

# Connaître et quantifier les échanges hydrauliques karst / rivière

## Recommandations méthodologiques

*Mots-clés : Échanges karst / rivière, écoulements souterrains, eaux de surface, eaux souterraines, karst, géologie, imagerie infrarouge thermique, hydrologie, hydrogéologie, géochimie, biologie, modélisation hydrogéologique, systémique, écologie souterraine.*

Type d'outil	Milieus étudiés	Disciplines mobilisées	Destinataires
- Méthodologie, retour d'expérience	- Cours d'eau karstique (interactions karst / rivière)	- Géologie, hydrogéologie, hydrologie, géochimie, écologie, modélisation	- Gestionnaires de milieux karstiques - Bureaux d'études

### OBJECTIFS

Caractériser les interactions nappe/rivières en milieu karstique, c'est-à-dire :

- Localiser les lieux d'échanges ;
- Identifier si les échanges se font du karst vers la rivière ou inversement ;
- Identifier l'origine et le cheminement des eaux ;
- Quantifier les volumes d'eau échangés entre différents compartiments de l'hydrosystème ;
- Déterminer les modalités d'échange : établir par exemple si les apports sont pérennes ou temporaires.

### L'ESSENTIEL

Ce support méthodologique propose une méthodologie d'étude des interactions karst/rivière. Son contenu permet de choisir les outils les plus adaptés pour mieux comprendre le fonctionnement hydrologique d'un karst en 4 grandes étapes (1. Identifier, 2. Caractériser, 3. Préciser, 4. Modéliser).

### CONTENU DE L'OUTIL

Ce support méthodologique contient une méthodologie organisée en plusieurs étapes. Le préalable est de rassembler les connaissances disponibles (ex : cartographie, mesures, modèles, etc.) qui permettent de décrire les grands traits du site d'étude, le niveau d'anthropisation ou encore les enjeux socio-économiques.

Le guide permet ensuite une priorisation du travail selon le niveau de connaissances, selon les disciplines et selon le choix des échelles spatiales et temporelles. L'état des lieux connaissances et une telle priorisation permettront de choisir la méthodologie de travail (enchaînement d'outils et de méthodes) la plus appropriée. Les outils appropriés peuvent être sélectionnés parmi un panel de 15 outils, répartis en 4 niveaux de diagnostic (Figure 1) :

- **Identifier : connaître le terrain d'étude et qualifier les échanges karst/rivière à échelle large ;**
- **Caractériser : quantifier les échanges karst/rivière et caractériser la fonctionnalité du réservoir karstique ;**
- **Préciser : Approfondir la connaissance du site et préciser les résultats du niveau précédent ;**
- **Modéliser : Synthétiser les informations et résultats obtenue dans les étapes précédentes et pour modéliser et simuler le fonctionnement de l'hydrosystème**

L'approche interdisciplinaire proposée dans ce guide permet une validation croisée des résultats. Les différents outils et étapes permettent d'apporter des réponses aux problématiques liées aux échanges karst/rivière.

Pour chaque outil, le guide propose les éléments nécessaires pour : 1) le comprendre et se l'approprier (questionnement initial, description des principes de fonctionnement, principales tâches à effectuer, exemple de résultats obtenus sur le site des gorges de la Cèze dans le Gard) des exemples de résultats ; 2) l'utiliser sur le terrain (matériel et ressources nécessaires, points forts et points faibles, valeurs guides et

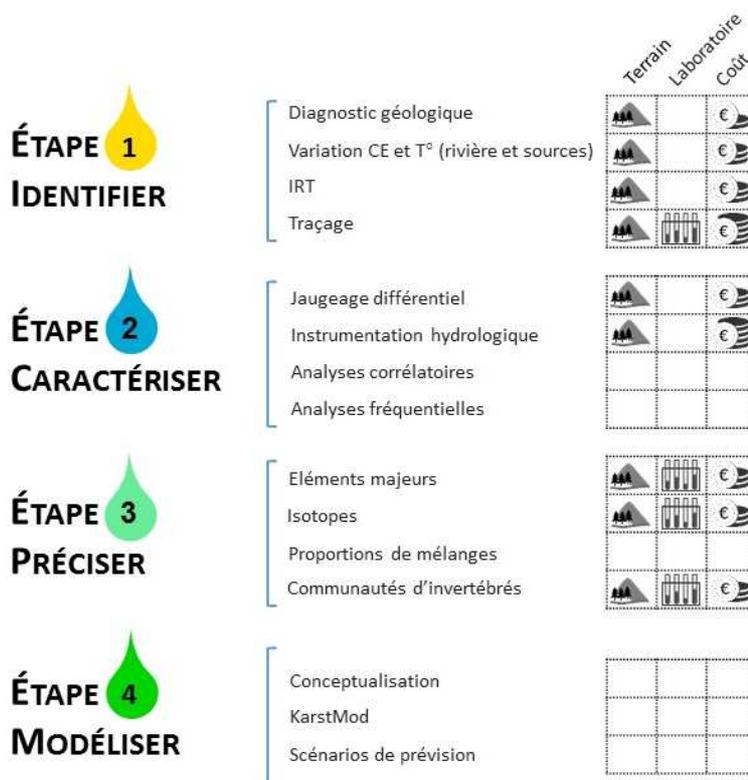
repères, coûts, protocole pour le mettre en œuvre concrètement). Un descriptif détaillé des avantages et inconvénients de chaque outil est présenté dans le tableau 8 du support méthodologique.

POINTS FORTS DU GUIDE	POINTS FAIBLES DU GUIDE
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Description détaillée des outils facilitant leur mise en œuvre</li> <li>+ Robustesse, complémentarité et précision des données</li> <li>+ Retours d’expérience précis fondés sur les travaux effectués sur le cas de la Cèze Caractérisation des échanges karst/rivière à différentes échelles spatiales et temporelles</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interdépendance de certains outils</li> <li>- Utilisation des outils et méthodes dépendante des moyens matériels, humains et financiers disponibles</li> </ul>

### MISE EN ŒUVRE

#### Temps / Moyens humains / Compétences / Matériel / Coûts

Le temps de travail, les moyens humains, les compétences, le matériel et le coût dépendent des outils sélectionnés. Leur enchaînement (méthodologie globale) dépend de l’objectif visé. Pour un outil donné le temps de travail nécessaire peut varier entre quelques heures et plusieurs mois, nécessiter 1 à 4 personnes (voire plus) et un niveau variable (novice à expert). Le matériel nécessaire est décrit pour chaque outil dans les pages paires du support méthodologique de la page 75 à la page 115. Les coûts ainsi que les lieux d’application (labo ou terrain) des outils sont estimés et représentés de manière symbolique dans la Figure 1 :



Ordres de grandeurs pour les coûts d’investissement :

De 10 à 5 000 €    
 De 5 001 à 15 000 €    
 Supérieur à 15 000 €

Figure 1 - Synthèse des coûts et lieux d’application des outils (cf. figure 83 du guide)

## CONTEXTE

Les formations calcaires favorables à la karstification occupent environ 35 % de la surface du territoire national. Or, les aquifères karstiques ont des potentialités importantes en termes de ressources en eau, et contribuent à la bonne qualité des cours d'eau associés grâce à leur eau à température peu variable dans le temps. De plus, les karsts sont des contributeurs potentiellement importants au débit des cours d'eau et peuvent être considérés selon le cas comme une ressource en eau principale complémentaire ou alternative. Cependant, cette ressource est souvent sous-exploitée par manque de connaissances sur les interactions karst/rivière.

C'est pourquoi les chercheurs de la ZABR, en collaboration avec l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, ont développé un support méthodologique mettant à disposition des acteurs de l'eau des outils pour étudier ces échanges nappes/rivières en milieu karstique et ainsi améliorer la gestion de la ressource en eau. Un précédent guide, paru en 2015, présentait quant à lui les outils pour travailler sur les interactions nappes/rivières en milieux alluvionnaires.

## PRINCIPES

La caractérisation des échanges entre un karst et une rivière doit prendre en compte au préalable le niveau de connaissance dont on dispose sur le site étudié. Le guide propose des recommandations méthodologiques, soit pour acquérir un niveau de connaissance initial sur les interactions karst/rivière, soit pour améliorer et compléter ces connaissances. Elles sont fondées sur 4 étapes. Chacune de ces étapes permet de répondre à un objectif précis en mobilisant 3 ou 4 outils (voir tableau ci-après).

Globalement, on peut distinguer 3 grands types d'outils : 1) les outils scientifiques (en phase d'étude, le test de leur robustesse est en cours) ; 2) les outils en développement (outils validés dont le transfert auprès des structures concernées reste à faire) ; 3) les outils opérationnels (couramment utilisés, leur fiabilité et leur pertinence est avérée ; ils sont attractifs et leur utilisation a été optimisée).

Etape	Objectif	Principe	Maturité de l'outil
<b>Etape 1</b> <b>Identifier</b> Géologie et hydrogéologie 4 outils	Déterminer les grandes directions d'écoulements souterrains	<b>Diagnostic géologique</b> : étude de la structure du karst fondée sur un travail bibliographie (synthèse) et des activités de terrain (ex : mesures, échantillonnages...).	Outil en développement
	Détecter/localiser des sources karstiques sur la rivière	Traçage des <b>profils</b> altimétriques (GPS), de température et de conductivité électrique de l'eau en descendant la rivière karstique	Outil opérationnel
		<b>Imagerie Infrarouge Thermique</b> effectuée le long du cours d'eau avec une caméra thermique ( <a href="https://www.zabr.assograie.org/wp-content/uploads/2021/02/fiche-thermie.pdf">https://www.zabr.assograie.org/wp-content/uploads/2021/02/fiche-thermie.pdf</a> )	Outil en développement
	Préciser la circulation de l'eau souterraine, entre bassins d'alimentation et sources	Analyse du spectre de fluorescence de <b>traceurs artificiels</b> fluorescents (ex : éosine, fluorescéine...) injectés	Outil opérationnel
<b>Etape 2</b> <b>Caractériser</b> Hydrologie 4 outils	Quantifier les échanges karst/rivière	<b>Jaugeages différentiels</b> pour réaliser des quantifications ponctuelles	Outil opérationnel
		<b>Sondes CTD</b> (conductivité-température-hauteur d'eau) disposées au niveau de sources et de la rivière pour quantifier les échanges sur un ou plusieurs cycles hydrologiques (jaugeages, courbes de tarages)	Outil opérationnel
	Caractériser l'hydrodynamisme du cours d'eau	<b>Corrélogrammes</b> réalisés avec RStudio à partir de données de pluies et de débits (corrélations pluies/débits) pour déterminer l'effet mémoire de l'aquifère et le temps de réponse à une pluie	Outil en développement

		<b>Analyses fréquentielles</b> conçues à partir de valeurs de débits et de valeurs de conductivités électriques pour mieux comprendre le fonctionnement l’aquifère, l’organisation et la distribution des écoulements	Outil en développement
<b>Etape 3</b> <b>Préciser</b> Géochimie et biologie 4 outils	Identifier le type d’eaux	Analyse des concentrations en <b>éléments majeurs</b> d’échantillons d’eau souterraines et superficielles pour faire la distinction entre eaux de source karstiques et eaux de rivière selon leur faciès chimique (détermination de pôles géochimiques)	Outil en développement
	Identifier l’origine des eaux	Interprétation des analyses des <b>isotopes</b> stables de l’eau pour mieux connaître la localisation du bassin d’alimentation des sources (origine des eaux), le temps de séjour des eaux de pluie dans le karst voire leur cheminement	Outil en développement
	Identifier les parts des eaux	<b>Équations de mélanges</b> déterminées à partir des analyses d’eau (isotopes stables de l’eau et éléments majeurs) d’Analyse en Composantes Principales (ACP) pour calculer les proportions de mélanges (entre karst et rivière)	Outil en développement
	Apporter des informations qualitatives sur les échanges	Étude de prélèvements d’ <b>invertébrés</b> (benthiques, <b>interstitiels</b> et karstiques) permettant d’apprécier la biodiversité de la rivière	Outil en développement
<b>Etape 4</b> <b>Modéliser</b> Synthèse des connaissances 3 outils	Regrouper les données acquises et vérifier leur cohérence, proposer des modélisations prédictives	<b>Schéma conceptuel</b> réalisé en sélectionnant les informations pertinentes pour avoir une vue d’ensemble du fonctionnement du système karstique et cerner ses limites	Outil en développement
		Logiciel <b>KarstMod</b> : simulation de la relation pluie-débit pour un hydrosystème karstique ou analyse de l’hydrodynamisme d’un karst	Outil opérationnel
		Injection de données de simulations (ex : données météorologiques issues de scénarios climatiques, données de consommations et de besoins en eau pour le futur...) dans les modèles pour aboutir à des <b>scénarios de prévision</b>	Outil scientifique

La Figure 2 ci-dessous synthétise l’intérêt, le fonctionnement de chaque outil et présente les liens possibles entre les outils. Autrement dit, à quelle(s) question(s) un outil ou plusieurs outils peuvent répondre pour mieux comprendre et connaître les interactions karst/rievère.

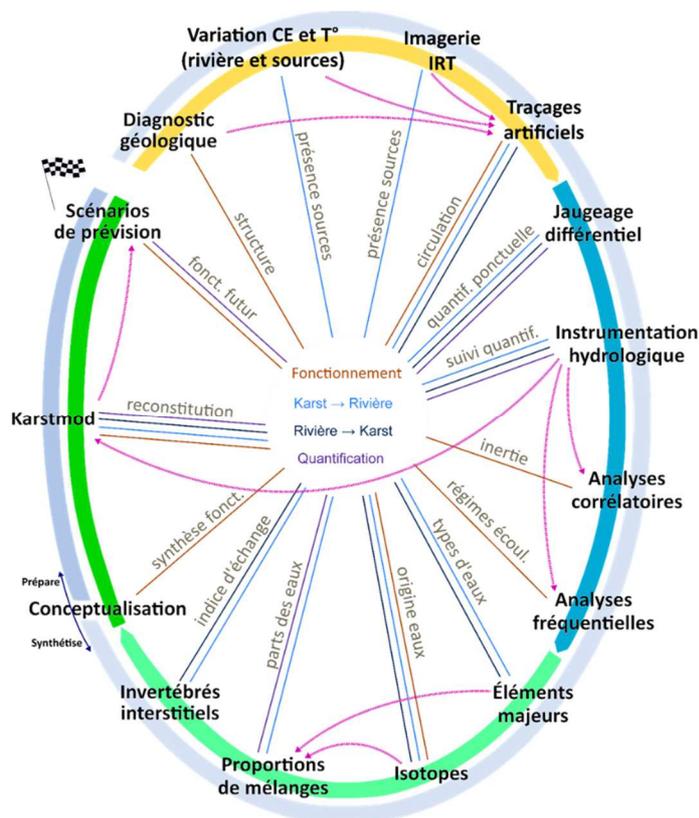


Figure 2 – Intérêt et articulation des outils (cf. figure 65 du guide)

## PERSPECTIVES ET PRECONISATIONS

La méthodologie présentée dans ce guide étant perfectible, il est demandé aux utilisateurs de communiquer leurs retours d'expérience afin de la compléter et de l'améliorer.

## PERSONNES RESSOURCES

### Frédéric PARAN et Didier GRAILLOT

Identification, caractérisation et modélisation des échanges karst/rivière

Labo/structure : EVS-Mines Saint-Etienne  
frederic.paran@mines-stetienne.fr  
didier.graillet@mines-stetienne.fr

### Steve PEUBLE

Géologie

Labo/structure : EVS-Mines Saint-Etienne  
steve.peuble@mines-stetienne.fr

### Véronique LAVASTRE

Géochimie des eaux

Labo/structure : LGL, Université Jean Monnet de Saint-Etienne  
veronique.lavastre@univ-st-etienne.fr

### Anne JOHANNET

Hydrodynamisme (Analyses)

Labo/structure : LGEI, IMT Mines d'Alès  
anne.johannet@mines-ales.fr

### Pierre MARMONIER

Invertébrés interstitiels (biologie)

Labo/structure : LEHNA, Université Claude Bernard Lyon 1  
pierre.marmonier@univ-lyon1.fr

### Hervé JOURDE et Naomi MAZZILLI

KarstMod (modélisation)

Labo/structure :  
HSM, Université de Montpellier  
EMMAH, Université d'Avignon  
herve.jourde@univ-montp2.fr  
naomi.mazzilli@univ-avignon.fr

## DOCUMENT(S) SOURCE

- Pascoletti, Y., Chapuis, H., Paran, F., Graillot, D., Cadilhac, L. (2022). *Interactions karst/rivière – Approches développées sur les gorges de la Cèze (30) – Support méthodologique*. Agence de l’eau Rhône Méditerranée et Corse – Eau et connaissance, 132p.

[https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2022-05/support\\_methodo\\_karst\\_riviere\\_vf.pdf](https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2022-05/support_methodo_karst_riviere_vf.pdf)

## AUTEUR(S)

Yvan PASCOLETTI, Hervé CHAPUIS, Frédéric PARAN, Didier GRAILLOT, Jordan RE BAHUAUD, Anne JOHANNET, Bernard GUY, Steve PEUBLE, Pierre MARMONIER, Hervé PIEGAY, Véronique LAVASTRE, Joël JOLIVET

## STRUCTURE(S) PORTEUSE(S) DU PROJET

EVS-Mines Saint-Etienne, UMR 5600

LGEI : Laboratoire de Génie de l’Environnement Industriel, IMT Mines d’Alès

LEHNA : Laboratoire d’Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés, Université de Lyon, UMR 5023

EVS-BioGéophile, ENS de Lyon, UMR 5600

LGL : Laboratoire de Géologie de Lyon, CNRS, UMR 5276, Université Jean Monnet

ESPACE : Étude des Structures et des Processus d’Adaptation et des Changements de l’Espace, UMR 7300, Université Sophia Antipolis

## SITES ATELIERS ET OBSERVATOIRES DE LA ZABR MOBILISES

Site « Rivières Cévenoles » (OZCAR) - Hydrologies extrêmes

## THEMATIQUES ZABR ABORDEES

Changements Climatiques et Ressources (CCR)

Flux, Formes, Habitats, Biocénoses (FFHB)

## PROJET

L’élaboration de cet outil s’inscrit dans le programme de recherche « Caractérisation des échanges entre karst et rivière - Cas d’un affluent du Rhône, la Cèze au niveau du plateau karstique de Méjannes-le-Clap », mené entre 2013 et 2019 par l’Agence de l’Eau Rhône-Méditerranée-Corse et la ZABR.

## BIBLIOGRAPHIE

Les ressources bibliographiques sont disponibles des pages 123 au 129 du guide.

