfin intéressant de noter que cette méthodologie combinant RETEX et frises chrono-systémiques a été reprise par des collègues de l’Université de Liège en Belgique (SPHERES, https://www.spheres.uliege.be/cms/c_4263211/fr/spheres) en collaboration avec l’équipe d’HydroPop pour une première caractérisation du risque sécheresse, risque en émergence et mal connu sur le territoire wallon (Thibaut K., 2020).

Les mécaniques de simulation proposées ont été adaptées à la cinétique de l'événement en organisant 3 temps de jeu sur 1 journée complète pour faire vivre 3 situations différentes aux joueurs sur une commune fictive. Les joueurs passent ainsi d'un format de réunions de service avec production de relevés de décisions à une situation nécessitant la mise en place d'une organisation de gestion de crise. Les 2 premiers « crash tests » réalisés lors de l'été 2019 ont été très positifs tant sur la potentialité du scénario pour des activités de sensibilisation au risque de sécheresse que pour la production de procédures à même d'optimiser cette gestion de crise.

En limitant très fortement les activités en présentiel, la crise sanitaire de la Covid-19 a empêché la réalisation de nouvelles simulations qui auraient permis une meilleure validation de l'outil. Le groupe de recherche¹ reste mobilisé autour de cette thématique et souhaite poursuivre dès que ce sera possible l'expérimentation pour envisager *in fine* un transfert de cet outil sous la forme d'une mallette pédagogique à destination des gestionnaires et/ou des associations en charge de la sensibilisation à l'environnement.

1.4. Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier toutes les personnes qui ont pris le temps de venir s'essayer à la gestion de crise sécheresse. Merci également aux *Films des Fées* pour la réalisation du film sur la simulation du 02 juillet 2019.

1.5. Références

AYRAL P.-A., FERRY G., GARCIA S., LAFORGUE P., PIATYSZEK E., SAINT-PIERRE L. & SCHMIDT I., 2015 - Elaboration du Plan Communal de Sauvegarde Multirisques de la ville d'Alès : Retours d'expérience. *In Plans Communaux de Sauvegarde et outils de gestion de crise*. 14.

AYRAL P.-A., HASSINI S., SAUVAGNARGUES S., TENA-CHOLLET F., DIDON-LESCAUT J.-F., DUBUS N. & MARTIN P., 2019 - Appréhender la gestion de crise d'un risque émergent au travers d'une simulation Application à la sécheresse dans les Cévennes. *In Colloque de l'AFGP*. Arlon, Belgique.

BERGERET A., GEORGE-MARCELPOIL E., DELANNOY J.-J. & PIAZZA-MOREL D., 2015 - L'outil-frise: une expérimentation interdisciplinaire. *Les carnets du Labex ITEM*, 180.

DIRECTION GÉNÉRALE DE LA SÉCURITÉ CIVILE ET DE LA GESTION DES CRISES, 2006 - *Guide méthodologique « La conduite du retour d'expérience, éléments techniques et opérationnels »*. Minsitère de l'Intérieur, 120 p.

HASSINI S., 2019 - *Serious game et gestion de crise : vers une nouvelle pédagogie pour anticiper le risque émergent*. Mémoire de fin d'étude. Sciences Po Toulouse, 140 p.

SAUVAGNARGUES S. & AYRAL P.-A., 2015 - Les outils et méthodes de la gestion de crise « inondation » : la protection des personnes, des biens et de l'environnement. *Géologues*, **184**, 62-67.

¹ Y compris les collègues du laboratoire SPHERES de l'Université de Liège.

SAUVAGNARGUES S., AYRAL P.-A., TENA-CHOLLET F., FREALLE N. & WASSNER T., 2019 - *Supporting municipalities for crisis management of river and coastal floods: methodology for an objective evaluation of the municipal protection plans and organization of crisis management exercises*. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*. octobre 2019. n°3-4, p. p.49-56.

SAUVAGNARGUES S., AYRAL P.-A., TENA-CHOLLET F., WASSNER T. & FREALLE N., 2017 - Effects of Dangerous Meteorological Events about Local Crisis Management: Application to Emergency Plans of Reunion Island Municipalities. *Geo-Eco-Trop*, **41**, (3), 437-454.

SAUVAGNARGUES S., LAPIERRE D., LIMOUSIN P., FREALLE N., TENA-CHOLLET F., AYRAL P.-A., BONY-DANDRIEUX A. & TIXIER J., 2018 - Concepts, Tools and Methods for Crisis Management Training. *In In Crisis Situations: Research and Innovation for Optimal Training*. 1-31.

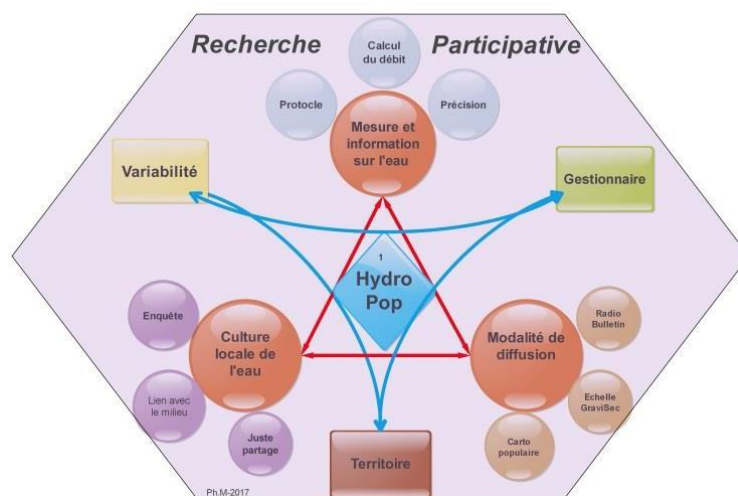
THIBAUT K., 2020 - *Les sécheresses en Belgique (Wallonie) : analyse d'un épisode récent (2018) et perception du phénomène dans le cadre du système de planification d'urgence et de gestion de crise*. Mémoire de Master 2 - Gestion des risques et des catastrophes. Université de Liège, Liège, 93 p.



De l'hydrologie populaire et participative ?

HydroPop 2 (2018-2021)

RAPPORT FINAL CHAPITRE SUR LA GESTION QUANTITATIVE DE LA RESSOURCE EN EAU (Juillet 2021)



Responsables scientifiques

Philippe MARTIN

Professeur des universités, Avignon Université, ESPACE UMR 7300,
CNRS, Avignon Université, Aix Marseille Université, Université Côte d'Azur

Pierre-Alain AYRAL

Enseignant-Chercheur, IMT Mines Alès, UMR Hydrosiences Montpellier



HydroPop-2 : Rapport final

Dans ce document ne figure uniquement que le chapitre consacré à la gestion quantitative de la ressource en eau, chapitre rédigé par Stéphane Ecrepont et Pierre-Alain Ayral.

Table des matières

1.	Gestion quantitative de la ressource en eau de surface en condition de basses eaux (SE, PAA)....	4
1.1.	Vers une prévision opérationnelle des débits d'étéage	5
1.2.	Etat de l'art	5
1.3.	Méthodologie.....	7
1.9.	Résultats	11
1.10.	Conclusion partielle.....	17
1.11.	Analyse spatiale de l'étéage : prospectives	18
1.12.	Principe général de géostatistique	19
1.13.	Principe du TOPKRIGING	20
1.14.	Les données	22
1.15.	Méthodologie.....	25
1.16.	Résultats	26
1.17.	Conclusion partielle.....	34
1.18.	Conclusion et perspectives opérationnelles	35

1. Gestion quantitative de la ressource en eau de surface en condition de basses eaux (SE, PAA)

La conjoncture d'une demande importante en eau en période estivale et d'une raréfaction naturelle de la ressource est une source de tension sur le territoire cévenol. Pour répondre à cette problématique qui dépasse largement le seul secteur géographique Méditerranéen, l'Europe a initié un plan d'action à destination des états membres, décliné à l'échelon national puis du secteur hydrographique. Ainsi, la DCE (Directive Cadre sur l'Eau) (Commission Européenne, 2000), se distingue au niveau national par l'élaboration des SDAGE (Schéma Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux) dont le SDAGE RMC (Rhône Méditerranée Corse) fait partie. Ces plans d'action nécessitent une connaissance approfondie du fonctionnement hydrologique des bassins versants, impliquant la quantification de la ressource, mais aussi l'usage qui en est fait par les populations. Ces enjeux opérationnels mobilisent ainsi à la fois les gestionnaires dans un rôle de synthèse, et le milieu de la recherche dans un rôle de développement des outils de gestion.

Sur le territoire cévenol, les EPTB (Etablissement Public Territorial de Bassin) des Gardons et de la Cèze sont chargés de coordonner la mise en place de ces stratégies de gestion. Sur le volet de la quantification de la ressource en eau, un travail a été mené dans le cadre du PGRE (Programme de Gestion de la Ressource en Eau) à partir d'une analyse de la donnée hydrométrique disponible, et d'enquêtes auprès des usagers (EPTB Cèze, 2018; EPTB Gardons, 2018). Les résultats de ces études ont permis l'estimation de la ressource disponible à l'échelle des bassins versants supervisés par les services de l'état, illustrés par des fiches de synthèse (https://www.les-gardons.fr/wp-content/uploads/Fiches_synthese_ssbv.pdf). La finalité de ces études vise à la mise en place de procédure d'optimisation de l'utilisation de l'eau en période de tension (agriculture, AEP, usage touristique).

Compte tenu de la place prépondérante de l'eau dans le fonctionnement de l'ensemble des activités estivales, nous comprendrons ici l'enjeu d'établir les valeurs statistiques d'étiage robustes dont découlent d'une part l'estimation des volumes prélevables, d'autre part la prévision de l'étiage. Ce savoir est d'autant plus important qu'il tend à évoluer avec le changement climatique (Blöschl G. et al., 2019). Les conclusions des PGRE restent cependant limitées aux bassins supervisés par les services de l'état, or il est admis que les comportements hydrologiques sont fortement variables dans l'espace et dans le temps et tendent à évoluer selon la taille du bassin versant (Beven K. J., 2000; Blöschl G., 2006; Blöschl G. et al., 2013). Les nouvelles stations hydrométriques installées dans le cadre de HydroPop répondent à ces problématiques grâce à i) la densification spatiale du réseau d'observation, ii) une mesure de haute qualité pensée pour les basses eaux. Ces deux avantages ouvrent des pistes intéressantes de modélisation concernant la prévision de l'étiage et la spatialisation de l'information aux bassins non-jaugés (bassins versants partiellement ou pas du tout jaugés).

Les deux sections suivantes abordent ces possibilités opérationnelles à partir de méthodes déjà existantes en hydrologie : l'analyse de récession, et la géostatistique appliquée à l'hydrologie.

1.1. Vers une prévision opérationnelle des débits d'étiage

1.1.1. Etat de l'art

Il est le propre des Sciences, et de l'Homme de comprendre comment s'organisent les systèmes dans la nature. Comprendre par curiosité, comprendre pour maîtriser, comprendre pour se protéger et protéger cette organisation. En effet notre environnement repose sur un équilibre, dynamique qui plus est, sans cesse sous la contrainte du climat, du vivant, et plus récemment de l'homme. Cet équilibre se retrouve sous bien des formes physiques (météorologie, règne animal et végétal, océans...) ou morales (société, psychologie, humeurs...). Plus étonnant, l'équilibre peut être à l'interface de ces deux parties, et c'est typiquement le cas de la ressource en eau, génératrice de bienfaits sur les milieux par sa présence ou au contraire d'impacts négatifs par son absence/excès. C'est en étudiant l'équilibre de cette ressource que l'homme peut alors tendre à établir des conditions favorables pour l'environnement et les sociétés bâties autour.

L'excès d'eau, aussi bref que dangereux, a fait l'objet de nombreuses études, et c'est particulièrement vrai dans nos régions cévenoles. L'inverse cependant est moins vrai. Les thématiques scientifiques abordées par les chercheurs sont évidemment ancrées dans leur territoire, or le sujet reste relativement récent en France. En revanche cette question devient prépondérante sur le contour méditerranéen, en lien avec un climat plus sec et une ressource distribuée de manière bien moins homogène au cours de l'année. Dans un contexte de hausse des températures, une accentuation des extrêmes hydrométéorologiques est à envisager, un constat déjà établi au sujet des crues en région méditerranée (Blöschl G. et al., 2019) mais déjà souligné également pour les sécheresses (Aubé D., 2017). Il convient alors d'étudier le processus de tarissement des réservoirs naturels d'eau avec l'ambition de l'anticiper.

Le tarissement des cours d'eau, également appelé récession, a fait l'objet d'une pléthore d'études au cours du XIX^{ème} siècle, dans la lignée des travaux de Darcy (Darcy H. P. G., 1856). Les premiers se sont attaqués au comportement d'une nappe libre, superficielle, reposant sur une surface imperméable et alimentée uniquement par les pluies. Au cours de la période estivale, sèche, l'apport par la surface sur cette nappe tend à devenir nul, la pluie ne percolant plus (seconde loi de Dausse M. (Lechallas M. C., 1884)), et il s'établit alors un régime permanent, non-influencé (Maillet E. T., 1905). On peut alors établir qu'il existe une relation entre le volume de la nappe V (m^3) de hauteur h (m) et le débit de la source Q (m^3/s) (Eq.1).

$$V = f(Q) \quad (1)$$

D'après Hall F. R. (1968) repris par Tallaksen L. (1995) et Dewandel B. et al., (2003), deux familles d'approches existent pour établir cette relation. En premier lieu, il revient de citer les approches analytiques basées sur les travaux de Boussinesq J. (1877) issues de Darcy H. P. G. (1856). Boussinesq J. y développe les équations différentielles de diffusion des flux d'eau dans un aquifère. Cependant, la non-linéarité de ces équations les rendent difficiles à résoudre. Grâce à des hypothèses simplificatrices il parvient néanmoins à formuler une solution approximative linéaire de forme exponentielle (Eq. 2), et une solution exacte non-linéaire, de forme quadratique (Eq. 3) (Boussinesq J., 1904).

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (2)$$

$$Q(t) = \frac{Q_0}{(1+\sigma t)^2} \quad (3)$$

Dans ses termes, la vidange de la nappe est une fonction d'un état initial (la quantité d'eau stockée) associé au débit Q_0 (m^3/s) mesuré en début de récession et d'un coefficient de tarissement α (Eq. 2) ou

σ (Eq. 3), sans unité, qui dépend de la géométrie du fond imperméable et de la perméabilité du terrain (Boussinesq J., 1904). Une synthèse de ces équations est proposée par Dewandel B. et al., (2003).

Horton R. E. (1933) a également suggéré la fonction « double exponentielle » (Eq. 4) obtenue par transformation de l'équation 2 et l'ajout en exposant du coefficient m (sans unité).

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t^m} \quad (4)$$

Dans certains cas (Boussinesq J., 1904; Maillet, 1905), la vidange peut résulter d'un réservoir constant et d'un réservoir décroissant, et l'addition d'un terme constant C (m^3/s) est adéquat (Eq. 5 & 6). Dans d'autres cas (Boussinesq J., 1904), une combinaison de relations linéaires ou non-linéaires peut convenir (Eq. 7).

$$Q(t) = (Q_0 - C)e^{-\alpha t} + C \quad (5)$$

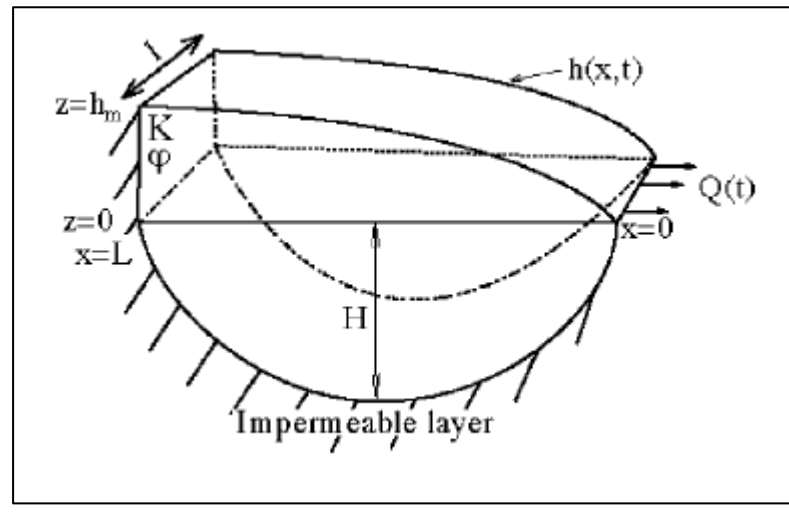
$$Q(t) = \frac{Q_0 - C}{(1 + \sigma t)^2} + C \quad (6)$$

$$Q(t) = Q_{0,i} e^{-\alpha_i t} + Q_{0,j} e^{-\alpha_j t} \quad (7)$$

Simplifier un système complexe tel qu'un bassin versant à une seule équation n'est pas anodin, le nombre de modèles retrouvés dans la littérature l'illustre bien : il n'existe pas de cadre unifié pour répondre à cette diversité de fonctionnements (Beven K. J., 2000). Plusieurs aspects constituent des limites à la prévision des basses eaux par ce type d'approche.

En premier lieu, il convient de discuter de la valeur du coefficient de tarissement α . Selon Boussinesq J. (1877, 1904), ce coefficient est propre à la géométrie de la nappe. Nous faisons ici référence à la profondeur, à la forme du substratum imperméable, ainsi qu'à la longueur/largeur et la pente. α est également dépendant des propriétés hydrodynamiques du sol et de la zone altérée, traduites par la porosité efficace et la perméabilité. À partir de cas théoriques (Fig.1), Boussinesq J. a ainsi obtenu les relations 8 et 9 pour respectivement un substratum concave ou plat. Nous comprenons donc ici l'importance de la géologie concernant la valeur absolue de ce coefficient. Vient ensuite le climat, la végétation, et l'homme, qui, au cours du temps, ont façonné la morphologie du paysage que l'on connaît aujourd'hui (Blöschl G. & Merz, R. 2010; Wang D. & Wu L., 2012; Xu X. et al., 2012). Ainsi, Horton R. E. (1933) précise que : « la végétation naturelle d'une région tend à se développer jusqu'à un point où elle pourra utiliser toute l'eau capable de s'infiltrer ».

$$\alpha = \frac{\pi^2 KH}{4\phi L^2} \quad (8)$$



$$\alpha = \frac{1,115Kh_m}{\phi L^2} \quad (9)$$

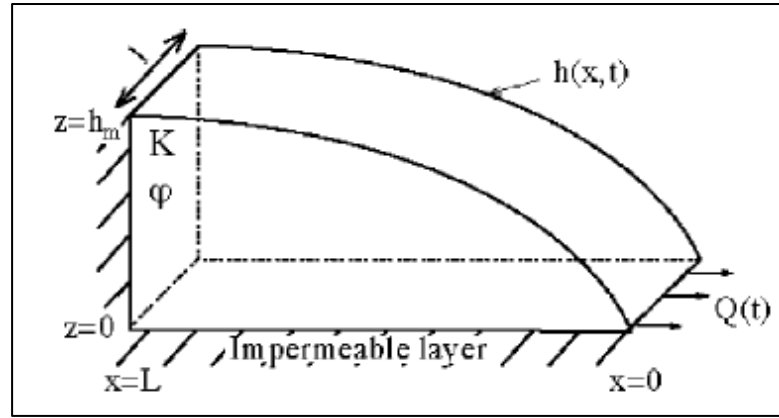


Fig.1 – Raisonnement analytique et formulation du coefficient de tarissement selon Boussinesq J. (tiré de Dewandel B. et al., (2003))

En second lieu, nous pouvons discuter de l'adaptabilité du raisonnement analytique développé sur nappe libre à l'entité bassin versant. Les études analytiques se sont penchées sur la résolution de cas idéalisés, souvent représentés par la vidange d'une nappe unique, et bornés par une couche imperméable. En réalité, il est fort probable que la mesure observée dans les cours d'eau soit la résultante de multiples sources aux comportements propres. Les bassins versants karstiques illustrent d'ailleurs bien cette problématique. Nous pouvons y observer plusieurs types de récessions (les comportements non-linéaires), dont l'origine s'explique par la diversité des voies d'écoulements telles que la matrice poreuse ou la fracturation (Schoeller H., 1967). Nous ne pouvons cependant résumer les comportements non-linéaires à la seule explication de la nature du substrat et de sa géométrie. Le bassin versant est par définition un collecteur d'eau en provenance de versants, défini par des limites géométriques complexes, géologiques ou topographiques. En conséquence, le signal observé à l'exutoire traduit sous la forme d'un hydrogramme, est un signal composite, et cela est d'autant plus vrai à mesure que le réseau hydrographique se développe. Ainsi, la non-linéarité résulte de nombreuses sources difficiles à distinguer, telles que le « report d'un stockage d'eau issu d'une période de recharge antérieure, la multiplicité des origines de l'eau, la variabilité zonale de la recharge par la pluie, les stocks des champs d'expansion de crue ou des rives, ou l'évapotranspiration. » (Hall F. R., 1968; Ineson J. & Downing R., 1964; Riggs H. C., 1964).

Ces difficultés nécessitent en premier lieu une observation des récessions afin d'en identifier des comportements types, et en second lieu, de proposer une méthodologie adaptée.

1.1.2. Méthodologie

Dans cette sous-section, nous décrirons dans un premier temps les données utilisées, puis proposons une méthodologie qui permettra dans un premier temps de détecter les séquences de récession, leur analyse et enfin leur modélisation.

1.1.3. Les données

L'étude du tarissement nécessite une donnée de bonne qualité. Cela est d'autant plus vrai à mesure que l'on approche de l'étiage, et des hauteurs d'eau minimales rendant la tâche plus ardue. Pour cette première section, nous utiliserons seulement les données du programme HydroPop, bien que les données du réseau national soient disponibles. Le réseau HydroPop a en effet été conçu dans cette optique, contrairement aux stations du réseau national plus axées sur la mesure des hautes eaux, nous nous attendons donc à avoir une information de meilleure qualité pour cet exercice.

1.1.4. Détermination du début de la récession

La période de tarissement hydrologique se définit selon l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) par « une décroissance du débit d'eau souterraine allant aux eaux de surface due à la diminution de la réserve d'eau souterraine pendant des périodes sans alimentation ». Cette définition invite donc à déterminer ce qu'est une période de non-alimentation. À la première intuition, une approche systémique incite à dire que cette époque de l'année hydrologique se situerait au printemps, lorsque le régime pluviométrique diminue et que la végétation se développe. Plus globalement cela se traduit sur le bilan hydrologique, par une inversion du rapport entre pluie et évapotranspiration, menant à termes au tarissement des cours d'eau. Rappelons la loi de Dausse M. (1842), dont une interprétation est proposée par Horton R. E. (1933) : « il n'y a pas d'accrétion vers la nappe phréatique aussi longtemps que les pertes d'eau excèdent la pluie ». Cette limite est délicate à définir, car la déconnexion entre la nappe et la subsurface ne peut s'observer que par la mesure, ou plus récemment par les processus hydrogéochimiques (Aubert A. H. et al., 2013; Molenat J. et al., 2008). De plus, cette hypothèse semble critiquable, plus particulièrement en milieu humide ou semi-humide (Roessel B., 1950). Le climat méditerranéen nous permet cependant d'être relativement confiant au regard de cette contrainte. En l'absence d'informations précises, il est nécessaire de se rapprocher du ressenti sur le terrain, et de l'observation des hydrogrammes.

Compte tenu de sa position géographique centrale, et de la disponibilité exceptionnelle de la donnée toute l'année¹, la station hydrométrique du Galeizon à l'Aube Morte est idéale pour cela (Fig.2).

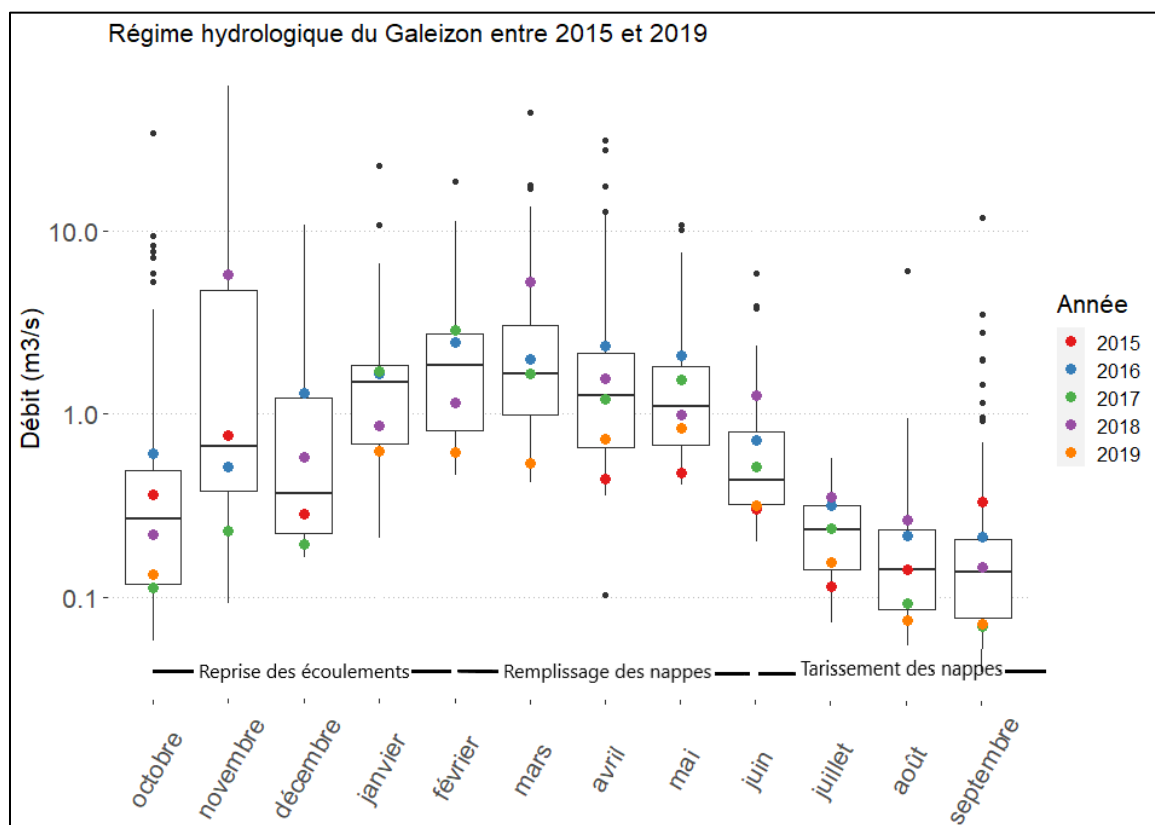


Fig.2 – Le Galeizon à l'Aube Morte est représentatif du comportement hydrologique des bassins versants cévenols et du climat semi-aride méditerranéen. Graphique semi-log.

¹ Pour rappel les stations de suivi des étiages sont généralement mises en place à la fin du printemps jusqu'au premiers épisodes pluvieux de la fin de l'été ou du début de l'automne.

En France, l'année hydrologique débute au 1^{er} septembre. Sur le Galeizon, le mois de septembre correspond statistiquement (médiane) aux débits mensuels les plus faibles. Il marque également la reprise des écoulements suite aux premiers épisodes orageux et la diminution des pertes par évapotranspiration. Les mois d'octobre à décembre sont marqués par une hausse des débits mensuels et notamment d'une grande variabilité interannuelle, expliquée par l'occurrence d'épisodes cévenols. Cela est d'autant plus vrai que les débits mensuels diminuent en décembre, indiquant une origine de l'eau essentiellement superficielle. Les mois de janvier à avril traduisent une augmentation graduelle du ruissellement avec un maximum statistique en mars. À partir d'avril-mai, les débits mensuels diminuent graduellement jusqu'à l'étiage en août-septembre. Le maximum hydrologique mensuel, en avril, indique la période de l'année où les nappes atteignent leur remplissage maximal. Le début de la récession hydrologique s'observe d'avril à juin selon l'année.

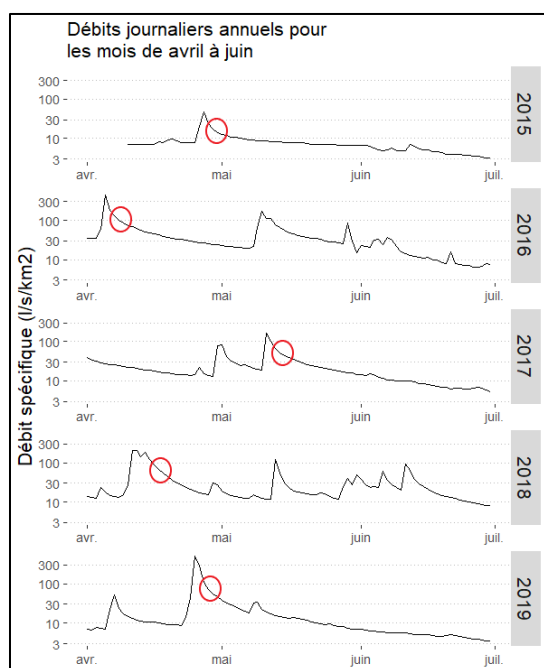


Fig.3 – Zoom sur les récessions du Galeizon. Les cercles rouges montrent le début du tarissement annuel repéré à l'œil.

La date définitive est alors choisie après un délai de 5 jours suivant le débit de pointe. Ce delta de temps semble correspondre au point d'inflexion généralement observé dans l'hydrogramme, correspondant au tarissement superficiel.

1.1.5. Construction de la courbe de récession

Il existe différentes manières de construire la courbe de tarissement, chacune comportant certains avantages et inconvénients, tels que décrits par Lang C. (2006).

- La méthode des courbes enveloppes, consiste à rejoindre simplement les points bas d'un hydrogramme dans un graphique semi-log. Dans cette approche, nous faisons fi des épisodes de soutien hydrologique par les crues, risquant ainsi de décrire d'autres processus que le tarissement pur.
- La méthode des courbes séquences, plus rigoureuse, consiste à identifier indépendamment les événements de récession, précédés d'un événement pluvieux, et caractérisés par une absence de pluie. Ici, il est nécessaire d'analyser les hyétogrammes. Nous sommes donc tributaires de données supplémentaires.

- La méthode de la courbe de décroissance (Lang C., 2006), consiste enfin à construire une courbe annuelle débutant par le plus fort débit observé entre janvier et juin. Ensuite, seuls les débits inférieurs à celui qui précède sont conservés, et ce jusqu'au plus petit de l'année en cours.

Compte tenu des données disponibles dans HydroPop, nous choisirons la méthode de la courbe de décroissance, facilement automatisable et généralisable. Un exemple de construction de la courbe de récession pour l'année 2017 est présenté sur la figure 4 a et b. Le tarissement commence le 17 mai et se termine le 8 septembre. A partir de la courbe de récession (Fig.4b), et d'une des équations 2 à 7 nous pouvons alors établir le coefficient de tarissement α expérimental.

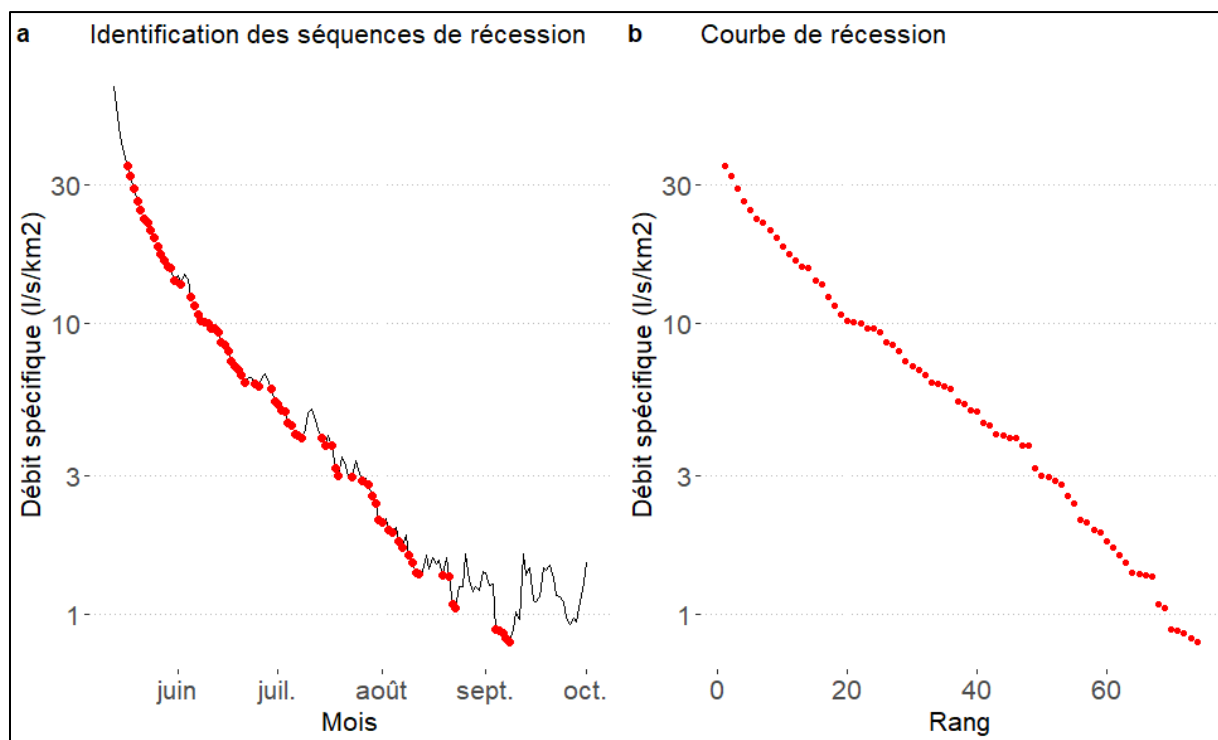


Fig.4 – Application de la méthode « courbe de décroissance » sur le Galeizon à l'Aube Morte en 2017. Une première étape d'identification des séquences de récession a) est suivie de leur agrégation b). Le comportement exponentiel décroissant est ici bien visible.

1.1.6. Détermination de la constante de récession

Deux approches ont été présentées au préalable. L'approche analytique, physique, nécessite de connaître les propriétés des bassins versants, tâche difficile et coûteuse. On lui préférera les approches empiriques, plus intuitives, qui se basent sur l'étude de la récession des hydrogrammes. Le choix d'une équation devrait alors être guidée par la connaissance du milieu et l'analyse hydrologique. Bien que la solution exponentielle ne soit qu'approximative (Eq. 2), elle semble adaptée dans les cas où les flux souterrains sont essentiellement verticaux. Au contraire, la solution exacte quadratique (Eq. 3) est efficace lorsqu'une dominance des flux horizontaux est constatée (Dewandel B. et al., 2003). Une explication à cette interprétation est donnée par Dewandel B. et al. (2003), selon eux l'équation quadratique correspond à la vidange d'un aquifère superficiel borné par un substratum imperméable situé à l'altitude de l'exutoire. Ils concluent que l'anisotropie de la perméabilité de l'aquifère impacte la forme de la récession. Il conviendra dans un premier temps de qualifier la linéarité de la courbe de récession afin d'y développer une équation adaptée.

Le coefficient de tarissement α est obtenu ensuite empiriquement par résolution d'une équation de tarissement pour l'ensemble des débits $Q(t_0)$ et $Q(t_0+dt)$ de la courbe de récession.

1.1.7. Synthèse méthodologique

Nous proposons ainsi la méthodologie systématique suivante pour l'analyse des récessions :

- Estimation de la date d'entrée en récession t_0 et du débit associé Q_0 .
- Identification des séquences de récession (Fig.4a).
- Construction de la courbe de récession (Fig.4b).
- Estimation du coefficient de tarissement α (forme exponentielle), σ (forme quadratique).

Cette méthodologie sera mise en place sur les données issues des stations des cours d'eau suivants : Le Galeizon (AUBE), l'Auzonnet (AUZO), Le Luech (CHAM), l'Homol (HOMO) La Cèze amont (FOU), La Gagnière (GANI), La Salendrinque amont (LASA), aval (THOI), les Gardons de Mialet (ROUC), de Sainte-Croix (SCVF) de Saint-Etienne (SEVF) de Saint-Jean du Gard à Saint-André-de-Valborgne (SAVA) et à Saint-Jean-du-Gard (SJDG) et enfin de la Borgne (SAUM). La station de Cambous (Gardon d'Alès, CAMB) n'est pas ici prise en compte car elle est située en aval du barrage de Sainte-Cécile-d'Andorge et bénéficie donc d'un soutien d'étiage et donc de débits influencés.

1.1.8. Résultats

Un exemple de courbes de récessions obtenues sur l'année 2019 est visible en figure 5. Nous pouvons remarquer dans un premier temps que la forme semi-logarithmique du graphique met en évidence des relations quasi-rectilignes. C'est un résultat cohérent avec la théorie d'une tarissement exponentiel décroissant. A l'œil, la forme exponentielle semble particulièrement adaptée sur HOMO, ROUC, THOI, LASA. Néanmoins, d'autres bassins versants présentent une légère concavité signalant une récession non-linéaire de type quadratique (AUBE, SCVF, SEVF, CHAM, SAUM). La pente de la courbe de récession indique la vitesse à laquelle le(s) réservoir(s) se vidangent. Ainsi l'analyse graphique révèle que cette vitesse est variable entre bassins. Ce phénomène est très visible sur GANI. D'autres types de non-linéarités sont apparentes sur SJDG, LASA, et plus particulièrement AUZO, notamment en période d'étiage. Ces bassins versants sont influencés et l'on pourrait suspecter un prélèvement anthropique non-négligeable expliquant un tarissement soudainement plus rapide en période de tension (juillet-août).

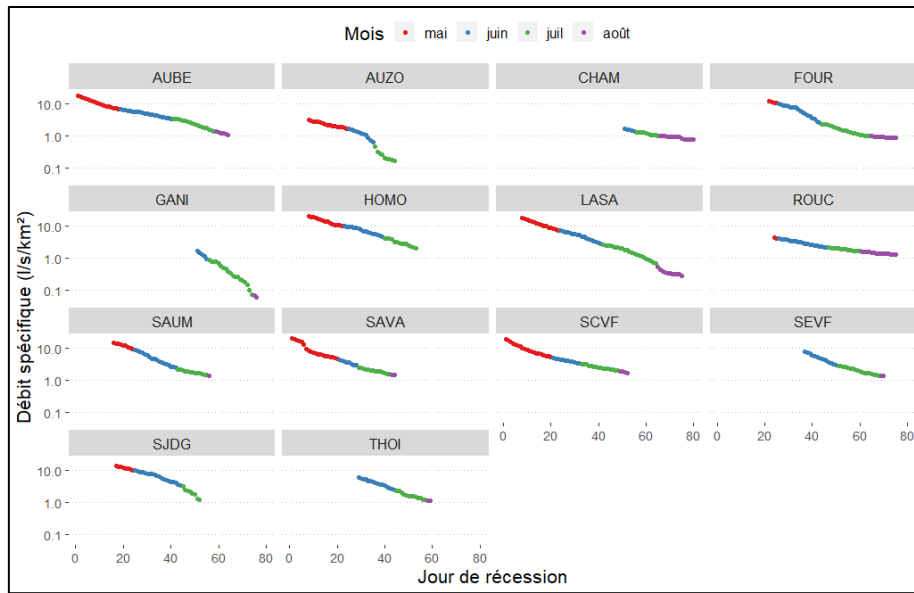


Fig.5 – Courbes de récessions pour l'année 2019. Le jour 0 de récession est pris comme la première date de récession observée toutes stations confondues afin d'éviter une éventuelle variabilité infra-saisonnière.

Ainsi, il existe plusieurs types de récessions au niveau des stations HydroPoP et l'utilisation d'une unique équation de vidange ne semble pas adéquat. Il est donc intéressant de développer plusieurs formulations afin de confirmer la linéarité ou non des récessions. Nous proposons donc d'adapter les équations exponentielle (Eq. 2) et quadratiques (Eq. 3), la première étant linéaire, contrairement à la seconde. Un tableau récapitulatif des constantes α (exponentielle) et σ (quadratique) de récession obtenue entre 2015 et 2019 est présenté ci-dessous (Tabl. 1).

Station	2015		2016		2017		2018		2019		Moyenne		CV (%)	
	α	σ	α	σ	α	σ	α	σ	α	σ	α	σ	α	σ
ROUC	0,068	0,049	0,069	0,054	0,038	0,024	0,043	0,028	0,028	0,017	0,049	0,034	37	47
HOMO									0,05	0,035	0,050	0,035		
SAVA	0,034	0,018	0,042	0,027	0,049	0,038	0,046	0,031	0,079	0,061	0,050	0,035	34	47
AUBE	0,028	0,018	0,086	0,056	0,06	0,05	0,043	0,03	0,051	0,037	0,054	0,038	41	40
AUZO									0,054	0,042	0,054	0,042		
THOI	0,054	0,038	0,048	0,03	0,073	0,044	0,055	0,038	0,058	0,038	0,058	0,038	16	13
SCVF			0,048	0,029	0,064	0,051	0,054	0,036	0,067	0,049	0,058	0,041	15	26
SJDG	0,066	0,05	0,057	0,032	0,064	0,049	0,056	0,039	0,049	0,034	0,058	0,041	12	21
FOUR									0,059	0,048	0,059	0,048		
CHAM	0,057	0,034	0,072	0,048	0,061	0,042	0,079	0,058	0,034	0,019	0,061	0,040	28	36
SEVF	0,074	0,057	0,047	0,033	0,056	0,047	0,066	0,048	0,067	0,044	0,062	0,046	17	19
LASA	0,035	0,023	0,069	0,044	0,095	0,076	0,073	0,052	0,057	0,054	0,066	0,050	33	38
SAUM	0,078	0,056	0,077	0,045	0,073	0,057	0,063	0,039	0,064	0,047	0,071	0,049	10	16
GANI									0,118	0,097	0,118	0,097		
Moyenne	0,055	0,038	0,062	0,040	0,063	0,048	0,058	0,040	0,060	0,044	0,059	0,042	24	30
CV (%)	34	41	24	27	24	28	21	25	36	44				

Tabl.1 – Valeurs moyennes des constantes de récession pour les formes exponentielle (α) et quadratique (σ). Les deux dernières colonnes correspondent aux coefficients de variation interannuels. Le tableau est classé par ordre croissant selon la moyenne des constantes α inter-bassins.

Le tableau étant ordonné en fonction du taux de vidange moyen, on observe très vite qu'une première moitié des bassins versants présente un comportement identique avec des valeurs α proches de 0,05 et σ proches de 0,04. Ces derniers ont un temps τ de « demi-vidange » (temps nécessaire pour réduire le débit par 2) relativement élevé, de l'ordre de 13 à 20 jours, selon l'équation 10, obtenue à partir de l'équation 2. A l'inverse, la seconde moitié de l'échantillon montre des valeurs α proches de 0,07 et σ proches de 0,05, donnant des τ allant de 9 à 12 jours, voire 6 jours pour le plus extrême (GANI). Bien que l'ordre soit globalement conservé en se basant sur les σ moyens plutôt que les α moyens, certains bassins versants montrent des différences notables. C'est par exemple le cas de THOI, CHAM et SAUM dont les constantes σ auraient donné un classement différent. Ces premiers résultats montrent l'homogénéité géologique de la région (schistes), distinguant nettement GANI (grès, gneiss). LASA draine une zone granitique et nous aurions pu nous attendre à des constantes légèrement différentes de ses voisins. Ses constantes sont en effet supérieures à la moyenne régionale, mais en rien comparable avec l'écart affiché par GANI.

$$\tau = -\frac{\log 0,5}{\alpha} \quad (10)$$

Au niveau annuel, nous remarquons également une certaine variabilité des constantes de tarissement, visible sur les deux dernières colonnes. Cette variabilité est indépendante de la valeur moyenne absolue du taux de vidange. La variabilité interannuelle, exprimée par le coefficient de variation CV, s'étend pour les α entre 10 % au minimum, jusqu'à 41 % au maximum, et entre 13 et 47 % pour les σ . Globalement, la variabilité interannuelle est supérieure pour σ que pour α . Les plus faibles variations sont observées sur THOI, SJDG, SEVF et SAUM alors que les plus élevées concernent ROUC, SAVA, CHAM et LASA. Sur les années 2015, 2016, 2017, 2018, les coefficients de variation s'échelonnent pour chaque année entre 21 % (2018) et 41 % (2015). L'année hydrologique 2015 fût particulière dans la mesure où les nappes n'ont que peu bénéficié de la recharge hivernale. Les débits étaient donc déjà très faibles en début de récession. Mais la reprise des écoulements a eu lieu précocement au mois d'août. Plus généralement, une valeur moyenne des constantes de tarissement semble suffisante pour procéder à une prévision de l'étiage. Le coefficient de variation interannuel donne quant à lui une information sur la distribution statistique de cette constante, permettant de quantifier l'incertitude au terme par exemple d'une prévision d'ensemble.

La qualité d'ajustement des deux lois de vidange est quantifiée à l'aide du NRMSE (*Normalized Relative Mean Squared Error*), exprimé en pourcentage par l'équation 11. Q_{sim} et Q_{obs} sont respectivement les débits simulés et observés en l/s, Q_{min} et Q_{max} les débits minimums et maximums observés en l/s, t est le pas de temps, N l'échéance de prédiction maximale en jours. Plus la valeur est proche de zéro, meilleur est l'ajustement.

$$NRMSE = 100 \times \frac{\sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_{sim} - Q_{obs})^2}{N}}}{Q_{max} - Q_{min}} \quad (11)$$

Station	NRMSE 2015		NRMSE 2016		NRMSE 2017		NRMSE 2018		NRMSE 2019		Moyenne	
	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B	M	B
AUZO									29	43	29	43
GANI									11	23	11	23
FOUR									15	26	15	26
THOI	12	23	15	24	25	19	9	20	7	15	14	20
HOMO									10	15	10	15
SJDG	8	13	21	15	5	14	8	12	17	28	12	16
LASA	7	12	13	8	14	11	18	6	6	28	12	13
SAVA	24	19	4	13	8	17	19	5	24	16	16	14
SEVF	13	13	9	10	13	14	12	8	16	5	13	10
CHAM	15	14	12	10	7	11	13	11	33	21	16	13
ROUC	10	13	26	12	7	11	14	5	15	7	14	10
AUBE	22	29	33	17	18	10	22	8	21	11	23	15
SCVF			29	16	14	14	17	16	27	8	22	14
SAUM	25	11	53	36	31	11	14	11	10	21	27	18
Moyenne	15	16	22	16	14	13	15	10	17	19	17	15

Tabl.2 – Evaluation de la qualité d'ajustement des équations exponentielles (M) et quadratiques (B).

Les scores sont donnés en pourcentage d'erreur. Le tableau est classé selon les deux dernières colonnes : les premiers bassins versants sont mieux représentés par l'équation exponentielle à l'inverse des derniers bassins versants qui correspondent plutôt, en moyenne, à un tarissement de forme quadratique.

Les résultats d'ajustement présentés dans le tableau 2 confortent l'idée d'une comparaison des deux méthodes. Une première série de bassins versants (AUZO à SJDG) est en moyenne plutôt caractérisée par un fonctionnement exponentiel décroissant. Une seconde sélection (SEVF à SAUM) est au contraire mieux représentée par la fonction quadratique. LASA et SAVA sont quant à eux tout aussi bien représentés, en moyenne, par les deux équations. Au niveau interannuel les deux méthodes ne sont pas significativement différentes (NRMSE = 17 % pour la forme exponentielle vs. 15 % pour la forme quadratique). Ce rapport est globalement conservé chaque année, sauf pour 2016 et 2018 où la forme quadratique s'avère légèrement plus efficace.

Bien que nous ne disposions pas de données précises pour juger de la cause de cette différence, il semblerait tout de même que les gardons soient plus propices à un tarissement quadratique, contrairement aux sous-bassins de la Cèze et de la Salendrinque. Ces différentes entités hydrographiques se distinguent par leur géologie. Ainsi les gardons présentent globalement un substrat schisteux, la Salendrinque est plutôt cristallin, alors que les bassins de la Cèze sont composites (amont cristallin et schistes, aval calcaire, gneiss, grès). Une géologie composite pourrait laisser supposer différents réservoirs, et en conséquence un tarissement composé (chaque réservoir à sa propre loi de tarissement). Cela peut éventuellement apparaître sur FOUR, mais une seule année d'observation n'est point suffisante pour en tirer une conclusion.

Le calage des lois de tarissement par bassin versant sur plusieurs années consécutives au moyen d'une méthode automatisée aura permis l'estimation d'une constante de tarissement moyenne, et d'une information sur la variabilité interannuelle associée. Ainsi, nous proposons à la suite un exemple de prévision du tarissement présentant une approche *saisonnière et bimensuelle*.

- *L'approche saisonnière* permet, une fois la date de début de tarissement identifiée selon la méthode proposée en 3.1.2, de simuler la décroissance des débits jusqu'à l'étiage. Sous hypothèse de recharge nulle liée à la pluie, et en référence à un seuil de référence de l'étiage, il est alors possible d'anticiper la date du minimum hydrologique annuel.
- *L'approche pseudo-continue*, calée par exemple sur la fréquence des comités sècheresse, est une mise à jour de la simulation pour un suivi plus fin de l'évolution de la ressource. A cette fréquence, les prédictions à l'échelle de la semaine sont plus fiables et permettent une gestion planifiée de l'usage de l'eau.

L'approche saisonnière présente un intérêt pour la prévision à long terme du tarissement. Elle permet aussi, en début de tarissement, de connaître le volume d'eau qui sera disponible au cours de la saison. Néanmoins ce type de modèle fonctionne sur une hypothèse de pluie nulle à l'échéance de prédiction, or c'est un cas peu fréquent. La prédiction sera donc forcément entachée d'une incertitude allant en grandissant à mesure que l'on approche de l'étiage. Pour pallier à ce problème, nous pouvons réinitialiser le modèle aussi souvent que l'on dispose d'une donnée au jour J. Dans les faits cette opération ne nécessite pas d'être effectuée quotidiennement étant donnée la régularité du tarissement, mais nous pouvons imaginer une mise à jour bimensuelle, ou tout au plus quelques jours après une crue. Cette fréquence, calée sur les comités sècheresse permet cette fois de connaître précisément les débits sur 15 jours sous réserve qu'il ne pleuve pas entre temps. Concernant la loi utilisée, l'observation d'un *tarissement de base* incite à l'utilisation des équations impliquant une constante (Eq. 5 et 6). La constante C sera estimée grâce au minimum interannuel du VCN_{30} .

Nous garderons donc à l'esprit que ces deux approches sont complémentaires pour une gestion court terme et moyen terme de la récession des bassins versants. La modélisation sur deux cas de figures (une année sèche et une humide) permet d'illustrer cette complémentarité.

Le Galeizon en 2017 et 2018 est un bon exemple de la variabilité des tarissements influencés ou non par la pluie. En 2017, le tarissement est très peu influencé par les pluies estivales. Ainsi aucunes crues importantes ne parviennent à recharger les nappes et le tarissement est bien reproduit par la loi quadratique tout au long de l'été (Fig. 6a). Le modèle surestime cependant les débits en période d'étiage. Cette observation sous-entend le rôle probable d'autres processus dans le tarissement effectif, propres au cours d'eau lui-même, tel que l'évaporation. La réactualisation du modèle (Fig. 6b) permet tout au plus d'affiner la prévision en période d'étiage.

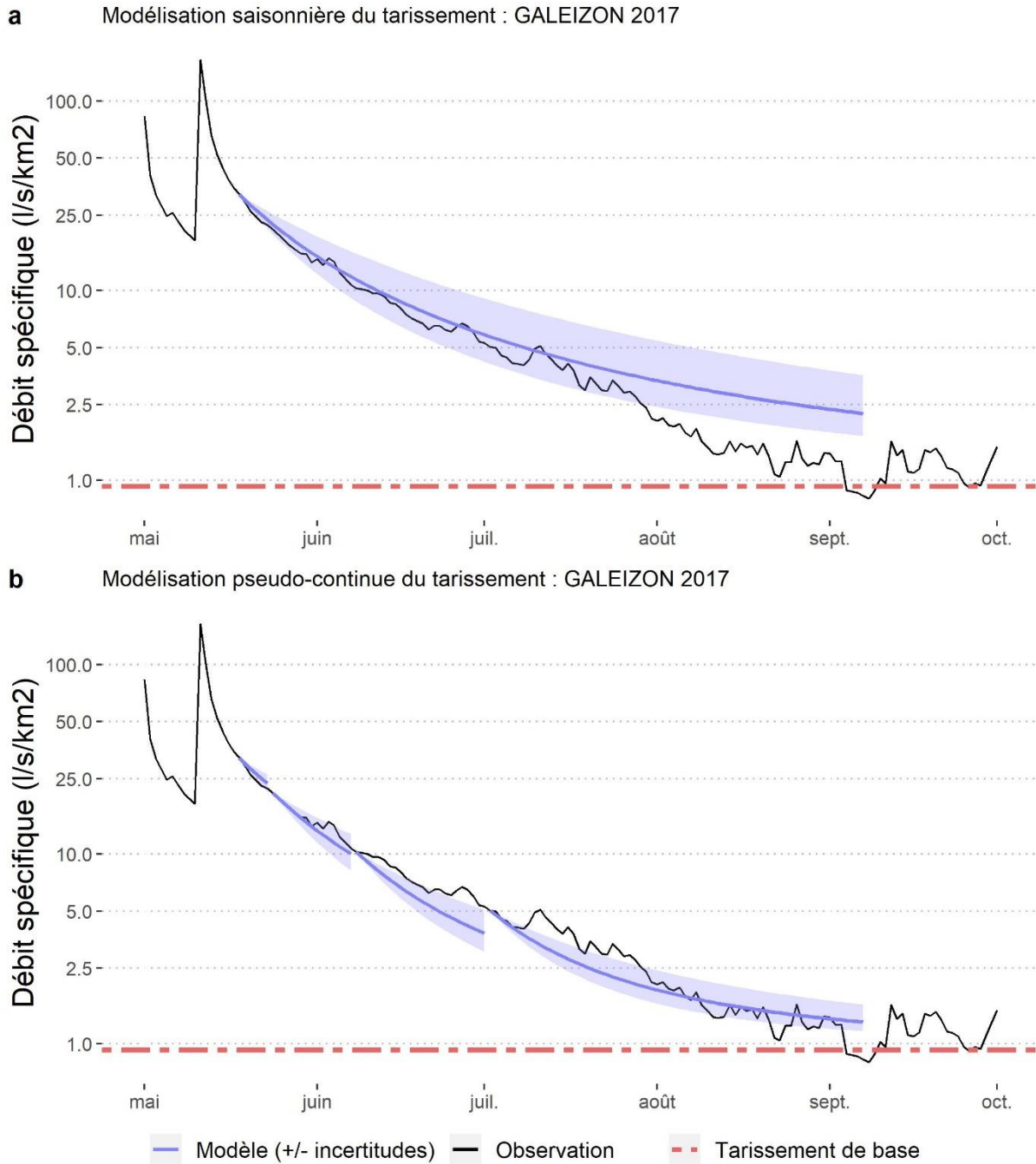


Fig.6 - Prédiction du tarissement du Galeizon à l'Aube Morte pour l'année sèche 2017 par le modèle de Boussinesq et une constante de tarissement de base. a) prédiction saisonnière et b) prédiction pseudo-continue.

En 2018 au contraire, plusieurs événements de grande ampleur (juin et août) semblent être à l'origine d'une recharge de nappe, visible sous la forme d'une hausse durable des débits. Ainsi un décalage temporel apparaît entre la prédiction saisonnière et l'observation, de l'ordre de 1 mois en juin, et d'une quinzaine de jours en août (Fig. 7a). La prédiction saisonnière n'a de sens qu'en l'absence de pluie et de recharge de nappe. La réactualisation du modèle est cette fois très pertinente (Fig. 7b) et permet de recalculer le tarissement modélisé sur l'observation.

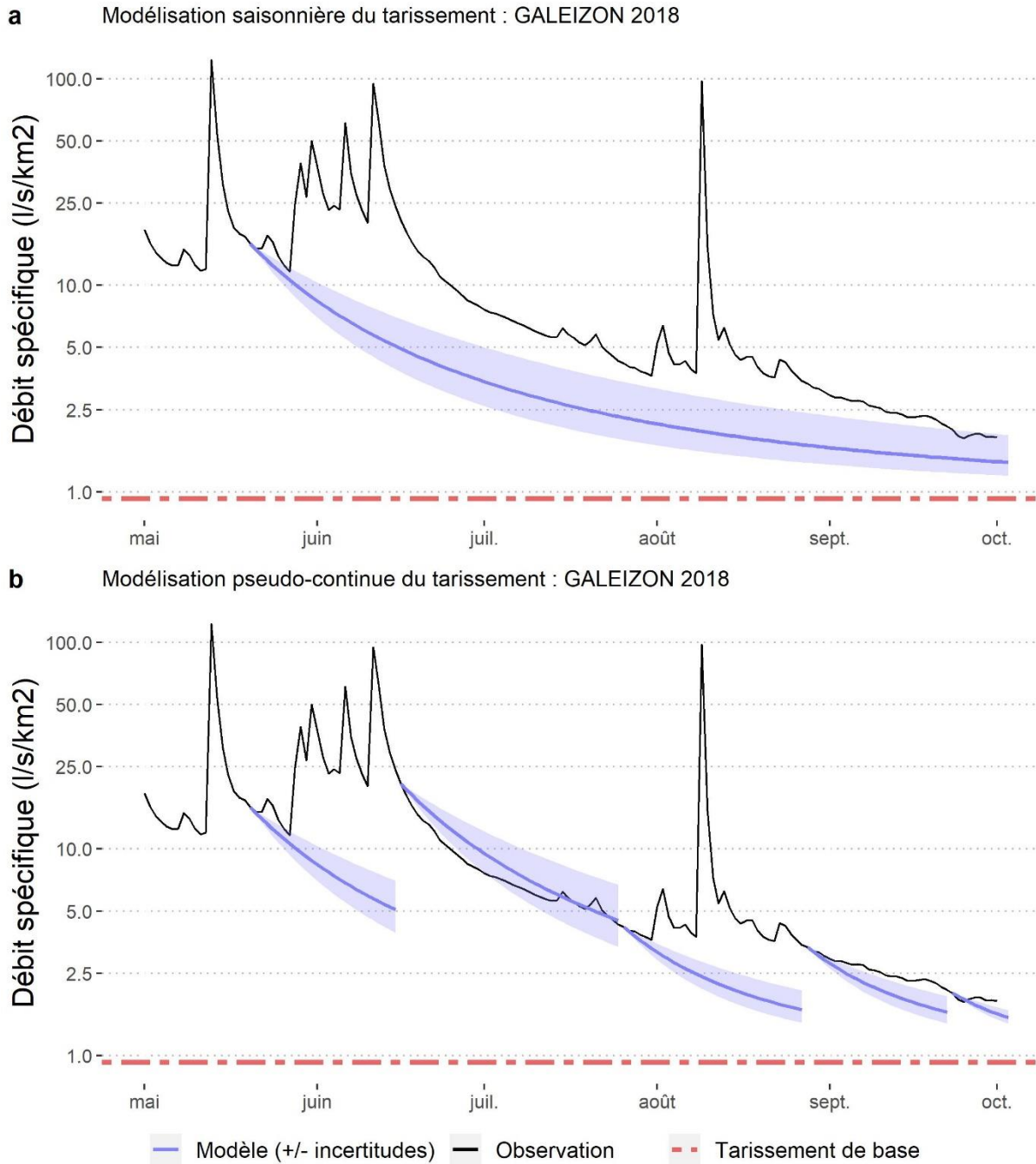


Fig. 7 - Prédiction du tarissement du Galeizon à l'Aube Morte pour l'année humide 2018 par le modèle de Boussinesq et une constante de tarissement de base. a) prédiction saisonnière et b) prédiction pseudo-continue.

Les bornes d'incertitudes établies grâce à la variabilité interannuelle du coefficient de tarissement sont ici cohérentes avec l'observation et justifient leur utilisation.

1.1.9. Conclusion partielle

Grâce à une méthode automatisée et généralisable sur les Cévennes, les courbes de tarissement ont été établies sur l'ensemble des bassins versants suivis par HydroPop pour les années 2015 à 2019. Deux modèles classiques pour ce type d'analyse ont été confrontés. Le modèle approximatif de Maillet, dit exponentiel représente un tarissement linéaire dépendant du remplissage initial de la nappe. Le modèle exact de Boussinesq, dit quadratique est quant à lui non-linéaire.

Les résultats d'ajustement de ces modèles sur les bassins versants d'étude donnent des résultats globaux sensiblement identiques. Des différences apparaissent cependant au regard de l'année et du bassin versant. Les grandes entités géologiques (caractère structural) et la variabilité spatio-temporelle de la recharge hivernale (caractère conjoncturel) semblent être les facteurs les plus indiqués pour expliquer ces hétérogénéités. Avec le modèle le plus adapté pour son bassin versant, nous proposons deux types de prévisions. La *prévision saisonnière* en mai permet d'une part d'avoir un premier avertissement sur une sécheresse hydrologique à venir, et sous réserve d'une hypothèse de pluie nulle, la date approximative de franchissement d'un seuil de vigilance. La *prévision pseudo-continue*, simple réactualisation du modèle avec la donnée la plus récente, permet quant à elle de réajuster le modèle au plus proche de l'observation, pour une gestion plus fine de la ressource. L'application du modèle de tarissement sur le Galeizon pour deux années sèche et humide montre enfin la complémentarité des deux approches, et leur efficacité.

1.2. Analyse spatiale de l'étiage : prospectives

La localisation des stations hydrométriques du programme HydroPop répond à un besoin de connaissance local de la ressource en eau à des fins de gestion. Le programme prévoit une avancée du savoir régional sur les basses eaux et plus particulièrement les basses eaux. Cependant nombre d'enjeux sont situés en d'autres points du réseau hydrographique, il se pose alors la question suivante : *peut-on, à partir des données disponibles ponctuellement, estimer l'hydrologie en tout point du réseau hydrographique ?* Cette problématique est connue dans le milieu scientifique sous le sigle PUB (*Prediction in Ungauged Basin* – Prédiction en bassins non-jaugés) (Hrachowitz M. et al., 2013; Sivapalan M. et al., 2003). La décennie PUB (2003-2013) est le résultat de discussions entre spécialistes de la discipline sur la nécessité d'une connaissance de l'hydrologie globale au sens régional, contrairement à l'approche traditionnelle de terrain, effectuée sur de petits bassins versants expérimentaux aux fonctionnements souvent très spécifiques et donc difficilement transposables. Ce travail, mobilisant de nombreux acteurs de la recherche, a abouti sur de nombreux progrès opérationnels, permettant notamment la prévision hydrologique étendue à l'ensemble du réseau hydrographique, suivant des étapes de régionalisation plus ou moins poussées. L'une d'entre elles, la méthode géostatistique TOPKRIGING (TOPological KRIGING) s'est montrée particulièrement efficace dans les régions fortement instrumentées (cas des pays européens), égalant ou devançant la plupart des méthodes conceptuelles traditionnelles (Blöschl G. et al., 2013).

Le nombre conséquent de sites installés font de la région cévenole un cas d'étude particulièrement intéressant pour une étude de type PUB. Les 14 stations² HydroPop réparties sur les 2 bassins versants du Gardon à Ners (1092 km²) et de la Cèze à Tharaux (663 km²) portent la densité de mesure à 0.008 stations par unité de surface, et ce, sans tenir compte du réseau national déjà en place. A titre de comparaison, la densité de stations d'une étude nationale de référence sur le territoire français métropolitain (552 000 km²) est évaluée à 0.0017 stations par unité de surface (Oudin L. et al., 2008). En Autriche (84 000 km²), le réseau national est particulièrement bien fourni et propose une densité de 0.0045 stations par unité de surface.

² Le réseau de stations dédiées aux étiages d'HydroPop comporte 15 stations. Dans ce travail la station située à l'aval du barrage de Sainte-Cécile-d'Andorge n'a pas été considérée car elle est très fortement influencée par le soutien d'étiage apportée par le barrage.

Dans ce chapitre nous proposerons dans un premier temps une analyse globale de la variabilité hydrologique, puis une étude géostatistique servant de socle au développement du modèle TOPKRIGING.

1.2.1. Principe général de géostatistique

La géostatistique est à l'origine la « science appliquant les lois statistiques à l'étude des gisements » (source : Centre National Ressources Textuelles et Lexicales) et consiste à déterminer une structuration dans les données spatiales permettant la détection de gisements miniers à exploiter. Son utilisation s'est depuis largement répandue à d'autres disciplines telles que la météorologie ou l'étude de répartition des populations animales. Appliquer la géostatistique à un jeu de donnée a pour ambition de mettre à jour une éventuelle évolution d'une variable donnée en fonction de la distance espaçant deux points de mesure. L'hypothèse est alors qu'une même variable est corrélée à une certaine distance mais tend à être décorrélée à grande distance. La météorologie est un bon exemple de ce cas de figure. Les champs de précipitation sont généralement bien corrélés à courte distance mais plus du tout lorsque la distance dépasse l'emprise de la perturbation. La température est corrélée sur de grandes distances mais fini, tôt ou tard, par ne plus l'être (ensoleillement, végétation, relief, océan...). La géostatistique étudie deux cas de figures que sont l'anisotropie et l'isotropie. Dans le premier cas, l'évolution d'une variable dépendra de la direction. On peut encore illustrer cela par la météorologie : la température va varier différemment dans les Cévennes vers le nord (relief) ou vers le sud (plaine, mer Méditerranée). Dans le cas isotrope au contraire, la variation va se faire indépendamment de la direction.

L'exploration géostatistique se base sur un outil puissant, le semi-variogramme. En supposant que notre jeu de données respecte l'hypothèse de stationnarité intrinsèque (les accroissements sont d'espérance nulle, la variance des accroissements ne dépend que de la distance h entre les points), nous pouvons définir le semi-variogramme (Eq. 12) :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E[(Z(s+h) - Z(s))^2] \quad (12)$$

Soit $s(x,y)$ étant la position dans l'espace, $Z(s)$ la variable à la position s . Le semi-variogramme exprime l'accroissement d'une variable dans l'espace à mesure que la distance augmente. Le semi-variogramme est l'étape indispensable à l'analyse géostatistique et son expertise va permettre l'adaptation d'un modèle adéquat pour la spatialisation des données. Pour le cas des bassins versants qui sont une entité surfacique et non des points, nous utilisons le centroïde comme point de référence dans le calcul des distances. Ci-dessous, un cas théorique présente la construction du semi-variogramme expérimental (Fig.8a et Fig.8b). Dans ce cas de figure théorique, la semi-variance $\gamma(h)$ est très faible pour des distances h proches de 0, mais augmente ensuite rapidement pour atteindre un palier $\gamma(h_p) = 5$ de portée $h_p = 20$ km. Au-delà de la portée, il n'y a peu ou plus de relation entre les valeurs observées, la covariance s'inverse. En théorie, la semi-variance doit tendre vers 0 à distance infiniment petite, or il peut parfois apparaître un effet de *pépité*. La *pépité* peut provenir de deux sources différentes : l'incertitude sur la mesure, mais aussi par l'existence de processus opérant à des échelles plus petites que notre échantillonnage. Dans notre cas de figure, il est probable que cet effet de *pépité* soit issu de l'erreur de mesure (allant jusqu'à 20% selon la méthode (Puechberty R. et al., 2017)).

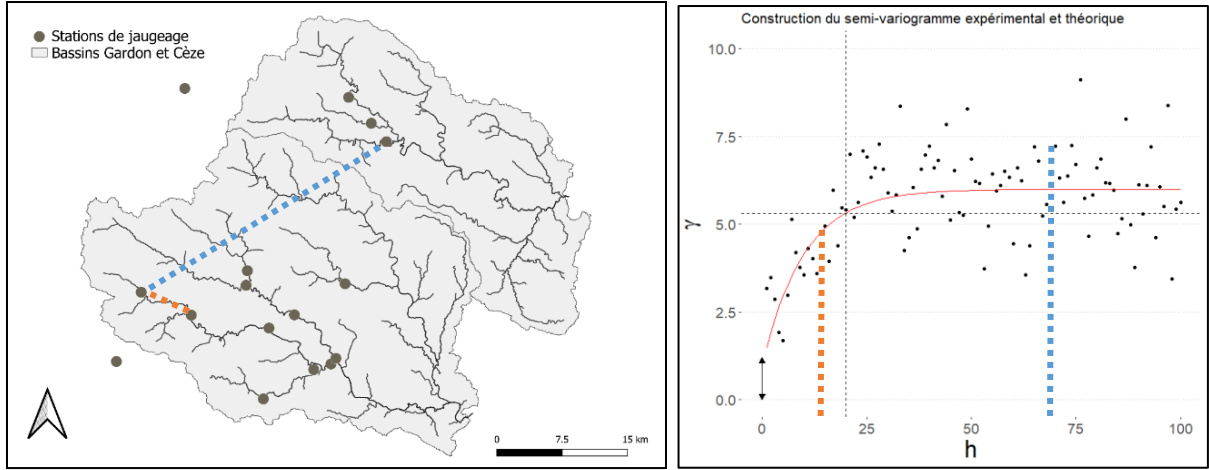


Fig.8 – a) Répartition des stations de jaugeage. b) Construction du semi-variogramme expérimental.

En premier lieu, l'analyse variographique permet de comprendre le degré statistique de similarité entre les bassins versants, sur le seul critère de la distance les séparant.

La géostatistique présente un second atout : le krigeage. Le krigeage est une technique d'interpolation de l'information basée sur le semi-variogramme. Un semi-variogramme théorique peut être adapté au semi-variogramme expérimental (Fig.8b). Le modèle théorique permet d'estimer la variable $Z(s_0)$ à la position s_0 par transposition (pondérée d'un coefficient λ_i) des variables Z_i observées aux positions s_i , en fonction de la distance (Eq. 13), par résolution des équations (Eq. 14 et 15) de krigeage (Cressie N. 2015).

$$Z(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(s_i) \quad (13)$$

$$\gamma_{0i} = \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \lambda_j + \mu \quad (14)$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (15)$$

Où gamma γ_{ij} est la semi-variance entre deux mesures i et j obtenue grâce au semi-variogramme théorique, μ est le paramètre de Lagrange nécessaire à la contrainte des données non-biaisées (Skøien J. O. et al., 2014). Dans la section suivante nous verrons comment cette méthode peut être adaptée au cas des bassins versants.

1.2.2. Principe du TOPKRIGING

Dans le cas de l'hydrologie, les variables d'intérêt se rapportent à des surfaces (*supports* en termes géostatistique) et non des points, bien que mesurées ponctuellement sur un linéaire (le réseau hydrographique). Compte tenu des changements d'échelles propres à l'hydrologie, il s'agit alors d'intégrer l'évolution de la variance relative à ces changements d'échelle. Cet effet d'échelle est par ailleurs illustré sur nos données (Fig.9). Au sein d'une entité homogène, plus les bassins versants sont grands, plus la réponse hydrologique tend à converger vers une valeur commune (variance spatiale plus faible).

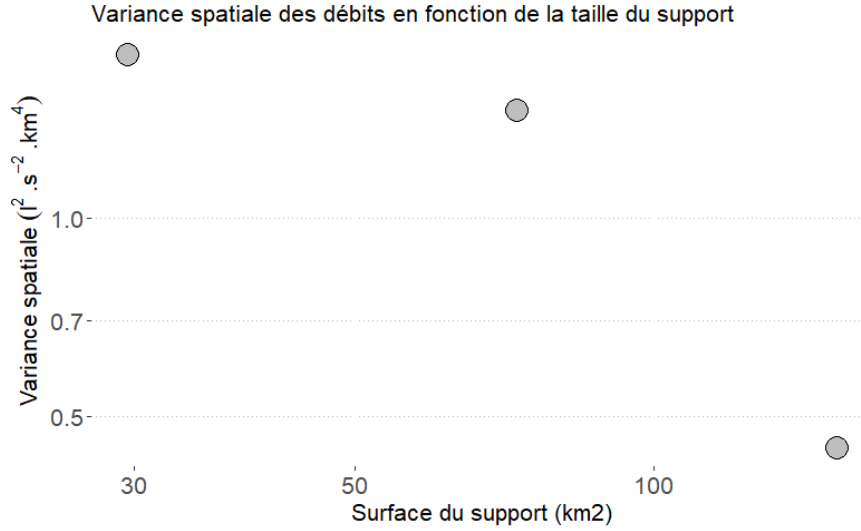


Fig.9 – Evolution de la variance des débits spécifiques pour 4 classes croissantes de superficies.
Estimation sur une sélection de 24 bassins versants pour les mois de mai, juin, juillet, août et septembre 2019.

La prise en compte de cet effet d'échelle se fait via une étape de *régularisation* du semi-variogramme. La régularisation fait intervenir la taille A des supports afin de requalifier les semi-variances issues du semi-variogramme ponctuel γ_p en accord avec la taille du bassin versant (Eq. 16).

$$\gamma_{ij} = 0,5 \times \text{Var} \left(Z(A_i) - Z(A_j) \right) =$$

$$\frac{1}{|A_i||A_j|} \int_{A_i} \int_{A_j} \gamma_p(|s_i - s_j|) ds_i ds_j -$$

$$0,5 \times \left[\frac{1}{|A_i|^2} \int_{A_i} \int_{A_i} \gamma_p(|s_i - s_j|) ds_i ds_j + \frac{1}{|A_j|^2} \int_{A_j} \int_{A_j} \gamma_p(|s_i - s_j|) ds_i ds_j \right] \quad (16)$$

La première partie de l'expression intègre la semi-variance entre les deux surfaces alors que la seconde lui soustrait la semi-variance à l'intérieur des deux surfaces respectives. La conséquence directe est que plus la surface des supports augmente, moins la semi-variance est élevée (Cressie N., 2015; Skøien J. O., et al., 2006, 2014). Les semi-variances ainsi régularisées sont ensuite intégrées dans les équations de krigeage (Eq.12). Selon le niveau de discrétisation des points au sein des surfaces A_i et A_j , l'étape de régularisation du semi-variogramme peut être très longue. Dans le cadre de TOPKRIGING, une simplification est choisie pour accélérer le processus de régularisation, mais aussi pour rendre compte de la topologie du réseau hydrographique (Gottschalk L., 1993; Gottschalk L. et al., 2011; Skøien J. O., et al., 2014). La distance de Ghosh (Ghosh B., 1951) décrit la distance moyenne entre des polygones (Eq. 17) et peut être intégrée dans l'équation 12.

$$d^*_{ij} = \frac{1}{|A_i||A_j|} \int_{A_i} \int_{A_j} (|s_i - s_j|) ds_i ds_j \quad (17)$$

L'équation 14 devient donc :

$$\gamma^*_{ij} = \gamma_p(d^*_{ij}) - 0,5 \times [\gamma_p(d^*_{ii}) + \gamma_p(d^*_{jj})] \quad (18)$$

Avec d_{ii}^* et d_{jj}^* la distance moyenne à l'intérieur de respectivement A_{ii} et A_{jj} . Ainsi, au sens de Ghosh B., deux bassins versants emboîtés seront plus proches que deux bassins voisins, à tailles similaires.

1.2.3. Les données

L'analyse géostatistique s'appuie sur l'hypothèse de stationnarité de la variable d'étude (variabilité uniquement due à la distance, et non à une variabilité du/des processus). Cette première condition implique de se baser sur un jeu de données *a priori* homogène. La seconde condition relève des principes statistiques eux-mêmes, à savoir que l'échantillon d'analyse doit être suffisamment grand pour éviter tout biais d'analyse. L'analyse du tarissement en section 2 a montré qu'une majorité des bassins versants du programme HydroPop ont un fonctionnement homogène, à l'exception de GANI et AUZO. C'est donc à partir de cette sélection homogène que l'analyse sera effectuée. Cependant, et afin d'augmenter la taille de l'échantillon, nous implémenterons également certains bassins versants issus du réseau national, dont la qualité de mesure ne présente pas de défaut en basses eaux, et dont l'emprise reste essentiellement sur une géologie identique. C'est le cas du Tarn au Pont-de-Montvert (code banque HYDRO O3011010), l'Altier à Altier (V5046610), le Gardon de Sainte-Croix à Gabriac (V7115010), le Gardon de Saint-Jean à Corbès (V7135010), le Lot à Bagnols-les-Bains (O7001510), la Jonte à Meyrueis (O3194010) la Mimente à Florac (O3084320), le Tarnon à Florac (O3064010), le Briançon aux Bondons (O3035210), l'Allier à Laveyrune (K2010820), et le Gardon de Mialet à Mialet (V7124015). Cette sélection de 24 bassins versants est présentée en tableau 3 et figure 10.

ID	nom complet	origine	code	surface
O3006710	Le ruisseau de Goudesche à Saint-Maurice-de-Ventalon [La Cépède]	HYDRO	N10	10,5
O3015520	Le Rieumalet au Pont-de-Montvert	HYDRO	N12	21,5
O3035210	Le Briançon aux Bondons [Cocures]	HYDRO	N3	26,2
SAUM	Ruisseau de Borgne	HPOP	H49	31,1
HOMO	L'Homol	HPOP	H56	31,2
SAVA	Gardon de Saint-Jean [Saint-André]	HPOP	H50	32,4
V7115010	Le Gardon de Sainte-Croix à Gabriac [Pont Ravagers]	HYDRO	N20	38,8
LASA	La Salindrenque [Lasalle]	HPOP	H47	44,4
K2010820	L'Allier à Laveyrune [Rogleton 2]	HYDRO	N1	50,7
AUBE	Le Galeizon	HPOP	H54	61,9
O3011010	Le Tarn au Pont-de-Montvert [Fontchalettes]	HYDRO	N11	64,7
FOUR	La Cèze	HPOP	H58	66,4
THOI	La Salindrenque [Thoiras]	HPOP	H52	67,8
SEVF	Le Gardon	HPOP	H51	82,9
CHAM	Le Luech	HPOP	H57	92,7
O7001510	Le Lot à Bagnols-les-Bains	HYDRO	N8	94,5

O3194010	La Jonte à Meyrueis [aval]	HYDRO	N7	97,4
SCVF	Le Gardon de Sainte-Croix	HPOP	H60	103,3
V5046610	L'Altier [Altier] à Altier [La Goulette]	HYDRO	N15	106,2
O3084320	La Mimente à Florac	HYDRO	N5	126,2
O3064010	Le Tarnon à Florac	HYDRO	N4	131,8
SJDG	Le Gardon de Saint-Jean [pont de Camboneral]	HPOP	H55	150,0
ROUC	Le Gardon de Mialet [camping]	HPOP	H48	244,6
V7135010	Le Gardon de Saint-Jean à Corbès [Roc Courbe]	HYDRO	N41	260,6

Tabl. 3 - Sélection des bassins versants utilisés dans l'analyse TOPKRIGING, classés par superficie croissante.

Nous utiliserons pour cette analyse les données des mois de juin, juillet et août 2019, au pas de temps journalier. Ainsi sur la période estivale la totalité des stations sont disponibles (24), en dehors de cette période, seules les stations du réseau national sont fonctionnelles (12). Au cours de la campagne 2020, un certain nombre de jaugeages ont été effectués ponctuellement à des fins de validation. Une présentation des jaugeages de validation est faite dans le tableau 4 et en figure 10. La majorité des jaugeages de validation ont été effectués sur le Gardon, compte tenu du recul et des travaux déjà acquis dessus.

Nom	ID	Date TU	Surface	Débit spécifique (L/s/km ²)
Salt	V2	09/10/2019	6,5	0,5
Ruisseau de Massaout	V4	09/10/2019	4,3	2,5
Gardon de Sainte-Croix	V5	09/10/2019	28,2	2,2
Deveze	V6	09/10/2019	2,1	0,5
Valat des Oules	V8	09/10/2019	7,2	1,8
Gardon d'Alès	V1	08/06/2020	270,6	2,8
Gardon d'Alès	V1	17/06/2020	270,6	17,2
Salt	V2	21/07/2020	6,5	6,0
Gardon de Sainte-Croix	V3	21/07/2020	4,3	6,0
Ruisseau de Massaout	V4	21/07/2020	4,3	12,6
Gardon de Sainte-Croix	V5	21/07/2020	28,2	4,0
Deveze	V6	21/07/2020	2,1	9,5
Gardon de Sainte-Croix	V7	21/07/2020	51,1	3,5
Valat des Oules	V8	21/07/2020	7,2	9,9
Gardon de Sainte-Croix	V9	21/07/2020	84,1	5,0
Gardon de Sainte-Croix	V10	21/07/2020	62,4	4,8
Bessedé	V11	21/07/2020	5,8	2,6
Gardon d'Alès	V16	31/07/2020	52,8	2,5

Ravin du Castel	V23	31/07/2020	0,8	3,8
Galeizon	V14	31/07/2020	13,7	1,2
Gardon Saint-Jean	V19	31/07/2020	131,7	2,6
Rieu	V20	03/08/2020	3,7	0,7
Rieu	V20	17/08/2020	3,7	0,8
Valat du Pont de l'Elze	V24	17/08/2020	1,1	0,4
Valat de Valbessède	V22	17/08/2020	0,55	1,6
Ruisseau de Rules	V21	18/08/2020	2,4	0,4
Auzonnet amont	V25	19/08/2020	16,7	0,5
Galeizon	V14	26/08/2020	13,7	0,3
Gardon de Saint-Germain	V29	26/08/2020	23,7	1,2
Gardon	V28	26/08/2020	6,3	2,8
Gardon de Sainte-Croix	V27	26/08/2020	17	1,8
Valat des Oules	V8	26/08/2020	7,2	3,1
Gourdouze	V26	16/09/2020	12,4	3,2
Galeizon	V14	16/09/2020	13,7	0,4

Tabl. 4 - Jaugeages complémentaires effectués sur les campagnes 2019 et 2020.

La méthode TOPKRIGING sera appliquée sur 2 329 exutoires régulièrement espacés le long du réseau hydrographique (Fig. 10). Au niveau des têtes de bassin versant, les processus hydrologiques évoluent fortement vers des comportements localement spécifiques. Notre réseau d'observation n'est pas représentatif des têtes de bassin, en conséquence seuls les tronçons de rivière d'ordre de Strahler 2 ou supérieur sont considérés pour la simulation.

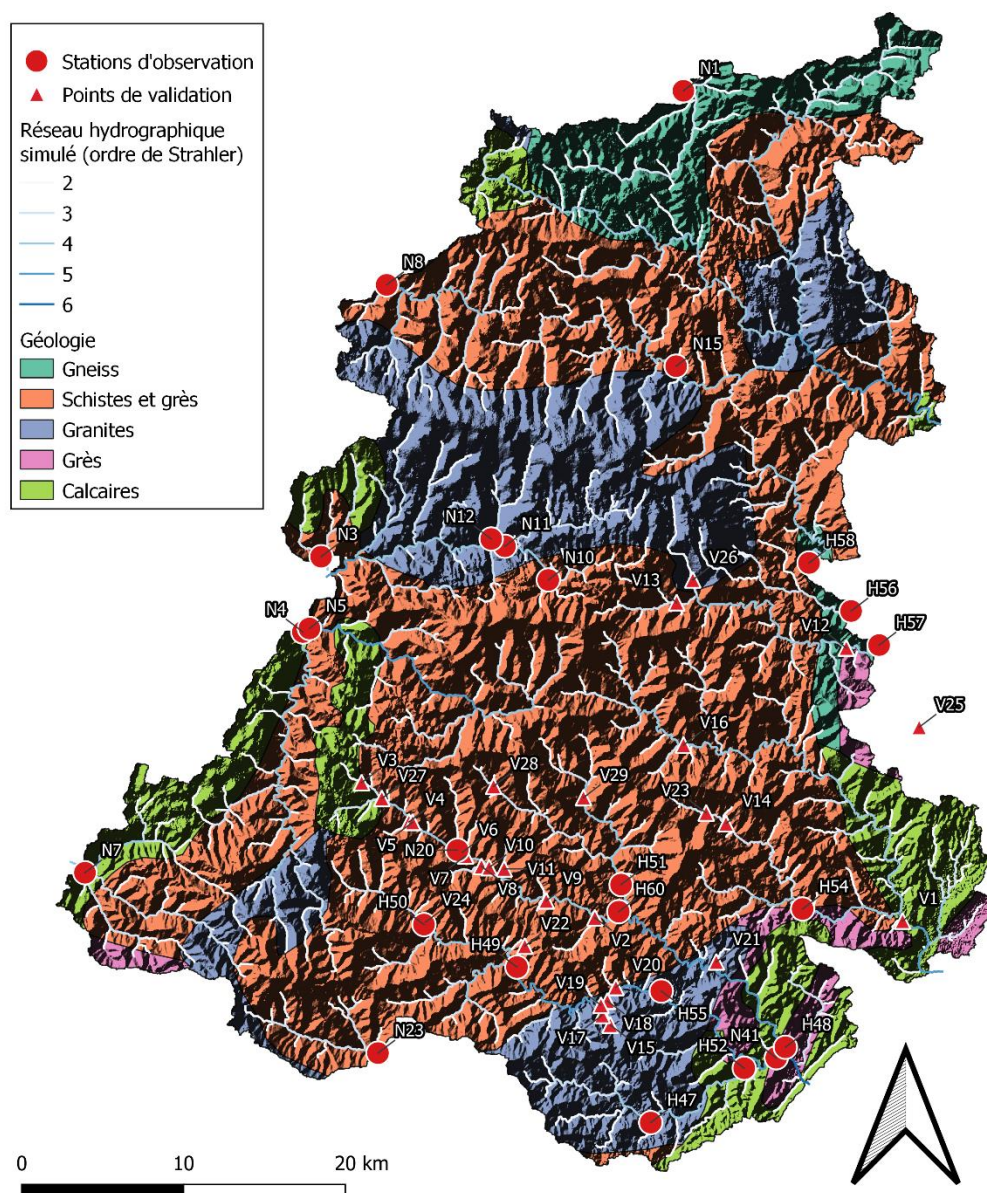


Fig.10 – Réseau hydrographique principal (ordre de Strahler supérieur à 2) superposé à la carte géologique (BRGM), positionnement des stations de mesures hydrométriques utilisées pour l'analyse géostatistique (cercles rouges).

1.2.4. Méthodologie

Les analyses sont faites à fréquence journalière. Le modèle TOPKRIGING fonctionne sur la base d'un semi-variogramme unique supposé fonctionnel pour toute époque de l'année. Nous estimons cependant que la structuration spatiale des variables hydrologiques pourrait évoluer selon les conditions météorologiques. Dans un premier temps, une analyse de la variabilité spatio-temporelle est menée sur les coefficients de variation journaliers, afin de faire ressortir une éventuelle évolution des comportements hydrologiques au cours de l'année. Dans un second temps, nous procéderons à une analyse variographique à fréquence journalière. Pour respecter l'hypothèse de normalité nécessaire à l'étude géostatistique, les débits journaliers sont transformés par les logarithmes. Les simulations sont effectuées sur l'ensemble du réseau hydrographique dont l'ordre de Strahler est supérieur ou égal à 2. Les performances de simulation sont ensuite présentées grâce à une validation croisée (cas pseudo non-

jaugé). La validation croisée « leave-one-out cross-validation » consiste à retirer une à une, l'une des stations d'observations (elle ne prend donc pas part au calcul du semi-variogramme), qui va servir à la comparaison de la simulation. Afin de quantifier les performances en validation-croisée, le critère KGE sera choisi comme référence (Gupta H. V. et al., 2009). Le KGE, issu de la décomposition du critère NSE – Nash-Sutcliffe Efficiency et du critère MSE – Mean Squared Error, est adapté à l'évaluation des hautes et basses eaux (Nash J. E. & Sutcliffe, J. V., 1970).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (19)$$

Avec σ_{sim} l'écart-type sur la simulation, σ_{obs} l'écart-type sur l'observation, μ_{sim} la moyenne de la simulation, μ_{obs} la moyenne de l'observation. r est la corrélation linéaire entre observation et simulation. Une valeur KGE égal à 1 est une simulation parfaite, alors qu'un KGE négatif signifie une simulation médiocre.

1.2.5. Résultats

Analyse variographique

La figure 11 présente l'évolution du coefficient de variation (CV) en pourcentage des débits journaliers pour les années 2015 à 2019. Un coefficient proche de 0 signifie que les débits journaliers sont sensiblement identiques. Toutes années confondues, nous remarquons dans un premier temps qu'un même schéma se reproduit avec des CV faibles (<30%) de novembre à juin, soit la période de recharge des nappes. Le CV augmente au cours du tarissement, pour atteindre un maximum dépassant les 100% (médiane des boîtes à moustache) en août ou septembre selon l'année, au moment de l'étiage. Cette progression au cours du tarissement n'est cependant pas synchrone entre années. Par exemple, en 2015, le CV commence à augmenter dès le mois d'avril pour atteindre un maximum aux mois de juillet-août. Les autres années suivent une même tendance avec une augmentation du CV en juin. En revanche, pour les années 2017 et 2019 le maximum obtenu est bien supérieur aux autres années (130% en 2017 et 150% en 2019). En 2019, le maximum de 150% est d'ailleurs soutenu pendant les deux mois d'août et septembre.

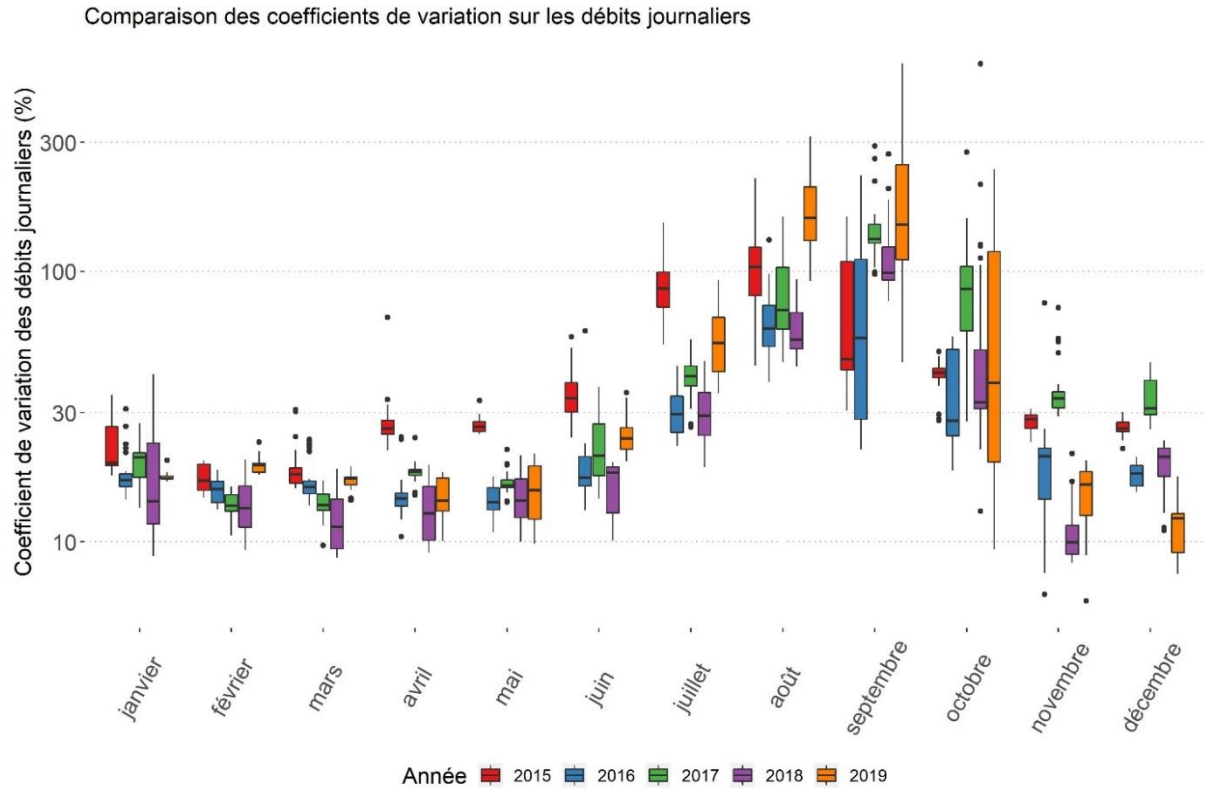


Fig. 11 – Evolution du coefficient de variation journalier entre les débits journaliers pour les années calendaires 2015 à 2019

Ces résultats indiquent la transition depuis un fonctionnement plutôt homogène en période humide (décembre-mai) vers un fonctionnement plus hétérogène en période sèche et traduit les particularités de fonctionnement propres à chaque bassin versant une fois qu'ils ne sont plus soumis à une recharge par la pluie. Nous retombons dans ce cas de figure sur les travaux de Boussinesq J. (1904) selon qui la vidange des nappes dépend du remplissage initial, mais aussi de la géométrie et des propriétés physiques du substrat. Même au sein d'une région en apparence homogène (cas des gardons sur schistes), des différences subsistent sur le tarissement. Cette observation a une incidence directe sur notre objectif de modélisation géostatistique. Dans son mode standard TOPKRIGING utilise un unique semi-variogramme pour l'estimation des poids dans la transposition des hydrogrammes. Celui-ci est calculé à partir de la moyenne des débits par station d'observation. L'incertitude du modèle dans TOPKRIGING, qui dépend de la variance totale, est donc supposée statique dans le temps. Selon nos observations, la variance (à partir de laquelle est donc calculée le coefficient de variation) diffère d'un ordre de grandeur entre la période humide et sèche. L'incertitude du modèle est donc dynamique au cours de l'année, avec un maximum au moment de l'étiage. Ces résultats ne montrent cependant pas si la structuration spatiale des données varie au cours de l'année hydrologique, qui sera le but de l'analyse variographique à suivre.

Les semi-variogrammes mensuels sont estimés à partir d'une synthèse des semi-variogrammes journaliers régularisés (Fig.12). L'échelle est volontairement gardée fixe pour observer les différences mensuelles. Nous retrouvons bien l'évolution croissante de la semi-variance au cours de l'année, évoquée précédemment en figure 11. La semi-variance est plus élevée (jusqu'à 0,5) aux mois de juillet, août, septembre et octobre alors qu'elle est proche de 0 le reste de l'année. De manière générale, les semi-variogrammes présentent une forme similaire très légèrement croissante avec un fort effet de pépité.

Un semi-variogramme de forme horizontale constitue un cas particulier de géostatistique : le semi-variogramme à effet de pépite pur. Dans ce contexte, il y a une absence de dépendance spatiale pour la variable étudiée. La variabilité de l'échantillon est seulement due à une variabilité des processus et/ou des erreurs météorologiques. Le semi-variogramme théorique reste cependant inférieur à la variance totale de l'échantillon (pointillés sur la figure 12) en période humide, indiquant une stationnarité. En période sèche par contre, le semi-variogramme théorique tend à dépasser la variance totale, ce qui implique une perte de corrélation à mesure que la distance augmente. L'hypothèse d'homogénéité sur notre échantillon de 24 bassins versants semble ainsi vérifiée. Statistiquement, le fonctionnement de l'Allier à Laveyrune (K2010820) est sensiblement identique au fonctionnement du Ruisseau de Borgne (SAUM) par exemple, malgré l'importante distance les séparant (50 km) et leurs influences climatiques différentes (océanique ou méditerranéenne). Ces hétérogénéités de processus sont cependant grandement exagérées au cours de la période estivale.

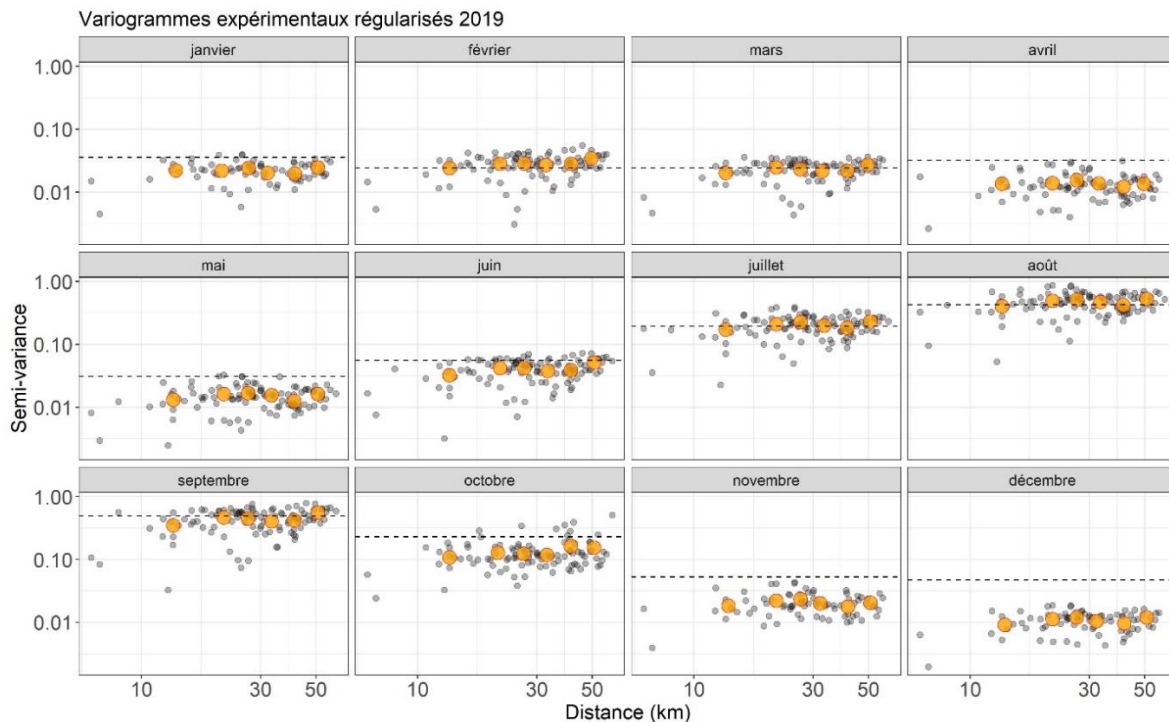


Fig.12 – Semi-variogrammes régularisés mensuels en 2019. Les points gris correspondent aux semi-variances des couples individuels (nuée variographique). Les points orange correspondent aux moyennes par groupe de distance (semi-variogramme expérimental). Les lignes pointillées correspondent à la variance totale pour le mois en cours, ou plateau en terme géostatistiques.

Validation croisée des simulations

Les résultats de la validation croisée sur la période de tarissement 2019 présentés en figure 13 indiquent la cohérence de la simulation au regard du critère KGE égal à 0,73. La régression linéaire (en rouge) indique également un faible biais de simulation en considérant l'ensemble des stations hydrométriques, avec un coefficient directeur proche de 1. Les erreurs importantes apparaissent essentiellement sur les débits d'étiage proches de 1 l/s/km².

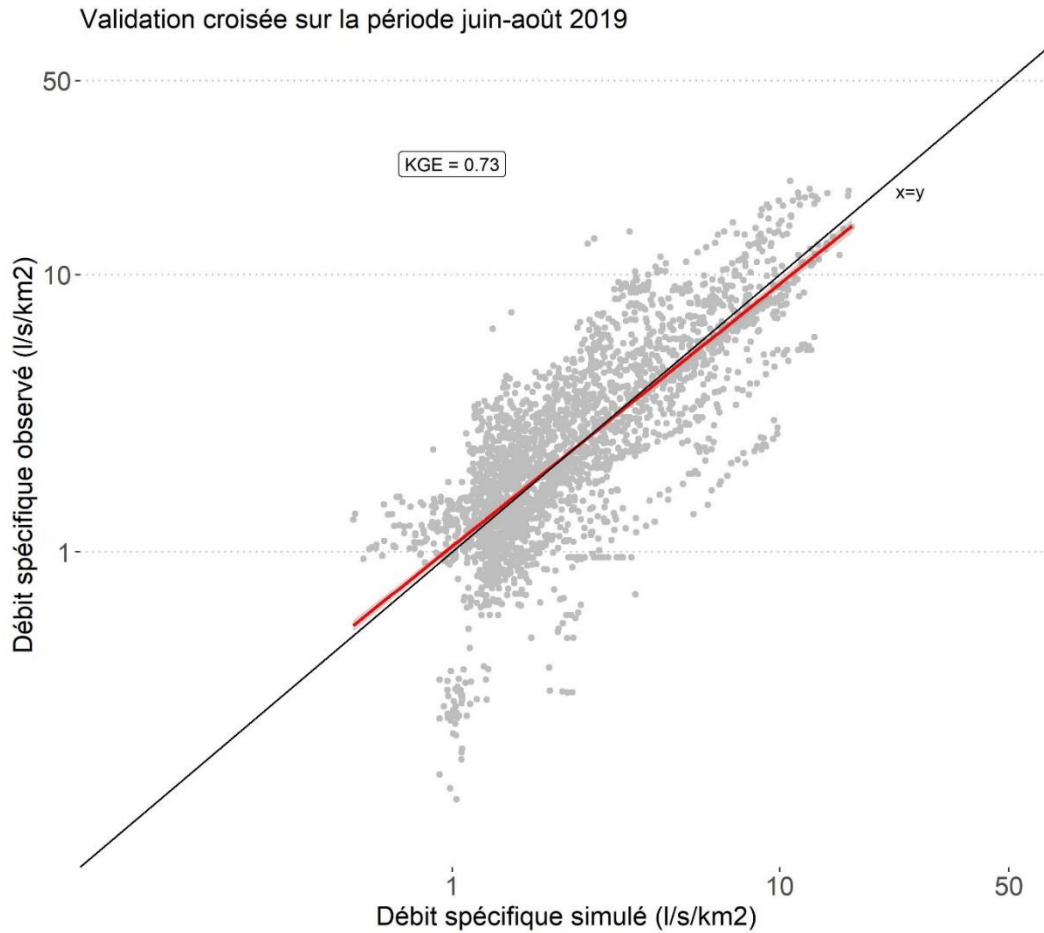


Fig.13 – Qualité globale de la simulation TOPKRIGING sur les 3 mois de tarissement 2019 (juin à août). Le critère KGE est utilisé comme indicateur de performance. La régression linéaire est représentée en rouge.

La figure 14 est une représentation spatiale de la qualité de simulation pour chaque station de mesure. Cette fois une hétérogénéité apparaît avec des sites indiquant de très bonnes simulations (KGE proche de 1), et d'autres dont la simulation est mauvaise (KGE < 0). Les stations montrant de mauvaises simulations sont le Gardon de Mialet (H48), le Luech à Chamboredon (H57), le Briançon aux Bondons (N3) et la Goudesche à Saint-Maurice-de-Ventalon (N10). Nous pouvons noter que ces pertes de performances apparaissent au niveau de ruptures dans la continuité géologique. Cela sous-entend potentiellement une rupture sur certains processus hydrologiques dominant en période de tarissement et donc l'incohérence d'une transposition hydrologique directe depuis les voisins.

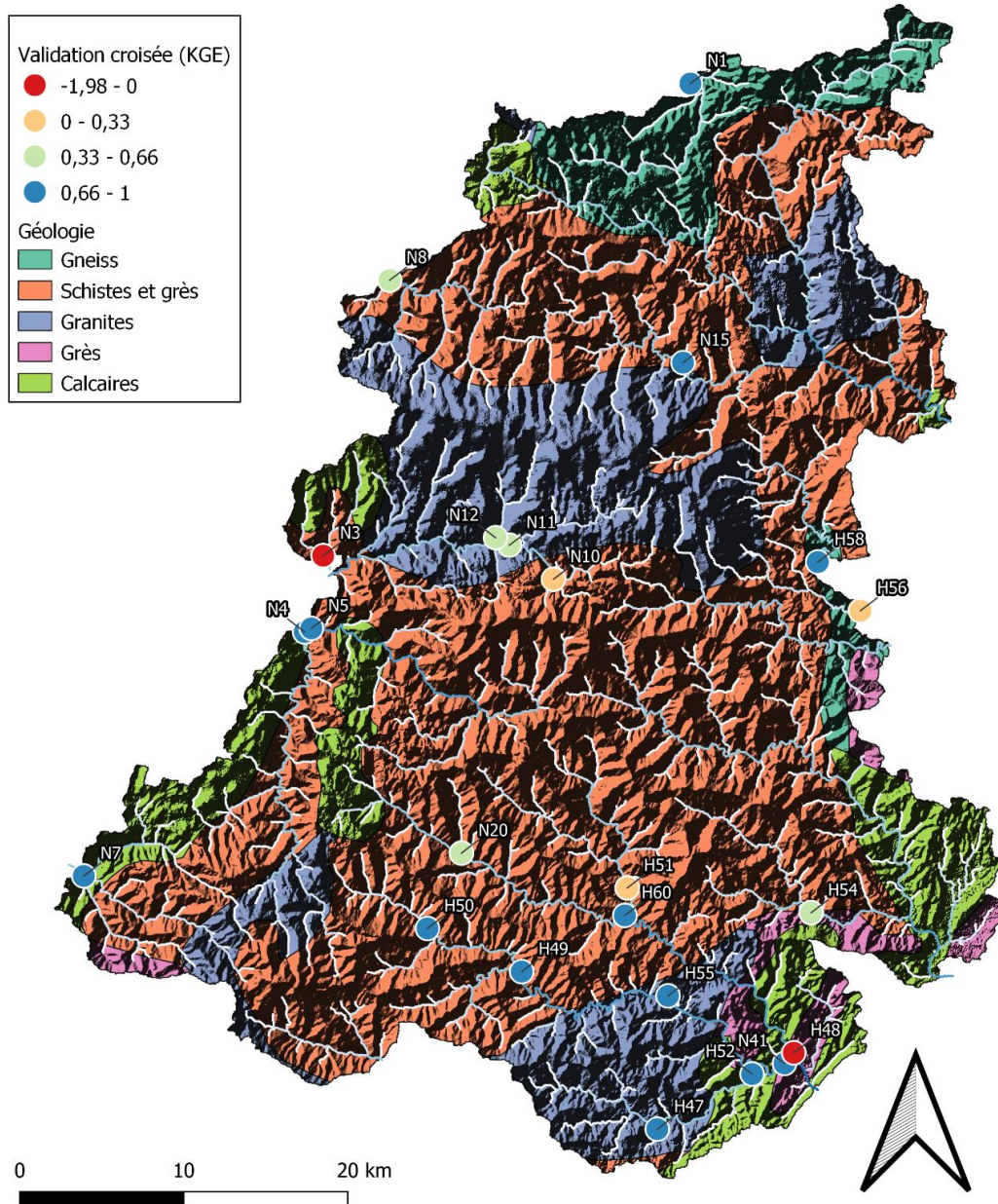


Fig.14 – Résultats de validation croisée au niveau des stations de mesure pérennes (HydroPop et nationales) par l'intermédiaire du critère KGE.

Validation sur jaugeages ponctuels

Les données ponctuelles de validation, permettent de faire fonctionner TOPKRIGING en incluant cette fois toutes les stations. Les jaugeages “volants” ont été effectués sur des bassins versants de superficie globalement inférieures ($0,55$ à 270 km^2 , médiane de $7,2 \text{ km}^2$). Les résultats (Fig. 15) semblent cependant converger vers ce qui a été observé en figure 13, à savoir de bonnes performances pour des débits supérieurs à 3 l/s/km^2 et une nette surestimation du modèle autour de 1 l/s/km^2 . Les bassins versant de tailles supérieures tendent généralement à soutenir un débit d'étiage plus stable compte tenu des apports souterrains, contrairement aux bassins versants de tête essentiellement alimentés par les versants. C'est une explication possible à la surestimation en très basses eaux de la transposition d'hydrogrammes depuis des bassins versants de méso-échelle tels que les bassins du réseau de mesure national par exemple, vers ces petits bassins de tête.

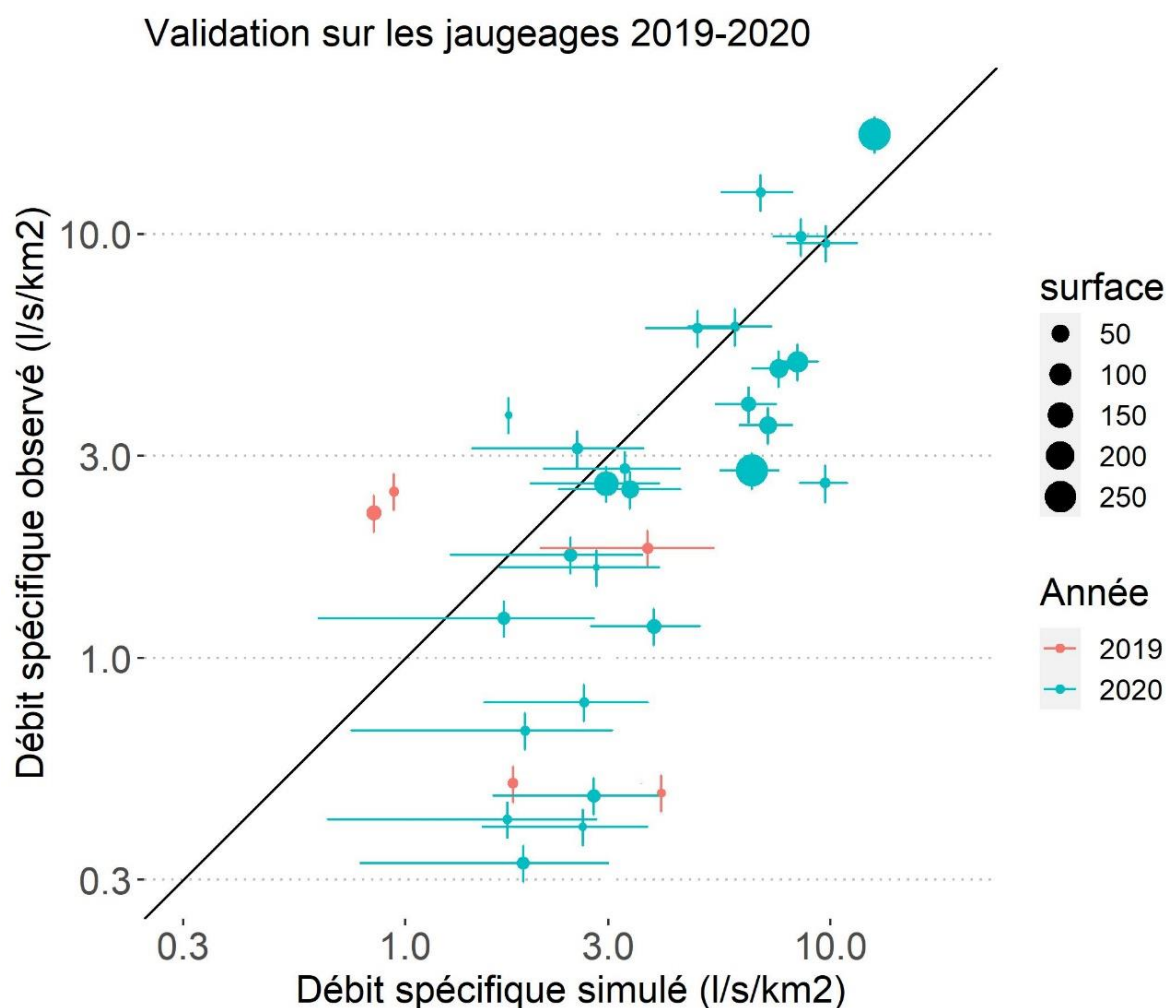


Fig.15 – Résultats de validation sur les jaugeages complémentaires. Les barres d'erreur sont fixées à 10% pour les jaugeages selon l'axe des ordonnées, et correspondent à l'erreur de krigeage selon l'axe des abscisses.

1.2.6. Construction de cartes de situation hydrologique

Pour illustrer l'intérêt opérationnel de TOPKRIGING, nous proposons dans cette dernière section un ensemble de production cartographique tirés de l'année 2020, si particulière. L'année 2020 présente un début de tarissement précoce, laissant entrevoir un étiage prononcé. Au cours du moins de juin, un évènement pluvieux d'une intensité remarquable pour cette époque de l'année a permis d'apporter une recharge significative de la nappe, repoussant d'un mois le tarissement. Au 11 juin, les niveaux d'eau dans les cours d'eau avoisinent les 10 l/s/km² (fig. 16a), ce qui s'apparente à la situation hydrologique de 2015. L'erreur de krigeage (fig. 16b) est généralement comprise entre 2 et 20% sur l'essentiel des bassins versants de tailles intermédiaires (supérieures à ~10 km²), mais semble bien plus élevée sur les bassins de tête. La partie nord du domaine d'étude (Tarn amont, Allier amont et Chassezaz amont) présente des incertitudes inférieures à 10%, alors qu'elles sont plus élevées sur les bassins du Gardon, de la Cèze et du Tarnon.

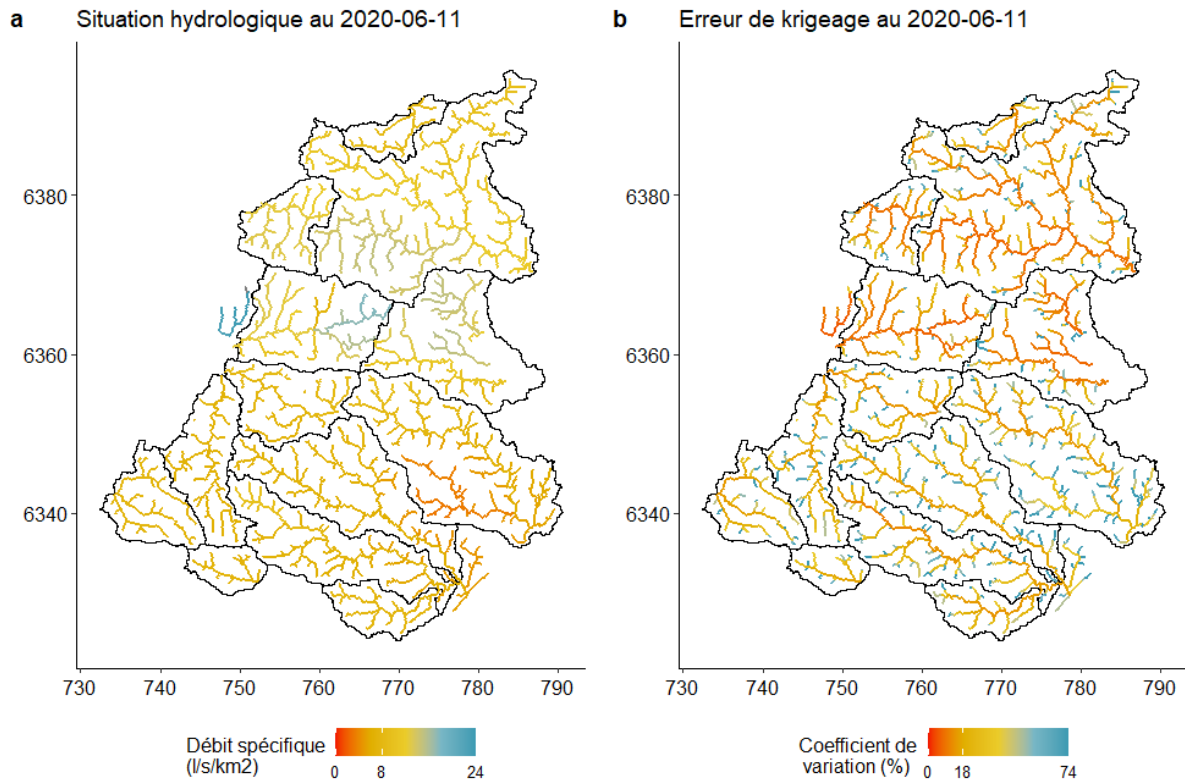


Fig.16 – a) Simulation hydrologique et b) erreur de krigeage, le jour précédant la crue du 12/06/2020.

Une semaine après la crue, les niveaux d'eau sont environ 5 fois supérieurs à la semaine précédente (fig. 17a) et présentent une nette disparité entre la partie cévenole montagnaise au nord-ouest avec des débits proches de 100 l/s/km², et la partie sud sud-est avec des débits compris entre 10 et 40 l/s/km². Cette hétérogénéité est cohérente avec le cœur des champs pluviométriques, essentiellement centrés sur les massifs. L'erreur de krigeage est plus faible, avec un maximum de 10% à l'est et des valeurs proches de zéro ailleurs (fig. 17b). Par ailleurs, l'erreur de krigeage semble indépendante de la taille des bassins versants, contrairement à la situation pré-crue.

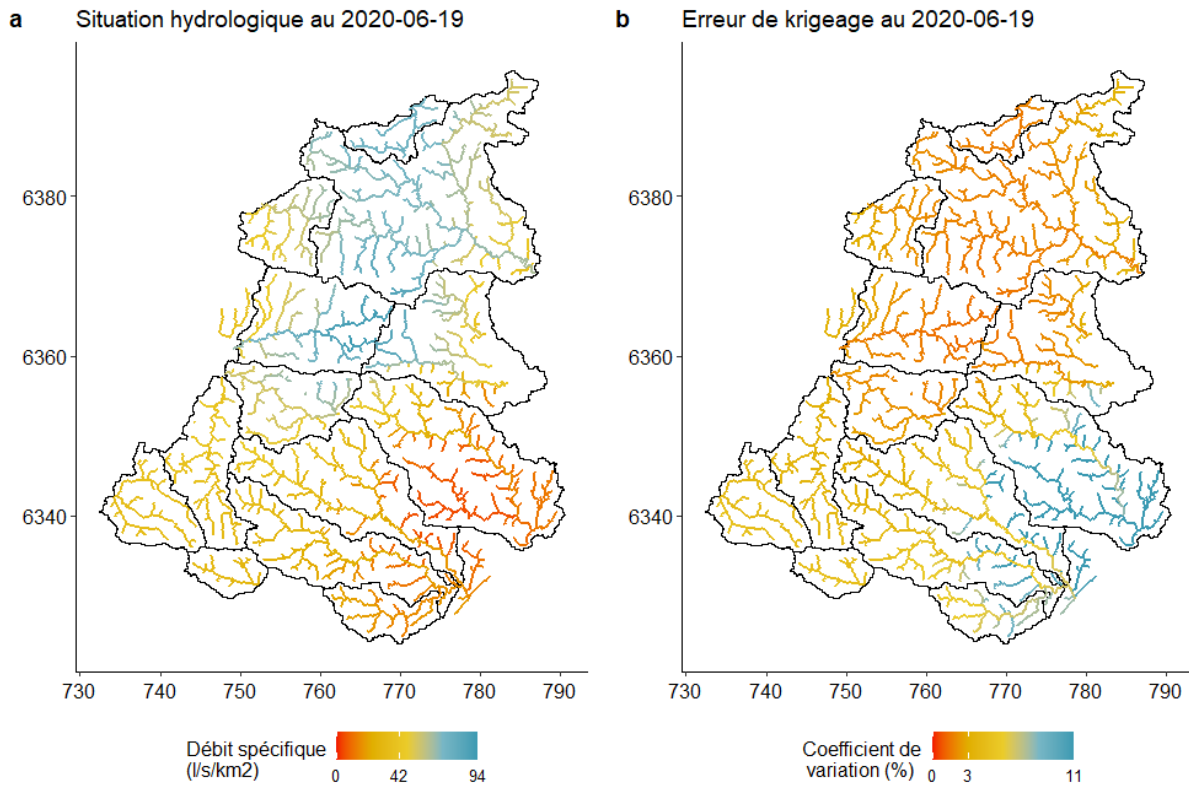


Fig.17 – a) Simulation hydrologique et b) erreur de krigeage, une semaine suivant la crue du 12/06/2020.

Une autre application de la méthode consiste effectuer une analyse statistique sur les débits simulés afin de quantifier des seuils de vigilance et d’alerte en tout point du réseau hydrographique. La figure 18 illustre cela au moyen du VCN3 median entre 2015 et 2020. Cette représentation fait ressortir l’hétérogénéité des débits de base minimum sur la région. Par exemple, la zone départageant le Tarn, le Chassezac et le Lot sont en mesure de fournir un débit plus important en étiage. C’est également le cas pour l’amont du Gardon Sainte-Croix qui semble profiter d’une géologie sédimentaire capacitive (corniche des cévennes). Reproduire cette démarche sur d’autres statistiques pourrait alors nous permettre, à l’avenir, d’obtenir des cartes dynamiques de la situation hydrologique au regard de ces différents seuils.

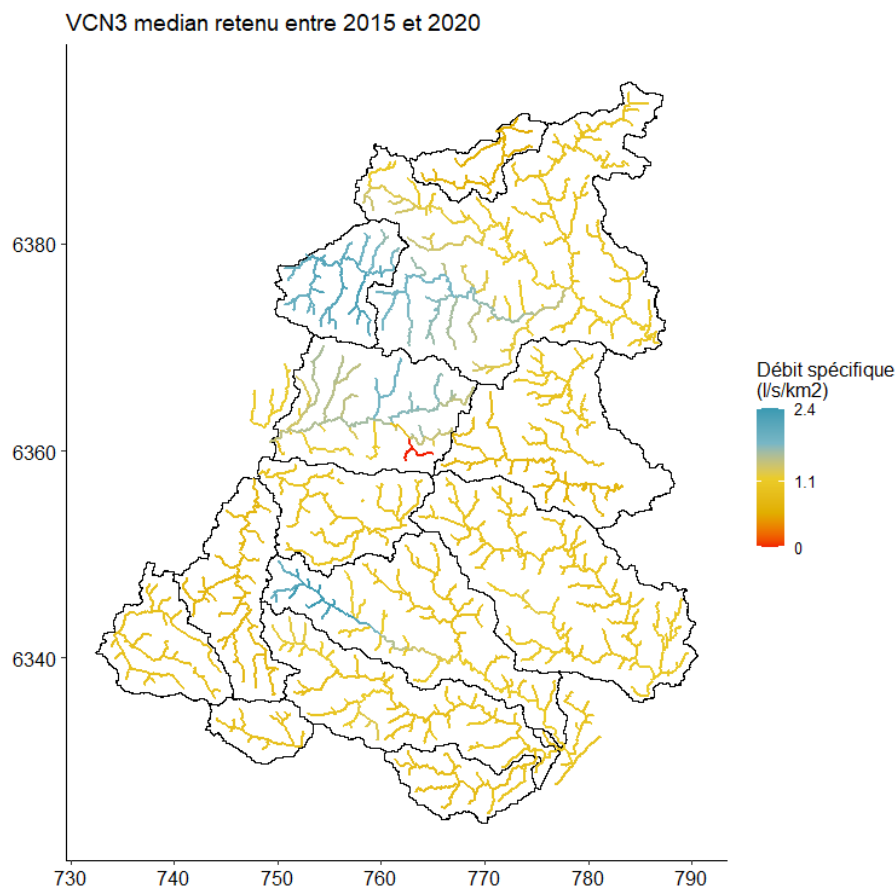


Fig.18 – Estimation du VCN3 par analyse statistique des hydrogrammes simulés entre 2015 et 2020. Cette carte est produite sur 5 années de mesures, ce qui est insuffisant pour un usage opérationnel.

1.2.7. Conclusion partielle

La raréfaction à venir de la ressource en eau confrontée aux contraintes imposées par les directives cadres sur l'eau implique un besoin d'une connaissance spatiale de l'hydrologie en basses eaux. En réponse à cet enjeu, TOPKRIGING est une approche possible qui tire parti de la densité d'information particulièrement importante dans le cadre du programme HydroPop2.

En procédant à une analyse variographique sur la région, nous avons pu montrer une certaine homogénéité de la réponse hydrologique au sein de zones délimitées par différentes entités géologiques. Malgré cette variété du substrat, les variogrammes ont montré une faible dépendance spatiale de la variable débit. Cela implique que sur la région étudiée, les débits sont facilement transposables, à l'erreur près, quelle que soit la distance. Nous avons cependant montré que l'incertitude de cette transposition augmente au cours de la période sèche, et plus particulièrement sur les bassins versants de tête.

Afin de valider la méthode, deux validations ont été effectuées. La validation croisée permet de connaître les performances du modèle sur des séries chronologiques complètes alors que la validation ponctuelle confronte les sorties du modèle dans son mode opérationnel à des jaugeages volants effectués sur un grand nombre de bassins versants, à différentes périodes du tarissement. Les deux validations ont mis en évidence une bonne qualité de simulation globale (critère KGE 0,73), mais des disparités géographiques au niveau des transitions entre entités géologiques. C'est avant tout l'hétérogénéité géologique qui sera limitante pour l'application de TOPKRIGING en région cévenole.

Le cas d'étude de la crue de printemps 2020 a permis de montrer l'intérêt de la méthode géostatistique pour quantifier la ressource en eau de manière spatiale et ainsi révéler des régions à même de soutenir un débit d'étiage plus élevé. Enfin, par analyse statistique sur les débits simulés, nous sommes en mesure de produire des cartes de débit d'étiage (ex : VCN3, QMNA5...) nécessaire à la qualification du risque d'étiage sévère.

1.3. Conclusion et perspectives opérationnelles

Dans cette section sur la gestion quantitative de la ressource en eau, deux méthodes de modélisation ont été proposées. La première consiste à caractériser la forme de la courbe de récession des stations du programme HydroPop2. L'analyse de récession consiste à définir à quel taux les volumes d'eau stockés dans les nappes sont restitués aux cours d'eau pendant le tarissement, jusqu'à l'étiage. Les résultats ont montré que ces taux pouvaient être légèrement différents selon l'année et la géologie, mais qu'une valeur moyenne par bassin était suffisante pour modéliser le tarissement sous hypothèse de pluie nulle. Deux approches complémentaires sont proposées : l'approche saisonnière pour une prévision à longue échéance, et l'approche pseudo-continue pour une réactualisation calée sur les comités sécheresse.

En second lieu, nous avons appliqué la méthode géostatistique TOPKRIGING dans deux optiques. La première était de comprendre le degré de dépendance spatiale de la variable débit sur la région d'étude. Le second objectif était de proposer une simulation hydrologique spatiale. Ainsi, une vision plus globale sur le territoire de la situation hydrologique est disponible. Les résultats montrent que cette opération est adaptée au contexte cévenol. La simulation s'est montrée particulièrement efficace au sein de régions géologiques homogènes, mais tend à se dégrader au niveau des interfaces géologiques. De plus, l'erreur de krigeage (incertitude statistique) apparaît dynamique dans le temps : elle tend à augmenter en période sèche, et plus particulièrement sur les têtes de bassin versant. Elle tend aussi à évoluer spatialement en fonction de l'activité pluvieuse : une zone soumise à un forçage pluvieux verra automatiquement une incertitude sur la simulation hydrologique plus faible. Cette dernière information semble indiquer que les fonctionnements hydrologiques superficiels sont globalement plus corrélés que la seule vidange des réservoirs souterrains.

Ces limites identifiées, la confrontation de l'analyse de récession et de l'analyse géostatistique offre des perspectives opérationnelles très intéressantes pour la gestion de la ressource. En effet, les simulations TOPKRIGING pourraient servir :

- Au calage du modèle de tarissement en tout point du réseau hydrographique ;
- A la détermination des valeurs Q_0 nécessaires à l'initialisation (prévision saisonnière), ou réinitialisation (prévision pseudo-continue) du modèle de tarissement ;
- A l'établissement des valeurs seuils de vigilance, d'alerte, d'alerte renforcée et de crise demandées dans le cadre de l'arrêté cadre sécheresse étendue à l'ensemble du réseau hydrographique.

Les données du programme HydroPop se sont révélées précieuses pour comprendre finement la dépendance spatiale de la variable débit et ainsi développer un modèle de variogramme théorique représentatif. Ce travail illustre l'importance de la donnée pour la compréhension régionale des systèmes hydrologiques.

Il souligne aussi que toutes informations, même ponctuelles, peuvent être valorisées au sein de ce type d'analyse globale. Ainsi, les démarches citoyennes générant les données “secondaires” proposées dans le cadre de HydroPop (issues des différents profils *lecteurs*, *observateurs* et *experts*) gagneraient à être poursuivies à la fois pour renforcer les connaissances locales et pour garantir le lien entre gestionnaires, professionnels de recherche et la population.

1.4. Références

- Aubé, D. Etat des connaissances sur les effets du changement climatique dans le domaine de l' eau. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée Corse, 2017, pp. 1–36.
- Aubert, A. H., Gascuel-Oudou, C., Gruau, G., Akkal, N., Fauchoux, M., Fauvel, Y., Grimaldi, C., Hamon, Y., Jaffrézic, A., Lecoq-Boutnik, M., Molénat, J., Petitjean, P., Ruiz, L., & Merot, P. (2013). Solute transport dynamics in small, shallow groundwater-dominated agricultural catchments : Insights from a high-frequency, multisolute 10 yr-long monitoring study. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(4), 1379-1391.
- Beven, K. J. (2000). Uniqueness of place and process representations in hydrological modelling. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 4(2), 203-213.
- Blöschl, G. (2006). Hydrologic synthesis : Across processes, places, and scales. *Water Resources Research*, 42(3), Article 3.
- Blöschl, G., Hall, J., Viglione, A., Perdigão, R. A. P., Parajka, J., Merz, B., Lun, D., Arheimer, B., Aronica, G. T., Bilibashi, A., Boháč, M., Bonacci, O., Borga, M., Čanjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G. B., Claps, P., Frolova, N., Ganora, D., ... Živković, N. (2019). Changing climate both increases and decreases European river floods. *Nature*, 573(7772), 108-111. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1495-6>
- Blöschl, G., & Merz, R. (2010). Landform – Hydrology Feedbacks. In J.-C. Otto & R. Dikau (Éds.), *Landform—Structure, Evolution, Process Control* (p. 117-126). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-540-75761-0_8
- Blöschl, G., Sivapalan, M., Wagener, T., Viglione, A., & Savenije, H. (2013). *Runoff Prediction in Ungauged Basins : Synthesis across Processes, Places and Scales*. Cambridge University Press.
- Boussinesq, J. (1877). *Essai sur la théorie des eaux courantes*. Impr. nationale.
- Boussinesq, J. (1904). Recherches théoriques sur l'écoulement des nappes d'eau infiltrées dans le sol et sur le débit des sources. *Journal de mathématiques pures et appliquées*, 10, 5-78.
- Commission Européenne. (2000). *Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau* (N° 327; p. 1-73).
- Cressie, N. (2015). *Statistics for spatial data*. John Wiley & Sons.
- Darcy, H. P. G. (1856). *Détermination des lois d'écoulement de l'eau à travers le sable*.
- Dausse, M. (1842). De la pluie et de l' influence des forets sur la cours d' eau. *Ann. Ponts Chaussees*, Mars-Avril, (184-209).

- Dewandel, B., Lachassagne, P., Bakalowicz, M., Weng, P., & Al-Malki, A. (2003). Evaluation of aquifer thickness by analysing recession hydrographs. Application to the Oman ophiolite hard-rock aquifer. *Journal of Hydrology*, 274(1-4), 248-269. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00418-3](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00418-3)
- EPTB Cèze. (2018). *Plan de Gestion de la Ressource en Eau*. abceze. <http://www.abceze.fr/documents.html>
- EPTB Gardons. (2018). *Plan de Gestion de la Ressource en Eau*. EPTB Gardons. <https://www.les-gardons.fr/plans-actions/plan-ressource-en-eau>
- Ghosh, B. (1951). Random distances within a rectangle and between two rectangles. *Calcutta Mathematical Society*, 43(1), 17-24.
- Gottschalk, L. (1993). Interpolation of runoff applying objective methods. *Stochastic hydrology and hydraulics*, 7(4), 269-281.
- Gottschalk, L., Leblois, E., & Skøien, J. O. (2011). Distance measures for hydrological data having a support. *Journal of hydrology*, 402(3-4), 415-421.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.
- Hall, F. R. (1968). Base-flow recessions—A review. *Water resources research*, 4(5), 973-983.
- Horton, R. E. (1933). The role of infiltration in the hydrologic cycle. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 14(1), 446-460.
- Hrachowitz, M., Savenije, H. H. G., Blöschl, G., McDonnell, J. J., Sivapalan, M., Pomeroy, J. W., Arheimer, B., Blume, T., Clark, M. P., Ehret, U., Fenicia, F., Freer, J. E., Gelfan, A., Gupta, H. V., Hughes, D. A., Hut, R. W., Montanari, A., Pande, S., Tetzlaff, D., ... Cudennec, C. (2013). A decade of Predictions in Ungauged Basins (PUB)—A review. *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1198-1255.
- Ineson, J., & Downing, R. (1964). The groundwater component of river discharge and its relationship to hydrogeology. *Journal of the Institution of Water Engineers*, 18(7), 519-541.
- Lang, C. (2006). *Etiages et tarissements : Vers quelles modélisations ?* 375.
- Lechalas, M. C. (1884). *Hydraulique fluviale*. Baudry.
- Maillet, E. T. (1905). *Essais d'hydraulique souterraine & fluviale*. A. Hermann. <https://archive.org/details/essaisdhydrauli00mailgoog/page/n31/mode/2up>
- Molénat, J., Gascuel-Oudoux, C., Ruiz, L., & Gruau, G. (2008). Role of water table dynamics on stream nitrate export and concentration in agricultural headwater catchment (France). *Journal of Hydrology*, 348(3-4), 363-378.
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.
- Oudin, L., Andréassian, V., Perrin, C., Michel, C., & Le Moine, N. (2008). Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments : A comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3), 15.
- Puechberty, R., Perret, C., Pitsch, S., Battaglia, P., Arnaud, B., Bompart, P., Chauvel, G., Cousseau, J., Dramais, G., Glaziou, G., Hauet, A., Héliouin, S., Lang, M., Larrarte, F., Coz, J., Marchand, P., Moquet,

- P., Payrastre, O., Pierrefeu, P., & Rauzy, G. (2017). *Charte qualité de l'hydrométrie. Guide de bonnes pratiques*.
- Riggs, H. C. (1964). The base-flow recession curve as an indicator of ground water. *Symposium on Surface Waters*, 63, 352-363.
- Roessel, B. (1950). Hydrologic problems concerning the runoff in headwater regions. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 31(3), 431-442.
- Schoeller, H. (1967). Hydrodynamique dans le karst. *Chronique d'hydrogéologie*, 10, 7-21.
- Sivapalan, M., Takeuchi, K., Franks, S. W., Gupta, V. K., Karambiri, H., Lakshmi, V., Liang, X., McDonnell, J. J., Mondonio, E. M., O'Connell, P. E., Oki, T., Pomeroy, J. W., Schertzer, D., Uhlenbrook, S., & Zehe, E. (2003). IAHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003-2012 : Shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6), 857-880.
- Skøien, J. O., Blöschl, G., Laaha, G., Pebesma, E., Parajka, J., & Viglione, A. (2014). rtop : An R package for interpolation of data with a variable spatial support, with an example from river networks. *Computers & Geosciences*, 67, 180-190.
- Skøien, J. O., Merz, R., & Blöschl, G. (2006). Top-kriging—Geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(2), 277-287.
- Tallaksen, L. (1995). A review of baseflow recession analysis. *Journal of hydrology*, 165(1-4), 349-370.
- Wang, D., & Wu, L. (2012). Similarity between runoff coefficient and perennial stream density in the Budyko framework. *Hydrology & Earth System Sciences*, 9(6), Article 6.
- Xu, X., Yang, D., & Sivapalan, M. (2012). Assessing the impact of climate variability on catchment water balance and vegetation cover. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(1), 43-58.