

Colloque
"Gestion des eaux souterraines"
Bordeaux - 2023

Article étendu

Titre
<i>Quantification de l'impact de prélèvements sur les débits de sources karstiques</i>
Nom des auteurs
<i>LABAT, David (1) ; ARGOUZE, Rémi (1) ; SIVELLE, Vianney (2) ; SUBIAS, Christophe (3)</i>
Affiliation
<i>(1) Géosciences Environnement Toulouse, UMR 5563 UPS-CNRS-IRD-CNES, 14 Avenue Edouard Belin, 31400 Toulouse, France</i>
<i>(2) HydroSciences Montpellier (HSM), Université de Montpellier, CNRS, IRD, 34090 Montpellier, France</i>
<i>(3) Antea Group, Rue Jean Bart Immeuble Le Diapason - Labège</i>

Abstract

Les systèmes karstiques constituent des aquifères hétérogènes caractérisés par un comportement hydrogéologique fortement non linéaire. Ceci est intrinsèquement lié à la coexistence d'écoulements saturés versus non saturés, d'écoulements à surface libre versus en charge et enfin d'écoulements laminaires versus turbulents au sein de ces aquifères. Ces multiples dualités ainsi qu'une méconnaissance de leur structure interne conduisent à des difficultés croissantes dans la gestion des ressources en eaux souterraines liées aux aquifères karstiques. Or, les aquifères karstiques constituent des ressources stratégiques en eau douce et de nombreux acteurs procèdent à des prélèvements parfois continus ou centrés sur la période d'étiage comme pour l'irrigation. Ces prélèvements génèrent des variations de débit qui peuvent constituer des sources de conflits entre utilisateurs amont et aval de la ressource.

Dans cette étude, nous proposons une méthodologie pour évaluer l'impact des prélèvements sur le débit de source d'un aquifère karstique basée sur un modèle conceptuel de réservoirs non linéaires. Cette méthodologie propose notamment d'utiliser les résultats des traçages artificiels.

Appliquée au deuxième plus grand système karstique de France, le système karstique de la Touvre, nous avons démontré que l'influence simulée des prélèvements totaux sur le déficit en étiage est plus importante que les prélèvements totaux en relation avec la non-linéarité des modèles conceptuels. Globalement, nous montrons que cela implique une diminution de 10% à 20% du débit annuel d'étiage. Nous discuterons aussi les potentielles prises en compte des projections climatiques sur ces résultats.

Introduction

L'approvisionnement et la protection des ressources en eau sont aujourd'hui devenus une préoccupation majeure et constituent un défi décisif pour la prochaine décennie dans un contexte d'augmentation de la population mondiale et de dérèglement climatique global. Le changement climatique et la pression anthropique croissante sur les ressources en eau douce nous incitent donc à proposer des plans de gestion qui prennent en compte tous les paramètres.

Parmi les différents stocks disponibles et présents sur une grande partie du globe, les aquifères karstiques constituent des hydro-systèmes hétérogènes, extrêmement sensibles aux changements récents et dont l'exploitation durable constitue un défi majeur pour les gestionnaires de l'eau. En France, les aquifères karstiques sont présents sur une grande partie du territoire avec environ 35% de sa surface constituée d'affleurements carbonatés.

La difficulté majeure pour appréhender le fonctionnement des aquifères karstiques réside dans la compréhension de l'hétérogénéité de ces structures et de leurs conséquences sur les processus d'écoulement des eaux, notamment sur la dynamique des faibles débits. Face à une telle complexité et diversité d'organisation et de fonctionnement, il est souvent difficile de proposer une politique de gestion durable de la ressource en eau, en particulier lorsque de nombreux acteurs dépendent de cette ressource dans une zone donnée.

Afin de quantifier l'impact des pressions anthropiques, nous proposons ici une nouvelle méthodologie parcimonieuse de reconstitution du débit naturel des sources, qui consiste à estimer les variations temporelles du débit non influencé par les prélèvements. Une telle reconstitution permet ainsi d'estimer le régime hydrologique du bassin versant en l'absence de prélèvement anthropique sur les ressources en eau. Nous proposons une approche conceptuelle car dans de nombreux cas, il y a un manque de données disponibles sur les bassins versants karstiques, notamment en ce qui concerne la spatialisation du réseau karstifié. Il est important de noter une autre limite de notre approche. En effet, d'autres actions anthropiques telles que les changements d'occupation du sol en termes de rotations agricoles, par exemple, ou les impacts du changement climatique sur les conditions hydroclimatiques ne sont pas, pour le moment, considérés dans notre approche.

La modélisation proposée ici évalue l'impact des prélèvements sur les volumes disponibles à l'exutoire. Notre objectif est de proposer une méthode générale d'évaluation de l'impact des prélèvements sur un système karstique en utilisant un modèle conceptuel avec des réservoirs non linéaires représentant les principaux processus d'écoulement des eaux souterraines karstiques.

La méthodologie proposée peut être divisée en trois étapes :

1. Construire un modèle hydrologique adapté au système karstique, intégrant les données géologiques et hydrogéologiques, pluviométrique et d'évapotranspiration, d'apports de surface via les pertes potentielles, et surtout intégrant les prélèvements et les rejets (d'origine agricole, industrielle ou domestique) ;
2. Estimer les paramètres du modèle hydrogéologique à partir des données disponibles pour la calibration du modèle ;
3. Proposer une nouvelle simulation du débit sur la période considérée avec la suppression des captages et quantifier l'impact des prélèvements sur le débit des basses eaux.

Nous proposons une application de cette méthodologie au grand système karstique français de la Touvre, qui regroupe des problèmes de compréhension de la physique des écoulements liés aux spécificités karstiques, ainsi que des problèmes liés aux pressions anthropiques avec différents usagers de l'eau sur le bassin versant.

Méthodes

Notre objectif est de proposer un modèle hydrogéologique basé sur la plateforme de modélisation KarstMod, qui peut être modulé pour simuler le débit à l'exutoire et quantifier les flux internes entre les différents compartiments du modèle et qui peut être appliqué à différents bassins versants karstiques. KarstMod est développé par le Service National d'Observation du Karst (SNO Karst-INSU/CNRS). Le modèle proposé comprend trois compartiments organisés en deux niveaux. Le niveau supérieur correspond au réservoir E (Epikarst). Il représente la partie non saturée du système, qui est aussi l'emplacement d'un aquifère transitoire. Ce réservoir est connecté avec les deux réservoirs du niveau inférieur : C (Conduit) et M (Matrice).

Site d'études et données disponibles

Le système karstique de la Touvre (Cf. figure 1) est constitué d'un système binaire. L'infiltration consiste en une infiltration différée des pluies efficaces sur la zone de recharge karstique, mais aussi en une infiltration ponctuelle des eaux de surface de la Tardoire, du Bandiat et dans certaines conditions de la Bonnieure. Le massif calcaire constituant l'aquifère est bien délimité. La limite orientale correspond à la transition entre les marnes du Toarcien-Alénien et les calcaires du Bajocien. La limite ouest correspond à la limite des faciès récifaux du Jurassique supérieur au-delà desquels les formations deviennent marneuses, et donc moins susceptibles de développer des réseaux karstiques. A l'ouest, la limite correspond à la faille d'Echelle. Les limites nord et sud correspondent à des crêtes piézométriques.

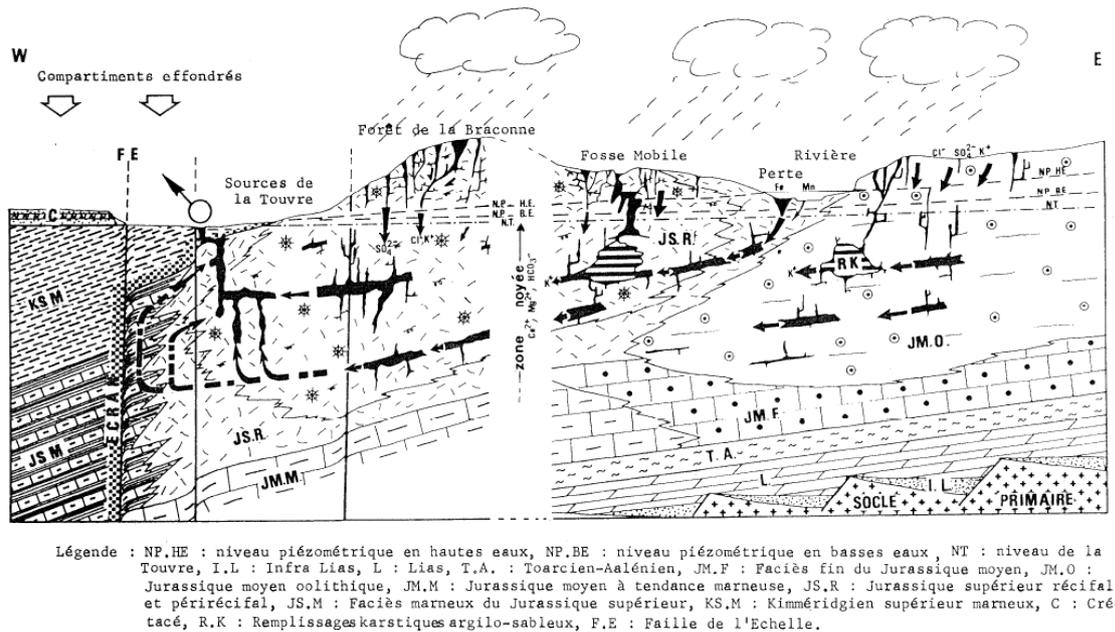


Figure 1 : Schématisation du système de la Touvre (source thèse de D. ROUILLER)

Les sources de la Touvre ont trois exutoires principaux (le Bouillant, le Dormant et la Font de Lussac) et un exutoire secondaire (la Lèche) qui se situe à environ 500 m du premier. Ils drainent un massif de calcaires du Jurassique moyen et supérieur, qui s'étend du nord-est au sud-est des émergences sur les marges du Massif Central. Ces exutoires sont situés à 7 km à l'est d'Angoulême.

Le Bandiat et la Tardoire prennent leur source en dehors de la zone sédimentaire sur des terrains cristallins imperméables du Massif Central (Cf. figure 2). Dès que les rivières quittent les terrains imperméables et pénètrent dans les régions calcaires fracturées, des pertes se produisent. Actuellement, les infiltrations d'eau sont telles que les eaux des deux rivières sont perdues dans leur totalité jusqu'à neuf mois par an. La Tardoire ne rejoint la Charente qu'en période de hautes eaux. Les pertes commencent à la Feuillade sur le Bandiat et à Montbron sur la Tardoire. L'influence de la Bonnieure est moins évidente. En effet, en conditions de hautes eaux, on observe un pic piézométrique entre la Bonnieure et le bassin versant de la Touvre, traduisant probablement l'apport d'eau de la nappe superficielle contenue dans les formations sablo-argileuses. En revanche, à l'étiage, cette crête hydraulique n'existe plus. Durant ces périodes, il existe probablement un processus d'alimentation de la nappe karstique par la Bonnieure.

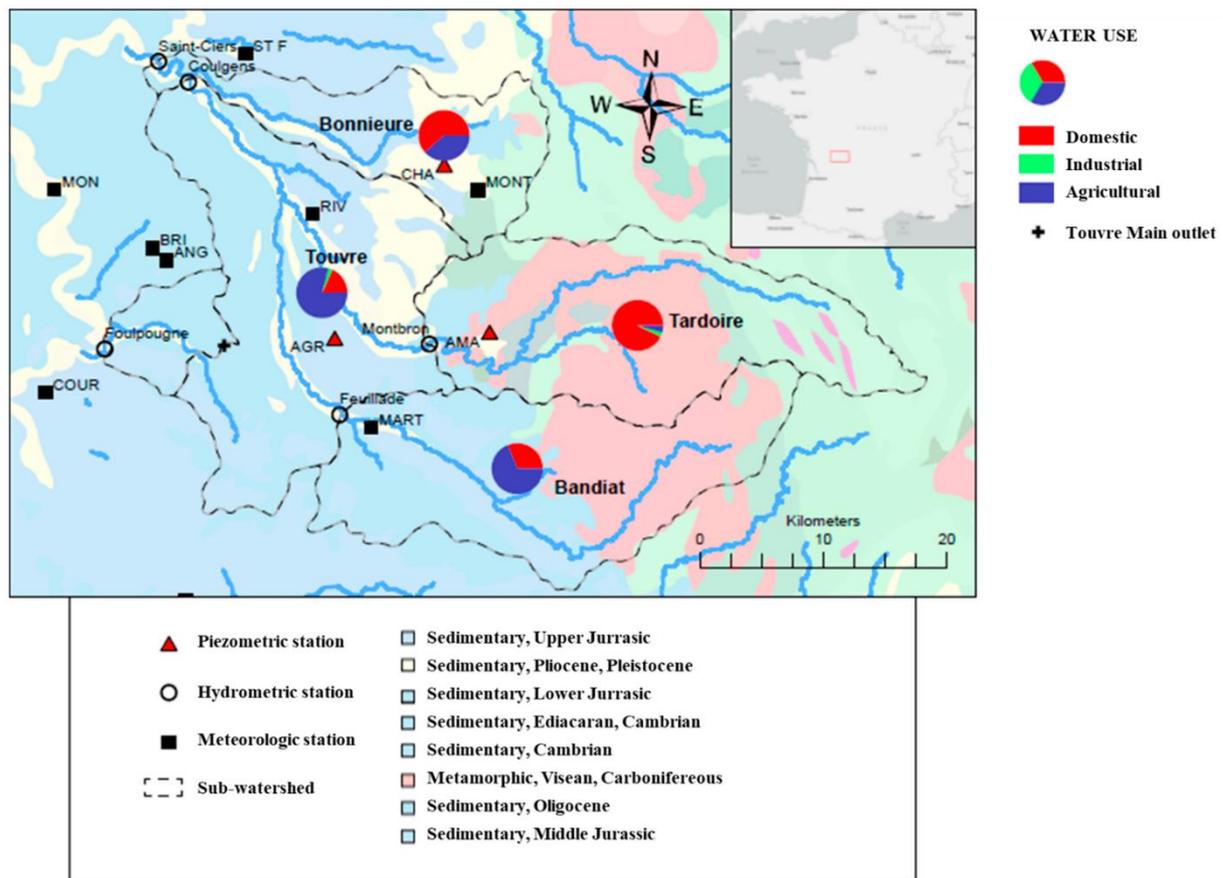


Figure 2. Localisation du système karstique de la Touvre et emplacement des stations piézométriques, hydrométriques et météorologiques. Les pourcentages des différents usages de l'eau sont donnés pour différents points (Touvre, Bandiat, Bonnieure and Tardoire)

(AGR: Agris, AMA: Amant, ANG: Angoulême-Brie-Champoniers, BRI: Brie, CHA: Chazelles, COUR: La Couronne, MART: Marthon, MON: Montignac, MONT: Montembœuf, RIV: Rivières and STF: Saint-Front)

La station de la Touvre à la résurgence de Foulpougne est suivie depuis 1980. Par ailleurs, pour considérer les infiltrations sur l'impluvium karstique, nous avons utilisé les données de débits journaliers mesurés aux stations de Montbron pour la Tardoire, Feuillade pour le Bandiat et Saint Ciers pour la Bonnieure, également extraites de la base de données HYDRO (<http://www.hydro.eaufrance.fr/> du 1er janvier 2016 au 31 décembre 2018).

Enfin, afin de pouvoir estimer les pertes du Bandiat et de la Tardoire lors de leur passage sur l'impluvium calcaire, les données de débits journaliers mesurés à la station de Coulgens ont été introduites dans le modèle. En effet, les débits mesurés à Coulgens sont caractérisés pendant la période estivale par un assèchement total et donc une infiltration des rivières dans le karst. En période de hautes eaux, l'infiltration via les pertes est également active et le débit augmente à la station de Coulgens. Afin d'estimer la pluie effective, une estimation des précipitations quotidiennes a été réalisée à partir des relevés pluviométriques d'un maximum de huit stations météorologiques gérées par Météo-France. Cependant, au cours de la période d'étude, les données pluviométriques quotidiennes n'étaient pas disponibles pour l'ensemble de la période 2006-2018 et nous avons donc proposé une estimation avec des polygones de Thiessen de taille variable. Pour l'estimation de l'ETP journalière, nous avons utilisé la formule d'Oudin pour les périodes disponibles et avons ensuite appliqué la méthode des polygones de Thiessen.

Concernant l'estimation des prélèvements anthropiques, les données annuelles de prélèvements sur le bassin versant de la Touvre et les trois autres bassins versants de surface, couvrant la période 2006-2018, ont été fournies par l'Agence de l'eau Adour Garonne. En 2015, on dénombrait plus de 175 points de prélèvements déclarés sur les quatre bassins versants (dont 84 dans l'impluvium karstique de la Touvre).

Résultats et discussions

Dans l'ensemble, le modèle simule correctement les périodes de hautes et basses eaux, même si certaines années peuvent présenter des écarts. De plus, le modèle reproduit bien la cinétique de la montée des eaux en fin d'étiage. Il est également intéressant de s'intéresser à la dynamique interne du modèle et donc aux variations de niveaux dans les trois réservoirs E, C et M. Les variations des niveaux du réservoir M reflètent la variation du stock annuel et correspondent au remplissage et à la vidange du réservoir matriciel, qui assure notamment un faible soutien hydrique. Les variations des niveaux du réservoir C rendent bien compte eux du comportement transmissif correspondant à la cinétique rapide opérant au sein du système. Le modèle permet donc bien de reproduire le comportement multi-échelle de l'aquifère.

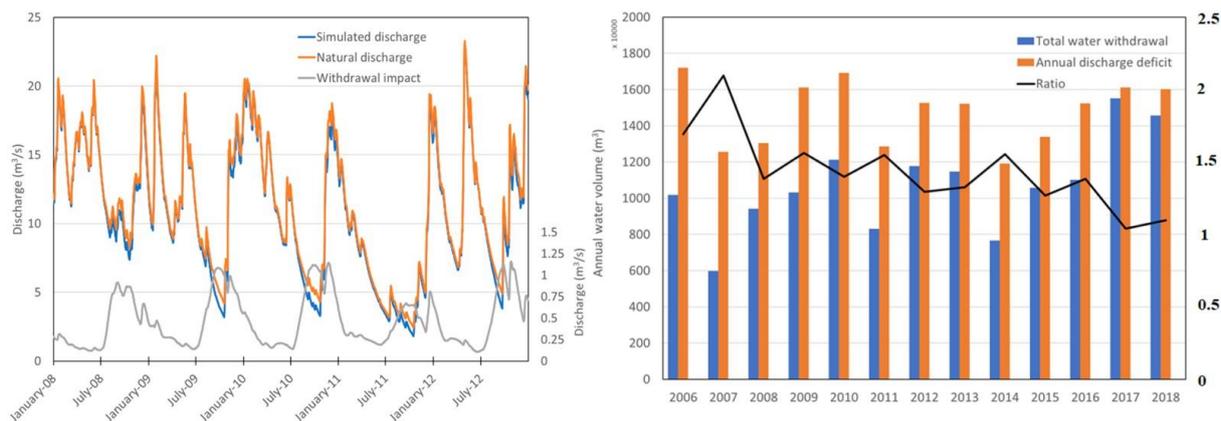


Figure 3. Localisation du système karstique de la Touvre et emplacement des stations

Une estimation quantitative de l'impact des différents prélèvements sur le débit à la station de Foulpougne est proposée. Cette estimation a été fournie en supprimant tous les prélèvements identifiés dans les quatre bassins versants et en réalisant une nouvelle simulation en utilisant le jeu de paramètres optimisés de la première partie de l'étude. L'impact des prélèvements sur le ruissellement simulé est directement lié à leur impact sur la hauteur du réservoir conceptuel. En période de hautes eaux, les prélèvements agricoles sont nuls et les prélèvements domestiques et industriels ont un impact négligeable. L'impact le plus important correspondant aux prélèvements agricoles est concentré en période d'étiage pour les réservoirs C et M. L'impact augmente rapidement dès que l'irrigation commence et l'impact dure plus longtemps dans le réservoir matrice.

Les déficits annuels en volume varient entre 1,2 et 1,8 Mm³. Nous avons observé que l'impact annuel des prélèvements sur le débit simulé est supérieur à celui des prélèvements totaux. Cette observation semble contre-intuitive à première vue. Cependant, elle est la conséquence directe de l'impact de la naturalisation sur le flux d'échange entre M et C. En effet, le flux d'échange est la clé de la capacité du système à maintenir un débit minimum à l'exutoire en période de faible débit. Un autre facteur en jeu est la non-linéarité du flux d'échange sur le système de la Touvre

Conclusion

L'alimentation en eau potable sur le bassin versant de la Touvre en Charente est essentielle pour la ville d'Angoulême. Le modèle conceptuel avec réservoirs non linéaires a permis de simuler le débit journalier en bon accord statistique avec le débit mesuré à la sortie du système. L'examen de la variation des niveaux d'eau des deux réservoirs C et M indique un comportement temporel multi-échelle cohérent avec les connaissances actuelles sur le comportement des systèmes karstiques. Le réservoir C correspond bien à la réponse rapide du karst par rapport à l'infiltration des deux sous-bassins versants Tardoire et Bandiat et permet de reproduire les crues du système.

Le réservoir M correspond à la dynamique de décrue plus lente du compartiment matriciel en accord avec les données piézométriques disponibles sur le bassin versant karstique. La méthodologie proposée de naturalisation du débit a permis de proposer une quantification des impacts des prélèvements (agricoles, industriels et domestiques). Ainsi, les déficits volumétriques annuels sont de l'ordre de 1,5 Mm³ et l'impact sur le débit d'étiage est statistiquement de l'ordre de 1 m³/s sur des débits d'étiage observés de l'ordre de 5 m³/s.

La prochaine étape consistera à fournir une quantification des pressions anthropiques couplées avec des projections de changement climatique sur la disponibilité en eau des systèmes karstiques.

Références

1. Labat, D.; Argouze, R.; Mazzilli, N.; Ollivier, C.; Sivelle, V. Impact of Withdrawals on Karst Watershed Water Supply. *Water* 2022, *14*, 1339. <https://doi.org/10.3390/w14091339>
2. Ladouche, B.; Marechal, J.-C.; Dorfliger, N. Semi-Distributed Lumped Model of a Karst System under Active Management. *J. Hydrol.* 2014, *509*, 215–230
3. Charlier, J.-B.; Ladouche, B.; Maréchal, J.-C. Identifying the Impact of Climate and Anthropogenic Pressures on Karst Aquifers Using Wavelet Analysis. *J. Hydrol.* 2015, *523*, 610–623.
4. Baudement, C.; Arfib, B.; Mazzilli, N.; Jouves, J.; Lamarque, T.; Guglielmi, Y. Groundwater Management of a Highly Dynamic Karst by Assessing Baseflow and Quickflow with a Rainfall-Discharge Model (Dardennes Springs, SE France). *Bull. Soc. Géol. Fr.* 2017, *188*, 40.
5. Sivelle, V.; Labat, D.; Mazzilli, N.; Massei, N.; Jourde, H. Dynamics of the Flow Exchanges between Matrix and Conduits in Karstified Watersheds at Multiple Temporal Scales. *Water* 2019, *11*, 569.
6. Poulain, A.; Watlet, A.; Kaufmann, O.; Van Camp, M.; Jourde, H.; Mazzilli, N.; Rochez, G.; Deleu, R.; Quinif, Y.; Hallet, V. Assessment of Groundwater Recharge Processes through Karst Vadose Zone by Cave Percolation Monitoring. *Hydrol. Process.* 2018, *32*, 2069–2083.
7. Bailly-Comte, V.; Martin, J.B.; Jourde, H.; Scream, E.J.; Pistre, S.; Langston, A. Water Exchange and Pressure Transfer between Conduits and Matrix and Their Influence on Hydrodynamics of Two Karst Aquifers with Sinking Streams. *J. Hydrol.* 2010, *12*, 55–66.
8. Bichot, F.; Thinon Larminach, M.; Touchard, F.; Bailly, D. Synthèse Hydrogéologique par Bassins Versants de la Région Poitou-Charentes—Relation Nappes-Rivières; BRGM Orléans: Orleans, France, 2005; 160p.
9. Bichot, F.; Karnay, G.; Lavie, J. Les Sources de La Touvre: Synthèse Des Connaissances; BRGM Orléans: Orleans, France, 2003; 54p.
10. Larocque, M.; Mangin, A.; Razack, M.; Banton, O. Contribution of Correlation and Spectral Analyses to the Regional Study of a Large Karst Aquifer (Charente, France). *J. Hydrol.* 1998, *205*, 217–231.
11. Le Moine, N.; Andréassian, V.; Mathevet, T. Confronting Surface- and Groundwater Balances on the La Rochefoucauld-Touvre Karstic System (Charente, France). *Water Resour. Res.* 2008, *44*.
12. Larocque, M.; Banton, O.; Ackerer, P.; Razack, M. Determining Karst Transmissivities with Inverse Modeling and an Equivalent Porous Media. *Groundwater* 1999, *37*, 897–903.
13. Larocque, M.; Banton, O.; Razack, M. Transient-State History Matching of a Karst Aquifer Ground Water Flow Model. *Groundwater* 2000, *38*, 939–946.
14. Jourde, H.; Lafare, A.; Mazzilli, N.; Belaud, G.; Neppel, L.; Dörfliger, N.; Cernesson, F. Flash Flood Mitigation as a Positive Consequence of Anthropogenic Forcing on the Groundwater Resource in a Karst Catchment. *Environ. Earth Sci.* 2014, *71*, 573–583.
15. Sivelle, V.; Jourde, H.; Bittner, D.; Mazzilli, N.; Tramblay, Y. Assessment of the Relative Impacts of Climate Changes and Anthropogenic Forcing on Spring Discharge of a Mediterranean Karst System. *J. Hydrol.* 2021, *598*, 126396.