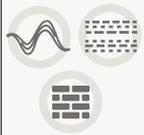


Invertébrés souterrains

Contexte hydrogéologique	Echelle d'espace			Échelle de temps		Niveau informations nécessaires	Coûts (€)		Coûts (temps)	
	Description des données	Seuil d'interprétation	Aire d'interprétation	Pas de temps Résultats	Pas de temps Données		Terrain	Bureau Labo	Terrain	Bureau Labo
 <p>Nappes libres Zone hyporhéique Milieux carbonatés</p>				 <p>Instantané (t) Saisonnier (Δt)</p>						
	Ponctuelle	<100m	Tronçons de cours d'eau	Instantané (t) Saisonnier (Δt)	Instantané	Moyen	Moyen	Moyen	Moyen	Important

Description rapide

Cette méthode est fondée sur le lien entre les échanges hydrologiques rivière/nappe et la composition de la communauté d'invertébrés vivant dans les interstices des sédiments du cours d'eau (ou zone hyporhéique). Une partie de ces invertébrés interstitiels préfèrent vivre dans des habitats riches en oxygène et matière organique et seront donc plus abondants dans les zones d'infiltration d'eau de surface vers la nappe. D'autres préfèrent les habitats très stables et alimentés en eau souterraine, ils seront plus abondants dans des zones d'exfiltration d'eau interstitielle vers la surface. L'échantillonnage de cette faune par pompage permet un diagnostic des échanges nappe/rivière en secteur de nappe libre et de milieux carbonatés (dont karst) à l'échelle de quelques dizaines de mètres autour du point d'échantillonnage.

Principe de caractérisation des échanges

Les échanges nappes alluviale/rivière entre un milieu poreux (alluvions dans lesquels s'écoulent les eaux souterraines) et les cours d'eau se font à travers les interstices des sédiments du fond en aval des ruptures de pente, comme des seuils ou des bancs de sable ou de galets (figure 30 page suivante). Les apports d'eau de nappe induisent une augmentation de l'abondance des invertébrés adaptés à la vie souterraine (aveugles, dépigmentés, appelés stygobies - photo 10 et photo 11) qui peuvent alors être échantillonnés à 50 cm de profondeur à l'intérieur des sédiments.

Inversement les échanges de la rivière vers la nappe ont généralement lieu en amont des ruptures de pente (amont de seuil ou de banc) et induisent une diminution du nombre de stygobies au profit des organismes de surface qui accompagnent l'eau superficielle s'infiltrant dans les sédiments. Enfin, l'absence d'échange sera plutôt caractérisée par une forte diminution des deux types d'invertébrés (stygobies et de surface) particulièrement dans le cas d'un colmatage des interstices par des éléments minéraux ou organiques.

© Université Lyon 1, ESS

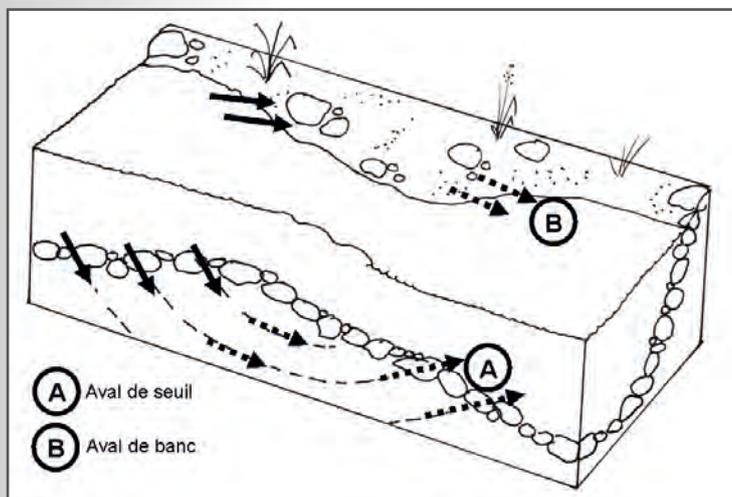


Photo 10. Exemple d'invertébré souterrain : *Niphargus rhenorhodanensis*.

© Université Lyon 1, ESS



Photo 11. Exemple d'invertébré souterrain : *Proasellus cavaticus*.



© P. Marmonier

Figure 30. Localisation des zones de remontée potentielle d'eau souterraine vers la surface en aval de seuil et en aval de banc.

En complément, l'identification à l'espèce des invertébrés stygobies peut potentiellement renseigner sur l'origine de ces eaux remontant dans les sédiments. En effet, certaines espèces sont caractéristiques d'habitats particuliers : milieu hyporhéique de faible profondeur (sous-écoulement de la rivière) ou au contraire d'eau profonde (réseaux karstiques ou nappes phréatiques). Toutefois, toutes les régions françaises ne possèdent pas le même pool d'espèces stygobies : la faune souterraine est plus pauvre en altitude qu'en plaine, plus riche dans le sud-ouest et tout l'est de la France, plus pauvre à l'ouest et au nord du pays. La capacité de discrimination de la communauté hyporhéique doit être replacée dans ce contexte biogéographique.

■ Protocole de mesure des échanges

- ▶ Sélection des sites d'échantillonnage des invertébrés hyporhéiques sur cartes ou photographies aériennes, en localisant et numérotant les bancs de galets ou les seuils. Repérer les sources latérales
- ▶ Échantillonnage à réaliser après une période d'étiage de deux à trois semaines
- ▶ Protocole d'échantillonnage : pomper un volume de 10 L d'eau interstitielle à 50 cm sous la surface des sédiments à l'aide d'un piézomètre mobile et d'une pompe manuelle de manière à capturer les organismes hyporhéiques et mesurer quelques caractéristiques physico-chimiques des eaux interstitielles (encart : L'essentiel du protocole). Cet échantillonnage se fait avec du matériel adapté (encart : Dispositifs/matériel, Bou et Rouch, 1967)
- ▶ Réaliser des échantillons dans des zones de remontée potentielle d'eau souterraine (aval de rupture de pente, seuil ou banc de galets), de manière extensive d'amont en aval du secteur à étudier (classiquement de un à trois points par km)
- ▶ Réaliser trois réplicats espacés de un à trois mètres par point échantillonné
- ▶ Échantillonnage pouvant être complété par l'étude de la faune de sources (échantillonnée au filet Surber) et de puits (échantillonnée par pompage ou au filet Cvetkov, photos 12 et 13). Ces sources et puits doivent être localisés en bordure de la vallée alluviale ou dans les systèmes karstiques proches, de manière à estimer le pool local d'espèces stygobies présent dans le secteur biogéographique étudié

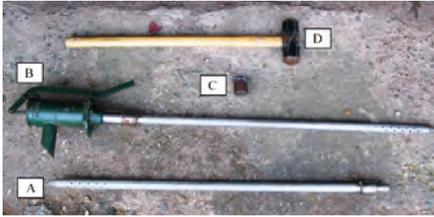
L'essentiel du protocole

1. Choisir le point d'échantillonnage en bordure du cours d'eau
2. Planter le piézomètre mobile à l'aide de la tête de frappe et de la masse jusqu'à 50 cm de profondeur sous la surface des sédiments
3. Pomper 10 L d'eau interstitielle dans un seau et le filtrer sur un tamis de 100 µm, fixer à l'alcool 96°, ajouter une étiquette
4. Aspirer 100 mL d'eau en faisant attention à éviter les bulles d'air pour les mesures de la conductivité, de température et de la teneur en oxygène dissous de l'eau interstitielle *in situ*
5. Prélèvement d'eau interstitielle et analyse d'éléments dissous en laboratoire



© C. Piscart

Photo 12. Filets de type Cvetkov nécessaires pour un échantillonnage complémentaire de faune dans des puits dont la profondeur totale (>17m) ou le niveau piézométrique (>8m) ne permettent pas l'utilisation d'une pompe manuelle.



© P. Marmonier & C. Piscart.

Photo 13. Équipement nécessaire pour un pompage à l'aide de la méthode Bou-Rouch ; a : sonde en acier avec crépine ; b : pompe à piston placée sur la sonde ; c : tête de frapper ; d : masse.

Dispositifs / matériel

Matériel de prélèvement complémentaire en puits ou piézomètres

Pompe manuelle à clapet
Tuyau d'arrosage renforcé (15 m)
Filet phréatobie Cvetkov à maille 100 μ m (Photo 12)
Seaux (10L de 1 à 5)
Flacons (boîtes) pour échantillons
Étiquettes + marqueur
Alcool à 96°
Eau de rinçage et d'amorçage de la pompe manuelle
Pissettes

Masse et tête de frappe
Clef à chaîne
Pompe péristaltique ou grosse seringue
Filet à maille 100 μ m
Seaux (10l de 1 à 5)
Flacons (boîtes) pour échantillons
Étiquettes + marqueur
Alcool à 96°
Eau de rinçage
Pissettes

Prise de notes

Carnet de terrain / Fiche de terrain
Crayon papier

Matériel de prélèvement dans la zone hyporhéique

Piézomètre métallique
Pompe manuelle à clapet de type Bou-Rouch (Photo 13)

- ▶ Réaliser deux échantillons d'eau (surface et interstitielle) prélevés à l'aide d'une pompe péristaltique ou d'une grosse seringue pour la mesure de la température (°C), la conductivité électrique (μ S/cm), la teneur en oxygène dissous (mg/l) et de certains ions pouvant indiquer l'origine de l'eau hyporhéique (classiquement calcium, nitrates, sulfates et chlorures)
- ▶ Réaliser trois réplicats de ces mesures
- ▶ De même que pour la faune stygobie, il est indispensable de connaître les caractéristiques physico-chimiques des eaux des aquifères latéraux en analysant l'eau de sources ou de puits situés sur ces aquifères

■ Interprétation des données et des résultats

Après le tri des organismes au laboratoire et l'identification des grands groupes, une identification plus fine permettra de séparer les organismes de surface des stygobies, particulièrement chez les Mollusques et les Crustacés. Une identification à l'espèce de certains Ordres peut être confiée à des spécialistes et permettra une interprétation plus fine, incluant par exemple l'origine de l'eau.

Le calcul de l'indice d'échange rivière/nappe (encart : Formule de calcul page suivante) est basé sur l'abondance (N) des organismes stygobies classés selon les quatre groupes écologiques auxquels appartiennent les espèces (Marmonier *et al.* 1993, Dole-Olivier *et al.* 1993) :

- ✓ **N1**, abondance d'organismes ubiquistes vivant à faible profondeur dans les sédiments dans une grande diversité d'habitats souterrains ;
- ✓ **N2**, abondance d'organismes présents uniquement dans le milieu hyporhéiques du fleuve à faible profondeur ;
- ✓ **N3**, abondance d'organismes stygobies ubiquistes présents à toutes les profondeurs dans le fleuve, la nappe et les karsts ;
- ✓ **N4**, abondance d'organismes phréatobies présents uniquement à forte profondeur dans la nappe alluviale ou espèces strictement karstiques.

■ Valeurs guides et repères

- ▶ Principaux groupes stygobies : Mollusques, Crustacés Amphipodes, Ostracodes, Isopodes, Syncarides et Copépodes
- ▶ Taille des invertébrés souterrains : de moins d'un mm (par ex. *Microcharon*) à plus d'1 cm (par ex. *Niphargus* - Photo 10)
- ▶ Durée de vie moyenne des invertébrés souterrains : plusieurs mois à plusieurs années (rythme physiologique ralenti)
- ▶ Caractéristiques des stygobies : diminution ou disparition des yeux (anophtalmie), perte des pigments (dépigmentation) donnant un aspect blanchâtre aux organismes (Photo 10)
- ▶ Nombre d'espèces stygobies en France : plus de 400 espèces dont près de 60 % de Crustacés
- ▶ Abondance des stygobies et valeurs de l'indice *IE* : il varie avec la région biogéographique considérée (zone karstique ou non, zone sous influence des dernières glaciations ou non...). En zone riche en stygobies : *IE* fort au-delà de 100, *IE* intermédiaire de 20 à 100 et *IE* faible inférieur à 20
- ▶ Conductivité des eaux souterraines : elle varie avec la nature géologique du substratum et les classes de conductivité doivent être contextualisées : 1) conductivité des eaux interstitielles similaire à la valeur mesurée dans les eaux de surface, 2) intermédiaire entre eau de surface et nappe environnante, 3) proche de la valeur mesurée dans les sources ou les puits de la plaine alluviale ou des systèmes karstiques proches
- ▶ Oxygénation des eaux souterraines : trois classes peuvent être considérées : 1) moins de 2 mg/L valeur faible, 2) de 2 à 3 mg/L valeur moyenne, 3) plus de 3 mg/L valeur forte
- ▶ Température des eaux souterraines : comme pour la conductivité, les classes de température doivent être contextualisées : 1) température des eaux interstitielles similaire à la valeur mesurée dans les eaux de surface, 2) intermédiaire entre eau de surface et nappe environnante, 3) proche de la valeur mesurée dans les sources ou les puits de la plaine alluviale ou des systèmes karstiques proches

■ Résultats : exemple de la plaine du Rhin

La richesse de la faune stygobie dans la zone étudiée est probablement liée à une intense recolonisation de la plaine alluviale du Rhin à partir des refuges périglaciaires. Cette faune est écologiquement très diversifiée, allant d'espèces vivant à faible profondeur dans le chenal à des espèces phréatobies caractéristiques des eaux de nappe. Le bilan partiel en termes d'échanges hydrologiques de juillet 2012 est présenté sur la figure 31 page suivante :

- ✓ les sources situées au nord de la zone d'étude sont alimentées par la nappe (flèches vertes). Une grande diversité d'espèces stygobies a été mise en évidence (espèces ubiquistes et caractéristiques d'eau profonde). Les valeurs élevées en chlorures, nitrates et en conductivité par rapport aux autres types de milieux confirment ces arrivées d'eau en provenance de l'aquifère. La rivière NE ne présente que peu ou pas d'échange avec la nappe (croix bleue), son sédiment étant colmaté par des particules fines. Bien qu'une espèce d'eau profonde soit présente dans la source BW, la faible conductivité mesurée semble indiquer plutôt un mélange avec l'eau du Rhin ou du canal de drainage (double flèche verte et orange) ;

Formules de calcul

Trophie

Le calcul de l'indice d'échange (*IE*) intègre une pondération des abondances des stygobies par rapport à leurs classes écologiques :

$$IE = N1 + 2.N2 + 5.N3 + 10.N4$$

L'interprétation de l'indice doit être faite en tenant compte (1) de la région biogéographique qui héberge plus ou moins de stygobies, (2) de l'écologie des espèces présentes et (3) de sa cohérence avec les caractéristiques physico-chimiques de l'eau interstitielle au point de prélèvement :

- *IE* fort et eaux interstitielles chargées en éléments minéraux, traduisant un contact long avec le substratum : apports importants d'eau profonde de la nappe ou des karsts latéraux ;
- *IE* intermédiaire : (1) stygobies de classe 3 et eau chargée en ions dissous correspondent à des apports faibles d'eau souterraine profonde ; (2) stygobies de classe 2 et eau peu chargée correspondent à du recyclage de l'eau de surface sur de faibles distances ;
- *IE* faible ou égal à 0 : (1) zone où l'abondance totale de la communauté est forte (nombreux individus vivant en surface) et eau peu chargée et bien oxygénée correspond à de fortes infiltrations d'eau de surface vers les sédiments ; (2) zone où l'abondance totale est faible ou nulle et où l'eau est chargée en ions dissous et hypoxique correspond à un secteur aux sédiments colmatés.

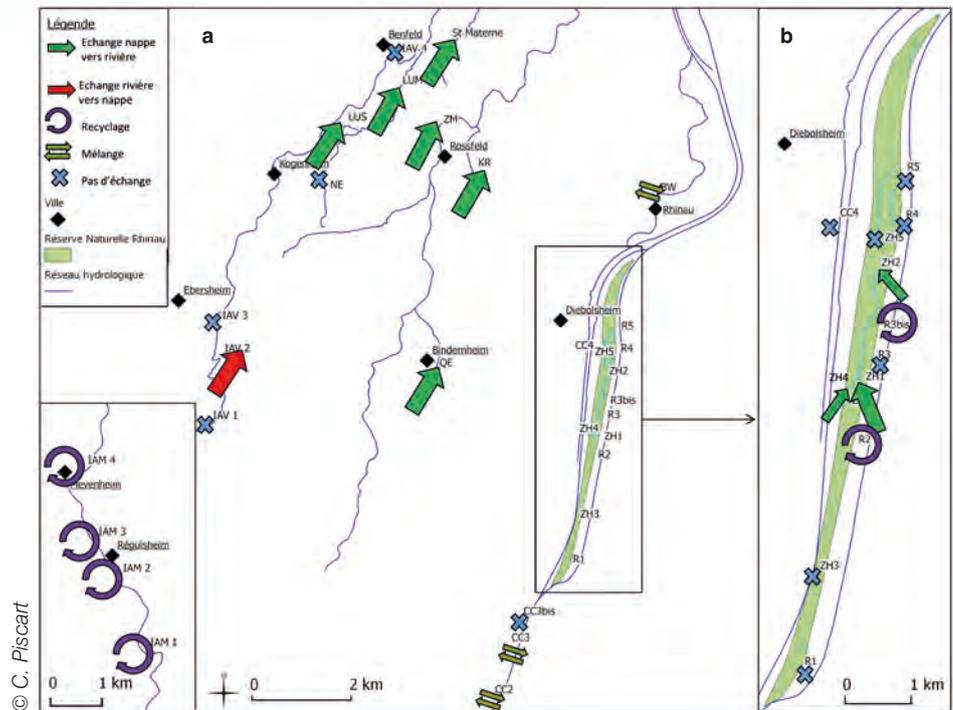


Figure 31. Bilan des échanges nappe/rivières sur la plaine alluviale du Rhin pour la métrique invertébrés ; **a** : secteur amont de l'Ill et **b** : secteur du Rhin court-circuité.

- ✓ du point de vue des deux principaux cours d'eau (Ill et Rhin), les échanges y sont très hétérogènes. Les fortes abondances d'organismes récoltés dans une station de l'Ill en aval (en IAV2), pourraient indiquer des exports d'eau de surface vers la nappe (flèche rouge). Sur l'Ill en amont et dans deux stations du Rhin, les fortes densités d'espèces stygobies ubiquistes et de classe 2 traduisant des échanges cycliques sur de courtes distances (flèches arquées violettes).

■ Points forts

- ▶ Offre une source d'information indirecte de l'origine de l'eau (discrimination de différents aquifères) et de sa dynamique (les stygobies intègrent une grande diversité de caractéristiques environnementales)
- ▶ Intègre les échanges nappe/rivière sur des durées de l'ordre de plusieurs semaines. En dehors des périodes de crue, les stygobies étant peu mobiles, ils rendent bien compte des échanges moyens au niveau d'une station de prélèvement
- ▶ Traduit les effets des changements saisonniers des niveaux relatifs des nappes et du cours d'eau
- ▶ Échantillonnage rapide (tableau 18 page suivante) et peu coûteux

■ Informations et données nécessaires

- ▶ Exigences écologiques des invertébrés souterrains
- ▶ Inventaire des invertébrés souterrains
- ▶ Physico-chimie des eaux souterraines : O₂ dissous, température, pH, conductivité, éléments dissous (par ex. nitrates, chlorures, sulfates, calcium ou magnésium pour les zones karstiques)

■ Points faibles, conditions d'utilisation, prérequis

- ▶ Lourdeur du tri au laboratoire (tableau 18) qui conduit à des diagnostics ponctuels à l'échelle de la station, donc discontinus sur la longueur des chenaux
- ▶ Difficulté d'identification des organismes (réalisée par des spécialistes)
- ▶ Connaissance parfois limitée de leur écologie qui ne permet pas toujours de préciser l'origine des eaux souterraines
- ▶ Pas de quantification des échanges, échelle locale
- ▶ Variabilité biogéographique (présence de systèmes karstiques, altitude, influence des dernières glaciations)

■ Méthodes complémentaires

- ▶ Analyse géomatique des niveaux d'eau (fiche outils n°1)
- ▶ Végétation aquatique (fiche outils n° 6)
- ▶ Géochimie, notamment isotopes (fiche outils n°5)

Tableau 18. Mise en œuvre : coûts hommes/jours pour la méthode fondée sur les invertébrés souterrains.

Tâches	Temps	Coût (nb de personnes par jour)
Échantillonnage des invertébrés souterrains	10 échant. / jour	2
Tri	1 échant. / jour	1
Identification (une affaire de spécialistes de groupes taxonomiques)	1 échant. / 2 jours	1 par groupe
Analyse de données	10	1

Références et liens pour en savoir plus

Bou C., Rouch R. (1967) *Un nouveau champ de recherches sur la faune aquatique souterraine*. C R Acad Sci 265, p. 369-370.

Dole-Olivier M.J., Creuzé des Châtelliers M., Marmonier P. (1993) *Repeated gradients in subterranean landscape - Example of the stygofauna in the alluvial floodplain of the Rhône river (France)*. Arch. Hydrobiol., 127, 4, p. 451-471.

Graillet D., Paran F., Bornette G., Marmonier P., Piscart C., Cadilhac L. (2014) *Coupling groundwater modeling and biological indicators for identifying river/aquifer exchanges*. SpringerPlus.2014, 3:68. DOI: 10.1186/10.1186/2193-1801-3-68.

Marmonier P. Vervier P., Gibert J., Dole-Olivier M.J. (1993) *Biodiversity in ground waters*. Trends in ecology and evolution 8, p. 392-395.

Personnes ressources

Pierre Marmonier (Écologie souterraine) : UMR CNRS 5203 Lehma, Université Claude Bernard Lyon 1, pierre.marmonier@univ-lyon1.fr

Christophe Piscart (Écologie souterraine) : UMR CNRS 6553 Ecobio, Université de Rennes 1, christophe.piscart@univ-rennes1.fr