



HAL
open science

Le IETHY du karst, un indicateur à trois paramètres pour caractériser les conditions hydriques du karst : application à la rivière Cèze (Gard, France)

Hervé Chapuis

► To cite this version:

Hervé Chapuis. Le IETHY du karst, un indicateur à trois paramètres pour caractériser les conditions hydriques du karst : application à la rivière Cèze (Gard, France). *Karstologia*, 2020, 75, pp.59 à 63. emse-02948415

HAL Id: emse-02948415

<https://hal-emse.ccsd.cnrs.fr/emse-02948415v1>

Submitted on 5 Oct 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Le IETHY du karst : un indicateur à 3 paramètres pour caractériser les conditions hydriques du karst – application à la rivière Cèze (Gard, France)

The IETHY of karst: a 3-parameters indicator to characterize the hydrological conditions of karst - application to the Cèze River (Gard, France)

Hervé Chapuis, Université de Lyon, UMR EVS 5600, École des Mines de Saint-Étienne, 158 Cours Fauriel – CS 62362, F-42023, Saint-Étienne, France
mail : herve.chapuis@rieau.fr

Mots clés: karst, indicateur hydrologique, débit des sources, rivière Cèze
Keywords: karst, hydrological indicator, spring discharges, Cèze River

Résumé

Dans l'intérêt de créer un point de référence permettant de connaître l'état hydrique de l'ensemble du système karstique et/ou de pouvoir l'associer à de la modélisation, un indicateur de l'état hydrique du karst (IETHY du karst) a été établi à partir de toutes les connaissances acquises sur le fonctionnement de l'hydrosystème karstique de la Cèze. Cet indicateur permet de connaître et de qualifier simplement si à un instant « t », le karst est plus en mesure de contribuer à la montée des eaux en rivière ou, au contraire, à infiltrer les eaux en surface.

Le IETHY du karst est construit à partir des données recueillies sur la source d'Ussel et le pluviomètre MétéoFrance de Méjannes-le-Clap (Gard, France). La base de données recueillie pour la pluie et le débit de la source d'Ussel inclut deux cycles hydrologiques (de 2013 à 2015). Le débit de la source est calculé à partir des données d'hauteurs d'eau enregistrées en continu à l'aide d'une sonde de pression. Cette base de données est convertie en débit grâce à une courbe de tarage réalisée pour cette étude. Pour la construction du IETHY du karst, tous les événements pluvieux pour lesquels la lame d'eau précipitée est égale ou dépasse 4 mm sont pris en compte. Cette condition a permis d'étudier un total de 79 événements pluvieux. Dix paramètres provenant des données de pluie et de débit de la source d'Ussel ont été analysés pour obtenir le IETHY du karst.

Finalement, cet indicateur peut être une donnée pertinente pour la modélisation du comportement de la Cèze qui est influencée par ses interactions avec le système karstique à l'intérieur du canyon karstique (moyenne vallée). Cet indicateur peut aussi être un outil d'exploitation utile aux acteurs locaux pour la surveillance de l'état hydrique du système karstique. L'objectif dans ce travail est de développer une approche

de calcul et de prédiction de l'état hydrique du système karstique, à partir de données facilement disponibles *in situ* et de prédictions météorologiques.

Ce présent article est structuré en 3 parties : tout d'abord un bref rappel du contexte hydrogéologique de la zone d'étude qui comprend la partie karstique du bassin versant de la Cèze, en seconde partie le mode de construction de l'indicateur et dans une dernière partie les résultats obtenus et leur interprétation.

Introduction

Le contenu présenté dans cet article est une partie intégrante du travail de recherche réalisé sur la Cèze dans le but de caractériser, évaluer et modéliser les échanges entre la rivière Cèze et son système karstique qu'elle traverse dans sa partie moyenne vallée [Chapuis, 2017].

L'étude de l'aquifère karstique relève d'un intérêt général pour la reconnaissance et la préservation des réserves naturelles en eau souterraine. En effet, les roches karstiques recouvrent 7 à 10 % de la surface de la Terre [Ford and Williams, 1989 / 2007]. Les aquifères karstiques alimentent environ 25 % de la population en eau potable. Dans le monde, le karst représente entre 15 et 20 % des terres émergées (WoKAM 2017, White 1988, Ford & Williams 2007).

La formation karstique est très hétérogène car celle-ci est composée de fissures, de fractures, de drains ainsi que de formes géomorphologiques de surface favorisant l'infiltration, mais aussi de blocs compacts. Cette hétérogénéité influence les écoulements souterrains. L'étude de ces écoulements peut permettre de caractériser le système karstique [Bakalowicz, 2005]. Dans le but de déterminer les écoulements souterrains d'un système karstique, plusieurs modèles intègrent des données caractéristiques du karst [Kiraly, 1998 ; Jourde et al., 2007 ; Johannet, 2011 ; Fleury et al., 2011 ; Bailly-Comte et al., 2010 et Bailly-Comte et al., 2012]. Cependant, l'élaboration d'indicateurs synthétiques sur l'état hydrique d'un système karstique s'avère intéressant.

Le travail présenté dans cet article comprend l'élaboration d'un indicateur informant sur l'état hydrique du système karstique. Les résultats de ce travail offrent des perspectives pour de futures modélisations du système karstique.

Les interactions entre le système karstique et un cours d'eau, d'un point de vue quantitatif, varient durant un cycle hydrologique. Compte tenu des modifications climatiques attendues, la prévision de l'évolution hydrodynamique du système karstique est très importante pour protéger la population des crues et préserver la ressource de manière durable.

1. Contexte hydrogéologique de la zone d'étude

La zone étudiée se situe dans le Sud-Est de la France, dans le département du Gard et plus exactement au Nord-Est de celui-ci, entre le plateau karstique de Méjannes-le-Clap et la rivière Ardèche (figure 1). Ce site fait l'objet d'une étude pluridisciplinaire ayant pour objectif de caractériser les échanges entre l'aquifère karstique et la rivière Cèze [Ré-Bahuaud et *al.*, 2015]. Cette étude qui est soutenue par l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse sert des intérêts scientifiques ainsi que la politique territoriale pour une gestion durable de l'aquifère karstique.

Le climat est de type méditerranéen et se traduit par une période de sécheresse en été et des pluies intenses en automne provoquant des phénomènes de crues dans le lit de la Cèze. La zone karstique est un plateau calcaire incisé par la Cèze. Parfois, en période de sécheresse, la Cèze s'assèche totalement, notamment à l'entrée de ses gorges karstiques du fait de l'infiltration du cours d'eau dans l'aquifère karstique *via* les alluvions de la Cèze ou directement sur son bedrock [Chapuis, 2017]. Le plateau calcaire, plateau de Méjannes-le-Clap, a fait l'objet de plusieurs études hydrogéologiques, incluant des investigations et explorations du réseau karstifié (donnant lieu parfois à la réalisation de topographies du réseau) et des opérations de traçages artificiels [Jolivet, 2013 et Pouzancre, 1971]. De ces informations, il résulte que l'impluvium du système karstique est d'environ 200 km². Ce karst alimente des sources en bordure de Cèze dont le débit minimal peut être nul en entrée des gorges durant la période de sécheresse, pour un débit d'environ 200 m³/s en période de hautes eaux et un débit maximal enregistré à 2 210 m³/s lors de la crue du 09/09/20002 (station hydrométrique de Tharoux / réf. : V5454010). D'un point de vue hydrogéologique, les interactions avec la Cèze se font au contact des formations calcaires du Barrémien et Aptien inférieur (représentant localement l'Urgonien) qui sont très karstifiées.

Les sources recensées en rive droite de la Cèze, le long des gorges karstiques, peuvent s'assécher ou voir leur débit devenir très faible (quelques L/s ; exemple de la source d'Ussel présentée sur la figure 1). Ces sources connaissent des variations importantes de débit durant un cycle hydrologique. Dans ce système karstique, l'écoulement des eaux souterraines est conditionné par les réseaux de fissures, la présence de failles et le contact avec des formations sous-jacentes moins perméables.

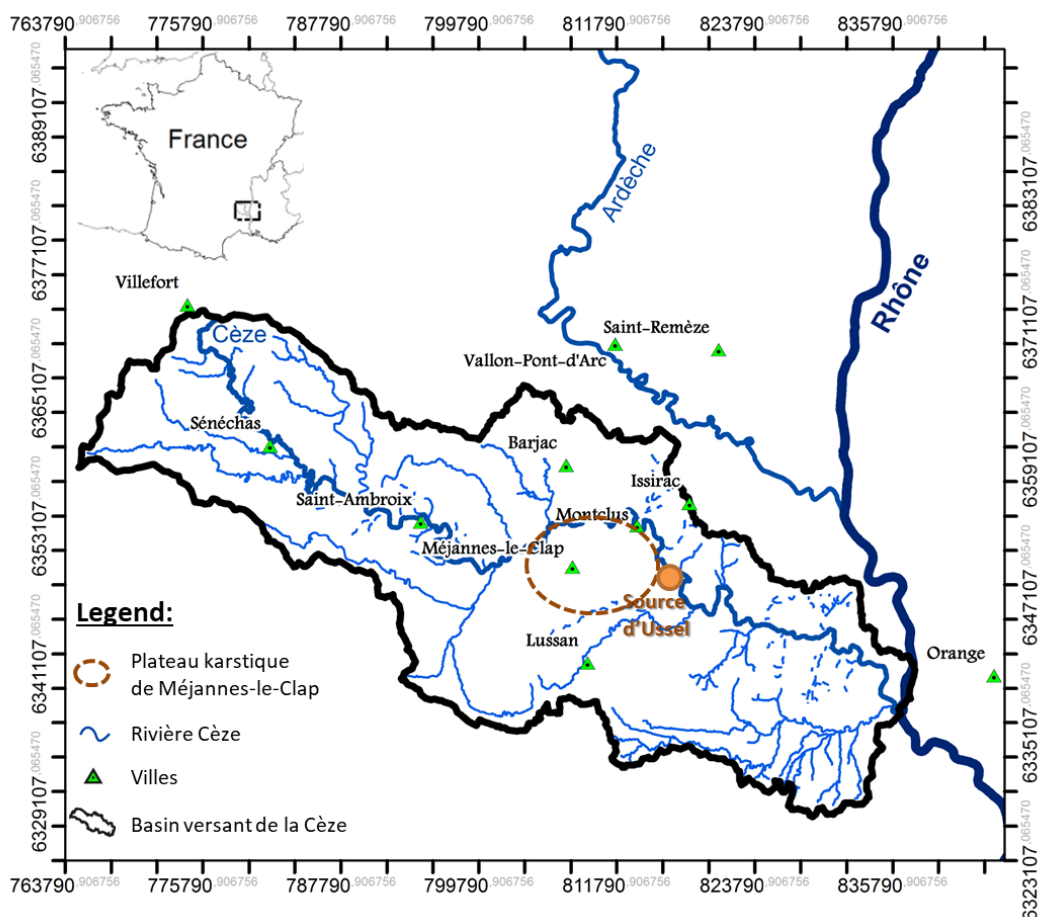


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude
Location of the study area

2. Création et construction de l'indicateur de l'état hydrique du karst (IETHY)

2.1. Acquisition de la base de données

La construction de cet indicateur est basée sur l'étude des différentes données enregistrées dans le cadre de ce travail, au droit de la source d'Ussel ainsi qu'au pluviomètre de Météo-France localisé sur la commune de Méjannes-le-Clap. Ces données enregistrées en continu sont représentatives de l'hydrodynamisme du système karstique en contexte de basses eaux et de hautes eaux. Un des intérêts de cet indicateur est de pouvoir être utilisé comme une donnée d'entrée pour un modèle hydrologique afin de simuler le comportement hydrique du système karstique à un instant « t ». L'indicateur pourra ainsi déterminer si le système karstique joue un rôle d'infiltration des eaux superficielles et donc d'écrêteur de crue ou s'il contribue à augmenter le débit des eaux de ruissellement en alimentant le cours d'eau.

Pour mener à bien cette étude, l'acquisition de données météorologiques et débitmétriques au droit de la source d'Ussel a été nécessaire :

- les données météorologiques sont celles enregistrées au droit de la station de mesures hydrométriques de Météo-France située sur la commune de Méjannes-le-Clap (référence de la station : 30164001) ;
- les données de débit¹ au droit de la source d'Ussel ont été enregistrées à l'aide d'une sonde d'enregistrement automatique type CTD (Levelogger Solinst® / précision : ± 1 %).

Les enregistrements en continu du débit de la source d'Ussel et l'exploitation des données de précipitation représentent une base de données volumineuse. Pour rendre plus facile et améliorer le traitement de la base de données, il est important de disposer d'un pas de temps adapté à l'utilité de l'indicateur. Les rivières traversant des systèmes karstiques dans le Sud de la France, dans le contexte climatique évoqué précédemment, peuvent se mettre en crue en seulement quelques heures. Nous avons donc opté de travailler avec un pas de temps horaire. Les chroniques de données couvrent une période d'environ 2 ans, soit du 14 octobre 2013 au 21 septembre 2015.

Pour que l'indicateur soit fiable, il est nécessaire que les données soient représentatives de l'ensemble du système karstique. Dans notre cas d'étude, le choix de créer notre base de données au droit de la source d'Ussel est lié à cette représentativité. De même pour les données de précipitation de la station de Méjannes-le-Clap qui sont représentatives des eaux superficielles pouvant s'infiltrer sur le plateau de Méjannes-le-Clap et donc sur l'impluvium du système karstique de la source d'Ussel.

Une fois la base de données créée, il devient possible de sélectionner tous les événements pluvieux pour lesquels la lame d'eau précipitée est égale ou supérieure à 4 mm. Ceci permet d'intégrer un panel assez large d'événements pouvant avoir un impact sur l'état hydrique du système karstique qui se répercuterait sur le débit de la source d'Ussel. Pour cela, il faut distinguer les événements pluvieux qui affectent les débits de la source d'Ussel de ceux qui sont trop faibles et donc totalement écrêtés par le système karstique ou par évapotranspiration. Nous considérerons que les pluies inférieures à 4 mm de lame d'eau n'influencent ni l'état hydrique du système karstique ni le débit de la source d'Ussel. Ainsi pour chaque pluie supérieure à 4 mm de lame d'eau précipitée, l'évolution du débit de la source Ussel est analysée.

Pour chaque événement pluvieux étudié, plusieurs paramètres ont été analysés :

- l'épaisseur de la lame d'eau précipitée (mm) ;
- l'intensité maximale de la précipitation (mm par 1 h, 2 h, 5 h et 10 h) ;
- l'intensité moyenne de l'épisode pluvieux (mm/h) ;
- le centre de gravité de l'hydrogramme de pluie (mm/h) ;

¹ La sonde d'enregistrement a permis de mesurer la pression de la colonne d'eau correspondante (source de trop plein) ; cette pression a été convertie en débit grâce à une courbe de tarage réalisée pour cette étude.

- le cumul de pluie analysé depuis 3, 15 et 30 jours avant la fin de l'évènement pluvieux étudié (mm) ;
- le centre de gravité de l'hydrogramme de débit de la source d'Ussel (m de colonne d'eau et m³/s) ;
- le cumul de pluie précédant l'évènement pluvieux analysé (mm sur 3 j, 15 j et 30 j) ;
- les conditions initiales à la source d'Ussel (hauteur d'eau : m et débit : m³/s) ;
- le volume d'eau total qui a transité à la source d'Ussel calculé à partir de l'hydrogramme (m³) ;
- le débit maximal mesuré à la source d'Ussel (m³/s).

Au total, 79 évènements avec une pluviométrie supérieure à 4 mm de lame d'eau précipitée ont été retenus pour la détermination du IETHY du karst.

2.2. Détermination du IETHY du karst

L'indicateur de l'état hydrique du karst a été construit selon un processus d'itérations manuel entre les évolutions des 10 paramètres présentés précédemment.

Pour comparer l'évolution des différents paramètres entre eux, nous avons effectué un regroupement en 3 catégories :

- **paramètres liés à l'évènement pluvieux** (lame d'eau précipitée / intensité maximale de la précipitation / intensité moyenne de l'épisode pluvieux / centre de gravité de l'hydrogramme de pluie / cumuls de pluies depuis 3, 15 et 30 jours) ;
- **paramètres liés au débit de la source** (centre de gravité de l'hydrogramme de débit / volume d'eau total qui a transité / débit maximal) ;
- **paramètres liés au contexte hydrique initial de l'aquifère karstique** (cumuls de pluies précédant l'évènement à 3, 15 et 30 jours avant l'évènement pluvieux / conditions initiales à la source d'Ussel (débit et hauteur d'eau avant l'évènement pluvieux).

La construction du IETHY du karst consiste à établir une relation entre l'évolution de 3 paramètres liés respectivement à la source d'Ussel, aux précipitations et aux conditions hydriques de l'aquifère.

Cette méthode comprend l'étude graphique de chacune des relations possibles, soit un total de 84 graphiques. Par mesure de lisibilité, nous présentons ici, le résultat le plus pertinent issu de cette étude graphique (figure 2).

Parmi la multitude de combinaisons testées, la plus pertinente est le débit maximal mesuré à la source d'Ussel (m³/s) lors d'un évènement pluvieux, comparé à l'intensité maximale de la pluie (mm/h), La figure 2 montre un nuage de points qui se répartissent selon 2 directions distinctes :

- une évolution du débit maximal de la source d'Ussel peu marquée « courbe de tendance en pointillé » malgré une intensité maximale de pluie importante ;
- une évolution du débit maximal de la source d'Ussel plus marquée « courbe de tendance en tireté » en fonction de l'intensité maximale de la pluie.

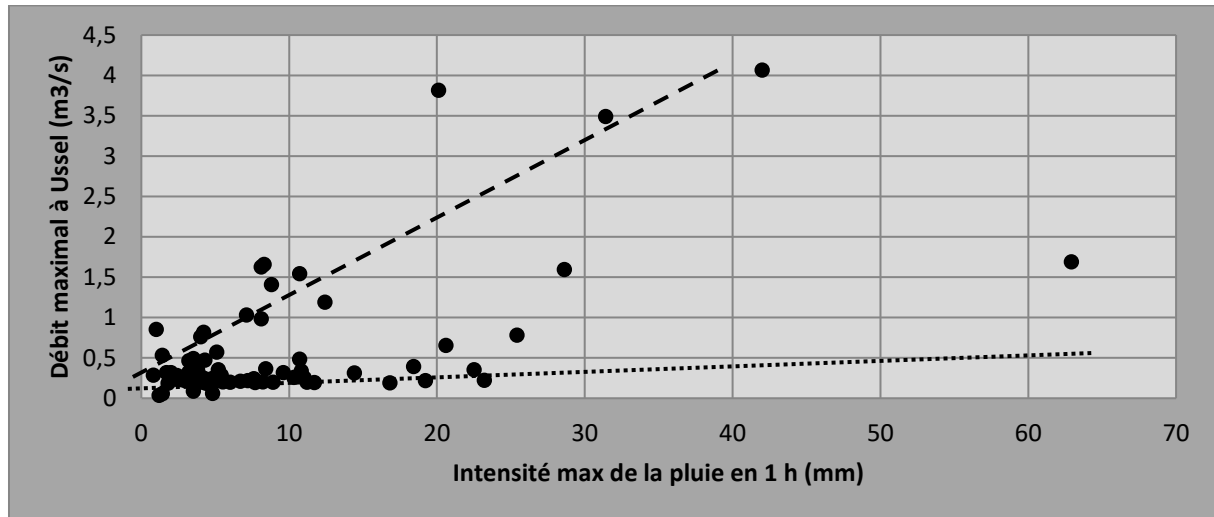


Figure 2 : Comparaison graphique du débit maximal mesuré à la source d'Ussel en fonction de l'intensité maximale de l'évènement pluvieux mesuré sur 1 heure
 Graphic comparison of the maximum flow measured at the source of Ussel based on the maximum intensity of the rain event measured over 1 hour

Ces deux tendances d'évolution du débit maximal de la source d'Ussel en fonction de l'intensité maximale de l'épisode pluvieux ne peuvent être validées que si l'on prend en compte un 3^{ème} paramètre lié aux conditions hydriques initiales du karst avant l'évènement pluvieux considéré.

Les premiers résultats obtenus ont mis en évidence que les conditions initiales de la source d'Ussel sont un critère pertinent pour suivre l'effet des autres paramètres sur l'évolution hydrique du système karstique. Les conditions hydriques initiales du système karstique seront donc représentées par le débit initial de la source d'Ussel (m³/s). Le IETHY du karst est donc construit à partir du débit initial de la source d'Ussel.

Sur la figure 3, ce paramètre a été distingué selon 3 niveaux de couleurs représentatives de l'état hydrique du système karstique : basses eaux, hautes eaux et situation intermédiaire, respectivement vert, noir et jaune.

Concernant le premier indicateur de l'état hydrique du karst « IETHY 1 », représentatif d'un système karstique en basses eaux, le débit initial de la source Ussel est égal ou inférieur à 220 L/s (soit > à 0,22 m³/s).

Le IETHY 2, représentatif d'un régime intermédiaire entre les conditions de basses eaux et hautes eaux du système karstique, est compris entre un débit initial supérieur à 220 L/s et inférieur à 350 L/s (soit 0,35 m³/s).

En période de hautes eaux, le système karstique est représenté par le IETHY 3 dont le débit initial correspond à un débit égal ou supérieur à 350 L/s (soit > à 0,35 m³/s).

Sur la base de ces débits initiaux, et pour chacun des événements de précipitations retenus dans notre base de données, tous les paramètres exposés au paragraphe précédent sont corrélés entre eux.

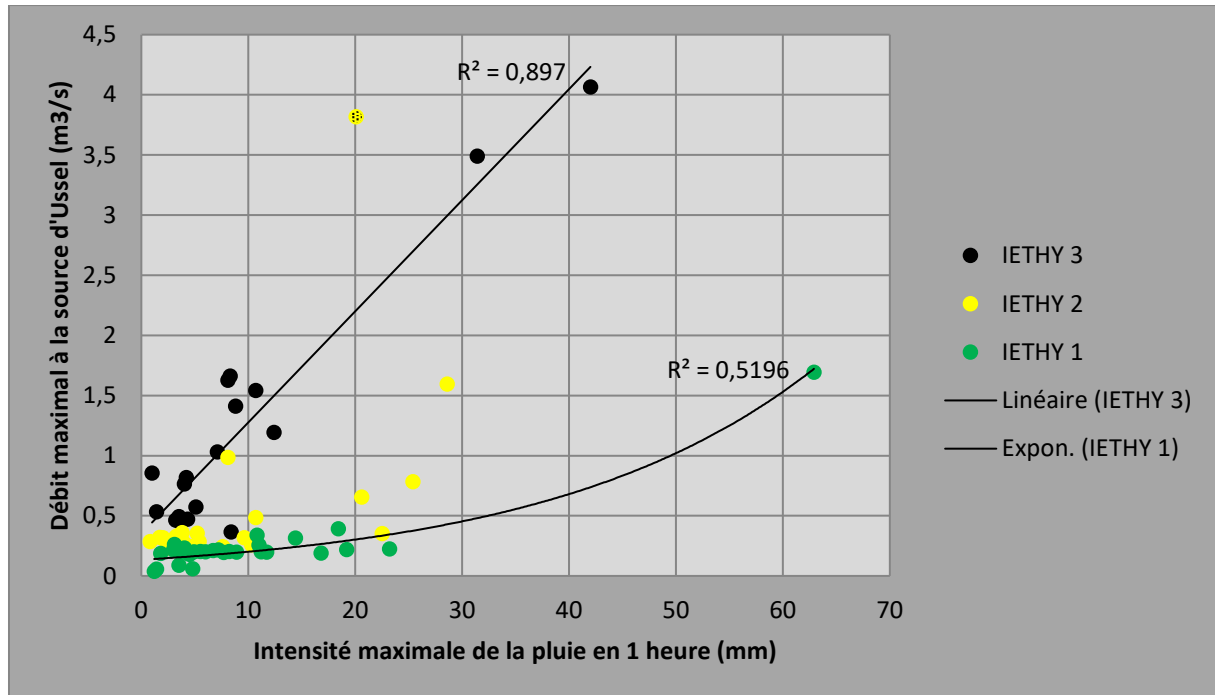


Figure 3 : Résultat graphique de la détermination du IETHY du Karst divisé en 3 états hydriques du système karstique de 1 à 3, respectivement de l'état de basses eaux à hautes eaux (code couleur : vert, jaune et noir). Le IETHY présenté sur ce graphe est déterminé à partir de 3 paramètres qui sont l'intensité maximale de la pluie en 1h (en x), le débit maximal enregistré à la source d'Ussel (en y) et le débit initial de la source d'Ussel

Graphic result of the determination of the Karst IETHY divided into 3 water states of the karst system from 1 to 3, respectively from the state of low water to high water (color code: green, yellow and black). The IETHY presented on this graph is determined from 3 parameters which are the maximum intensity of the rain in 1 hour (x), the maximum flow recorded at the Ussel source (y) and the initial flow of the Ussel source

3. Interprétation des résultats obtenus avec le IETHY du karst et discussion

La figure 3 représente le débit maximal qui transite par la source d'Ussel (en ordonnée) en fonction d'une intensité maximale de pluie mesurée sur un pas de temps horaire unitaire sur le plateau karstique de Méjannes-le-Clap (abscisse). Le nuage de points comporte 3 couleurs, vert, jaune et noir afin d'intégrer un troisième paramètre : le débit initial de la source d'Ussel. Le IETHY du karst se décompose ainsi en 3 états représentatifs du contexte hydrique du système karstique.

Le résultat obtenu montre que le débit de la source d'Ussel évolue différemment selon l'intensité des pluies. En effet, dans le cas du IETHY 1, représenté par les points verts sur la figure 3, le débit maximal de la source d'Ussel n'augmente que faiblement malgré une intensité de pluie élevée. Même si l'évolution du débit maximal suit une courbe de tendance de type exponentielle, seule une intensité pluvieuse exceptionnelle supérieure à 60 mm en 1 heure fait augmenter significativement le débit de la source d'Ussel (augmentation d'environ 1,7 m³/s). Le débit de la source d'Ussel ne dépasse pas 0,5 m³/s dans les autres cas. La courbe de tendance présente un coefficient de corrélation $R^2 \approx 0,52$ ce qui reste faible. Le faible nombre de points, notamment représentatifs de fortes intensités maximales de la pluie, contribue à dégrader ce coefficient de corrélation.

Dans le cas du IETHY 3, représenté par les points en noir sur la figure 3, l'évolution du débit de la source d'Ussel augmente linéairement et approximativement de 1 m³/s pour une amplification de 10 mm de précipitation par heure.

Les résultats présentés ci-avant permettent d'obtenir des informations qualitatives, mais aussi quantifiées et qui sont représentatives des conditions hydriques du système karstique. Cette méthode dont la robustesse pourrait être améliorée en fonction de la complétude de la base données utilisée pourrait être appliquée à d'autres systèmes karstiques.

4. Conclusion

La création d'une base de données grâce au suivi du débit de la source d'Ussel et des précipitations à la station pluviométrique de la commune de Méjannes-le-Clap permet de disposer de plusieurs paramètres pour déterminer un indicateur de l'état hydrique du système karstique.

Son élaboration est fondée sur l'analyse des événements pluvieux correspondant à une lame d'eau précipitées d'au moins 4 mm sur la période de septembre 2013 à septembre 2015 (soit 2 cycles hydrologiques).

Les résultats ont permis de démontrer qu'il est possible de représenter l'état hydrique du système karstique par un indicateur selon 3 états, (i) IETHY 1 déterminé avec un débit initial de la source d'Ussel inférieur ou égal à 220 L/s, ce qui équivaut à un système karstique en basses eaux avec un rôle d'infiltration des eaux superficielles et d'écrêteur de crue ; (ii) IETHY 2 avec un débit initial de la source d'Ussel compris entre 220 et 350 L/s qui représente la phase de transition entre un système karstique à l'étiage et un système karstique saturé ; (iii) IETHY 3 avec un débit initial de la source d'Ussel supérieur ou égal à 350 L/s et qui représente un système karstique en hautes eaux donc avec un potentiel d'infiltration des eaux superficielles très faible voir nul et une contribution aux crues.

Cet indicateur qui a pour ambition de devenir un outil d'aide à la modélisation peut aussi être utilisé comme un outil de prédiction sur l'évolution hydrique du système karstique en fonction du climat prévu par les modèles météorologiques. Il peut donc ainsi être une aide à la décision pour les acteurs locaux dans le but de préserver la ressource en eau que le système karstique représente ou de donner l'alerte en cas d'inondations potentielles. Pour valider ce IETHY du karst, il serait bien sûr nécessaire de le confronter à de nouveaux événements pluvieux.

Bibliographie

- Bailly-Comte, V., Borrell-Estupina, V., Jourde, H., Pistre, S., 2012. A conceptual semidistributed model of the Coulazou River as a tool for assessing surface water–karst groundwater interactions during flood in Mediterranean ephemeral rivers. *Water Resour. Res.* 48, W09534. <https://doi.org/10.1029/2010WR010072>
- Bailly-Comte, V., Martin, J.B., Jourde, H., Sreaton, E.J., Pistre, S., Langston, A., 2010. Water exchange and pressure transfer between conduits and matrix and their influence on hydrodynamics of two karst aquifers with sinking streams. *Journal of Hydrology* 386, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.005>
- Bakalowicz, M., 2005. Karst groundwater: a challenge for new resources. *Hydrogeol J* 13, 148–160. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0402-9>
- Chapuis H., 2017. Caractérisation, Evaluation, Modélisation des échanges entre aquifères karstiques et rivières : application à la Cèze (Gard, France), Université de Lyon, UMR EVS 5600, École des Mines de Saint-Étienne
- Chapuis H., Jolivet, J., Ré-Bahuaud, J., Paran, F., Graillot, D., Guy, B., 2017. Displacement of Watershed between Two Karstic Rivers. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 95, 022021.
- Fleury, P., Charlier, J.-B., Borrell, V., Coustau, M., 2011. Appui au SCHAPI 2011 - Module 1: Mise en place d'un indicateur d'aide à la décision pour la prévision de crue en milieu karstique: les bassins versants du Lez et de la Tardoire.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. Academic Division of Unwin Hyman London.
- Ford, D.C., Williams, P.W., 2007. *Karst geomorphology and hydrology*. Academic Division of Unwin Hyman London.
- Johannet, A., 2011. Modélisation par apprentissage statistique des systèmes naturels, ou en interaction avec un environnement naturel. Applications aux karsts, crues éclair et en robotique.
- Jourde, H., Roesch, A., Guinot, V., Bailly-Comte, V., 2007. Dynamics and contribution of karst groundwater to surface flow during Mediterranean flood. *Environ Geol* 51, 725–730. <https://doi.org/10.1007/s00254-006-0386-y>

- Kiraly, L., 1998. Modelling karst aquifers by the combined discrete channel and continuum approach. *Bulletin d'Hydrogéologie* 16, 77–98.
- Ré-Bahuaud, J., Jolivet, J., Marmonier, P., Johannet, A., Graillot, D., Paran, F., Chapuis, H., Guy, B., Faroux, J., Creuzé des Châtelliers, M., Olivier, M.-J., Jacquy, M., Lawniczak, M., Novel, M., Savary, M., Salze, D., Vayssade, B., 2015. Caractérisation des échanges entre eaux superficielles (rivière) et eaux souterraines en domaine karstique. Exemple d'un affluent du Rhône, la Cèze (30). Rapport provisoire année 2 (2014-2015) (Action n°43 du Programme 2014 (action 49 en 2015) au titre de l'accord cadre Agence de l'Eau ZABR).
- White, W. B., 1988. *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. New York: Oxford university press. (Vol. 464).
- WoKAM, 2017. *World Karst Aquifer Map (WoKAM) 1: 40 000*. Published in 2017 and presented at the 44th Congress of the International Association of Hydrogeologists (IAH). Dubrovnik/Croatia.