

---



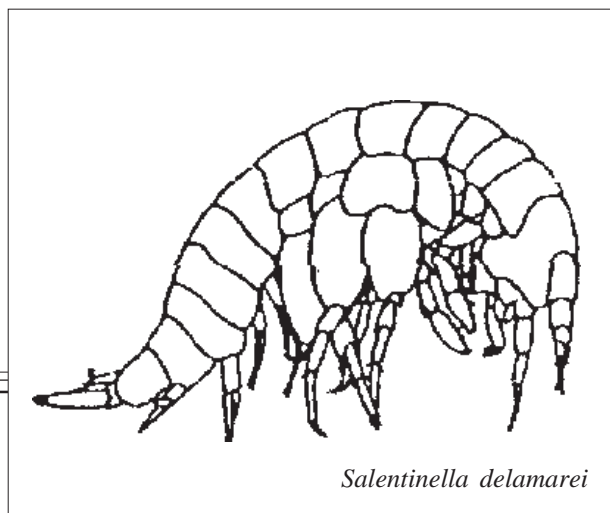
---

## ECOLOGIA

---



---



*Salentinella delamarei*

# APPUNTI SULLE COMUNITÀ BIOLOGICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Mirvana Feletti<sup>1</sup>, Silvio Gaiter<sup>2</sup>

## INTRODUZIONE

La velocità di rinnovamento delle acque sotterranee è estremamente bassa (GIBERT, 1989): secondo L'VOVICH (P.I.R.EN., 1990) mentre il rinnovamento medio di laghi e fiumi risulta rispettivamente di circa 17 anni e di alcuni giorni, quello delle falde acquifere è compreso tra 4.000 e 5.000 anni.

L'estrema lentezza di recupero dall'inquinamento delle risorse idriche sotterranee e il conseguente danno economico hanno indotto negli ultimi anni una accresciuta sensibilità nei confronti della loro protezione.

In Francia, già a partire dagli anni '70, il CNRS promuove programmi interdisciplinari di ricerca sulle acque sotterranee e nel 1990 ha istituito uno specifico comitato –denominato P.I.R.EN.-acque sotterranee– (Programme Interdisciplinaire de Recherche “Environnement”) che raccoglie diverse professionalità scientifiche (biologi, idrogeologi, petrografi, igienisti, natu-

ralisti, ingegneri impiantisti ed idraulici, chimici, ecc.) ed opera sulla base di piani di indagine interdisciplinari. In questi ultimi anni nel campo delle acque sotterranee sono stati raggiunti livelli conoscitivi di grande significato, tali da poter essere definiti all'avanguardia a livello mondiale.

In questa rassegna vengono riportate le principali acquisizioni di questi anni sulla biologia delle acque sotterranee, con particolare riguardo agli approfondimenti sui popolamenti faunistici, sui meccanismi che regolano l'ambiente sotterraneo e sulla possibile applicazione delle conoscenze acquisite nella prevenzione ambientale ed igienica.

Dalla scuola francese emerge una concezione innovativa dell'*ambiente sotterraneo*, visto non solo come mondo minerale, ma anche come mondo vivente; le riserve d'acqua sotterranee ospitano numerosi animali acquatici che –contrariamente a quanto avviene negli ecosistemi di superficie– vivono e si riproducono in un ambiente povero di risorse energetiche elementari e caratterizzato da assenza di luce e scarsi-

<sup>1</sup> ALIPPA (Associazione Ligure di Idrobiologia e per la Protezione della Pesca e delle Acque), Genova

<sup>2</sup> Presidio Multizonale di Prevenzione di Genova; ALIPPA.

tà di cibo (ROUCH e DANIELOPOL, 1987; CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991). Nonostante le condizioni particolari o estreme, tuttavia, le forme animali sotterranee sono diversificate quasi quanto le specie presenti nell'ambiente superficiale (CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991); i popolamenti sotterranei, quindi, possono essere considerati dei veri e propri sistemi biologici.

Le falde acquifere, ospitando popolazioni ben strutturate e regolate da specifici fattori ecologici, possono perciò essere considerate dei veri e propri sistemi biologici nei quali ogni singolo ambiente può costituire una unità biologica originale ben distinta dalle altre (varietà di biotopi).

## METODOLOGIE DI CAMPIONAMENTO

La grande varietà degli ambienti sotterranei, come d'altronde la diversità del loro funzionamento, comporta metodologie differenziate di acquisizione dei dati legate ai problemi specifici di campionamento (MATHIEU *et al.*, 1991; CREUZÉ DES CHATELLIERS e DOLE-OLIVIER, 1991; BRUYÈRE *et al.*, 1993; PLENET e GIBERT, 1993); inoltre l'accessibilità di questi ambienti non è altrettanto semplice come quella dei siti di acque superficiali.

Vengono innanzitutto definite le difficoltà connesse con il reperimento e lo studio del materiale biologico e successivamente presentati i metodi di raccolta nei diversi ambienti naturali.

### 1) Difficoltà strettamente legate alla peculiarità del materiale biologico

I prelievi della microfauna interstiziale sono relativamente facili (filtrazione con rete a maglia di 70 $\mu$ ) e, di norma, non comportano deterioramenti degli organismi né a livello tegumentale né a livello degli organi interni. Al contrario, nella raccolta della macrofauna (rete con maglia da 300 $\mu$  circa) si può verificare la distruzione del materiale raccolto. I batteri movimentati dall'acqua durante il campionamento non causano, in genere, alcun problema particolare né di pompaggio né di stima.

### 2) Difficoltà legate alle tecniche di prelievo e all'ambiente

Per il prelievo in ambienti sotterranei acquidulci o marini esistono numerosi sistemi di prelievo che

dipendono dal materiale che deve essere raccolto (micro-, meio- e macrobenthos) e dalla natura del sito sotterraneo (falde, sorgenti, grotte, pozzi). Di conseguenza, le tecniche adottate risultano molto diverse e spesso sono necessarie ulteriori modifiche per specifiche applicazioni.

## Tipologie di campionamento

### A) Emergenze in acquiferi carsici e fratturati

#### ● Prelievi istantanei

Filtrazione tramite posa di retini di raccolta in contro corrente dotati di maglie da 30 a 300 $\mu$ . I principali inconvenienti sono dovuti all'azione della corrente che può danneggiare gli organismi; anche l'eccessiva torbidità può danneggiare il campione e compromettere l'efficienza del retino.

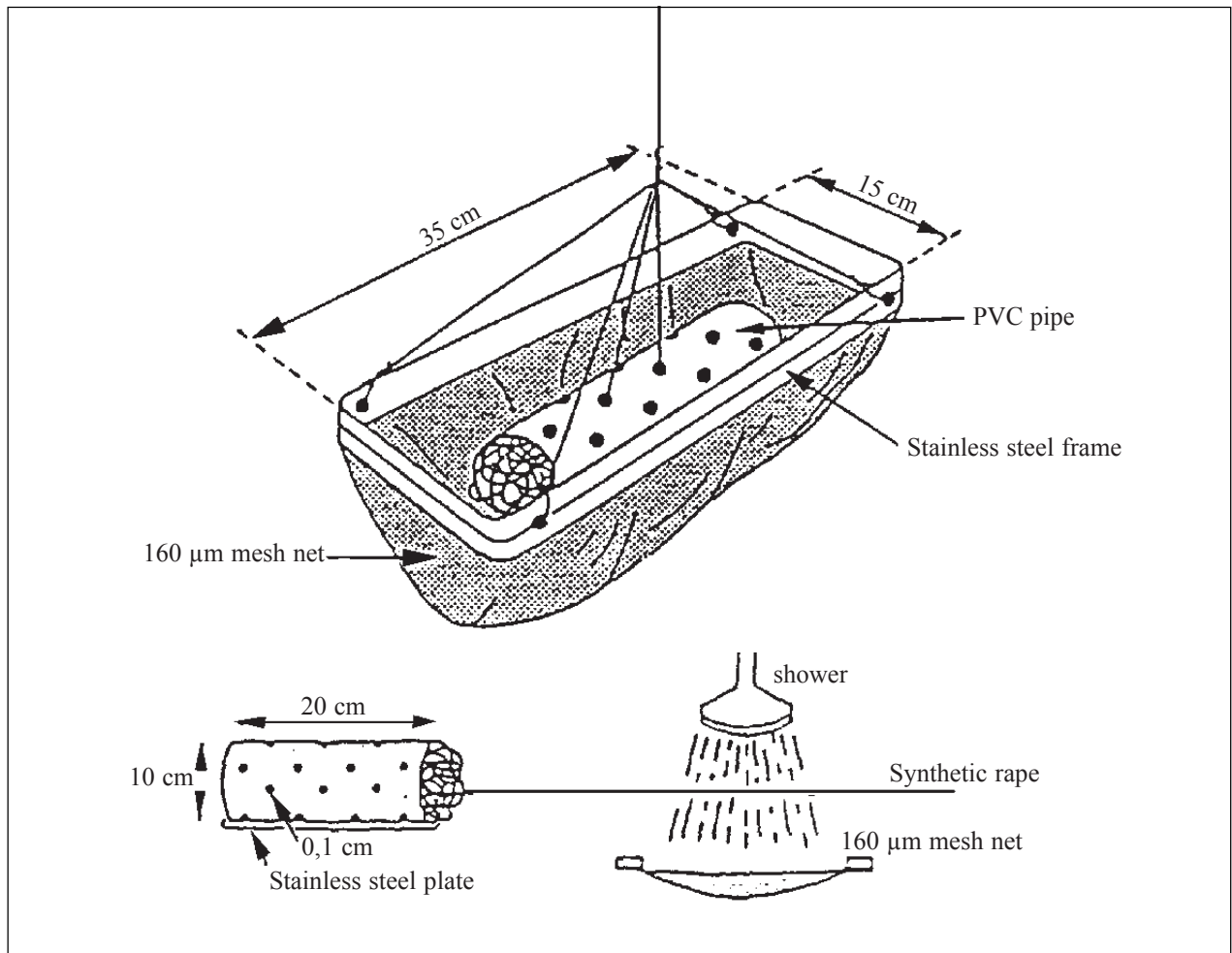
#### ● Prelievi dopo colonizzazione

Nei sistemi carsici, all'imboccatura delle falde acquifere o in emergenze idriche di tipo sorgivo (acquiferi fessurati) possono essere sistemati i *substrati artificiali*, realizzati con tubi perforati fissati tramite un supporto e riempiti di corda o altri materiali atti a favorire la colonizzazione. L'insieme è trattenuto da una rete che agisce da recettore al momento del ritiro (Fig. 1). Modelli più evoluti prevedono, all'interno del cilindro, l'inserimento di altri cilindri perforati più piccoli, riempiti con substrato colonizzabile proveniente dal terreno alluvionale della zona studiata o con materiale artificiale; la durata di esposizione varia da pochi giorni ad un mese circa a seconda del modello e del tipo di substrato utilizzato, ma soprattutto dalla finalità della ricerca. Tale metodo rappresenta un valido "habitat rifugio" per la fauna interstiziale e permette lo studio della stratificazione. Oggi il modello ritenuto maggiormente evoluto per la sua funzionalità, definito recentemente da TABACCHI (in MATHIEU *et al.* 1991), consiste in un gruppo a tre cilindri, dei quali il più esterno resta fisso nel sedimento e i due interni sono semovibili ed estraibili contemporaneamente. I cilindri interni sono inoltre sostituibili.

### B) Falde alluvionali e di subalveo (ambienti interstiziali)

#### ● Prelievi istantanei

*Metodo Karaman-Chappuis*: maggiormente impiegato per investigazioni in ambiente iporreico, con-



**Fig. 1.** In alto: substrato artificiale utilizzato in ambienti carsici; in basso: raccolta della fauna in laboratorio (da MATHIEU *et al.*, 1991).

siste nello scavo di una fossa nei terreni alluvionali non inondati e nella successiva filtrazione dell'acqua che si è raccolta nella depressione creata. Generalmente non ci si spinge oltre il metro di profondità rispetto al livello piezometrico della falda.

*Metodo Bou-Rouch:* posa di una pompa aspirante manuale a pistone, detta "pompa freatobiologica", comunemente conosciuta come "pompa Norton". Consiste in una sonda formata da un tubo metallico con la parte terminale (spada) forata, che viene affondata e collegata alla pompa a mano. Questo metodo viene utilizzato per prelievi effettuati tra i 20 e i 50 cm, comunque sempre entro il metro di profondità (Fig. 2).

*Metodo del "freezing core":* è simile al precedente, ma viene iniettato azoto liquido nella sonda attra-

verso un foro; in tal modo materiali alluvionali, materia organica, eventuali sostanze inquinanti e fauna sotterranea vengono imprigionati in una carota ghiacciata; l'insieme solidificato è estratto tramite un paranco. Tale metodo può essere migliorato con il posizionamento, circa due giorni prima del prelievo, di due elettrodi affondati nel sedimento. Al momento del campionamento si attiva l'erogazione della corrente e quindi gli organismi vengono immobilizzati tramite elettrocuzione.

- **Prelievi dopo colonizzazione**

*Metodo Bretschko:* posizionamento di sonde fisse impiantate nel sedimento e lasciate in situ per tre giorni durante i quali avviene la colonizzazione dei substrati contenuti nella sonda. Gli organismi vengono poi aspirati tramite pompa.

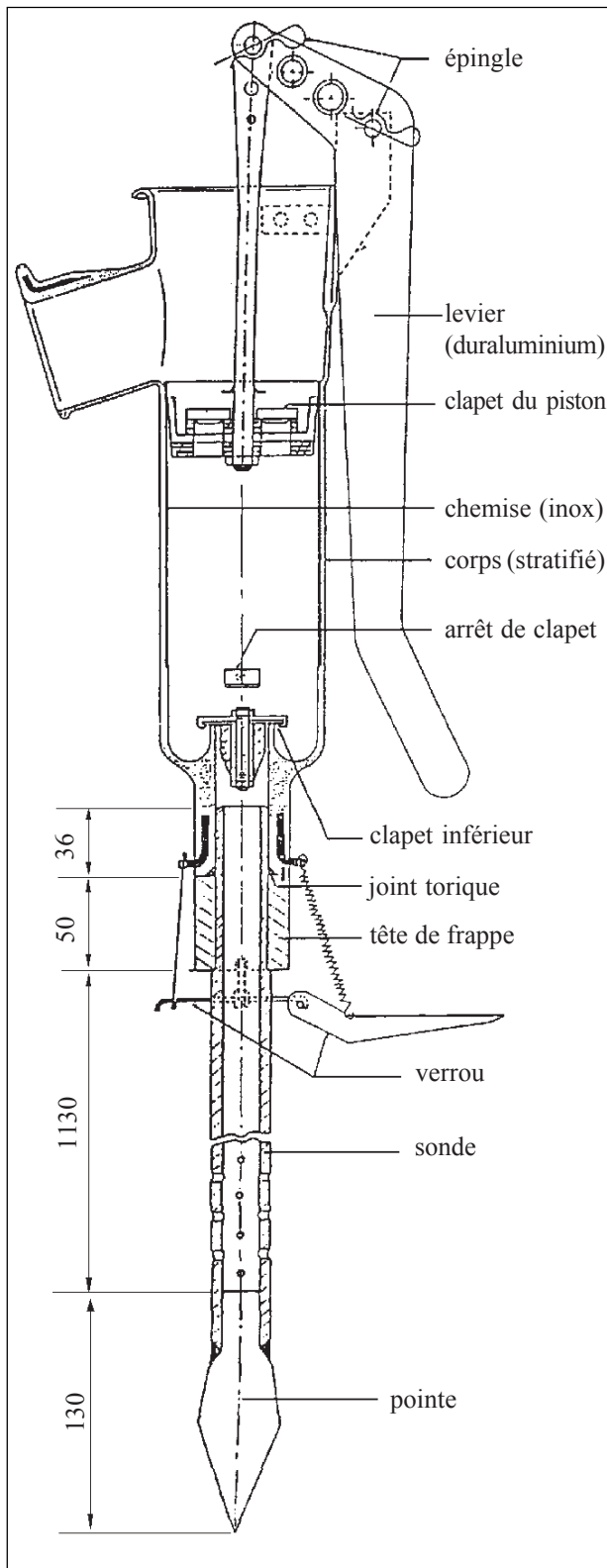


Fig. 2. Pompa tipo "Bou-Rouch" (da MATHIEU *et al.*, 1991).

*Metodo dei substrati artificiali*: già descritto per gli acquiferi carsici.

### C) Falde profonde (oltre 7 m di profondità)

I terreni acquiferi sono investigabili mediante aperture artificiali e trivellazioni di varia natura; generalmente i pozzi costituiscono il principale accesso per l'investigazione.

Per studi effettuati a partire da un diametro di 1" 1/2 (41 mm circa) si può utilizzare una pompa pneumatica sommergibile, efficace fino a 50 m circa di profondità. Tali pompe consentono il passaggio di sedimento, ma hanno un debole potere di aspirazione e quindi si intasano con frequenza.

A partire da 2" (55 mm circa) esistono pompe elettromeccaniche "da immersione" che, sebbene siano efficienti fino a 90 m di profondità, arrecano danni alla microfauna a causa delle eliche (sistemi a vuoto interno).

Per la ricerca effettuata in pozzi con diametro di 4" (circa 110 mm) si può utilizzare un retino freatobiologico. La profondità accessibile è tuttavia limitata a circa 50 m per via della trazione manuale della fune che sorregge il retino stesso; è particolarmente indicato per la ricerca biologica. Il retino tipo "Cvetkov" consiste in un anello metallico appesantito con piombi collegato, tramite una fascia in tela robusta, alla rete conica filtrante dotata di un collettore terminale estraibile, anch'esso appesantito con piombi. Una valvola, posta in prossimità del tratto terminale del cono filtrante, impedisce il riflusso dell'acqua. L'anello metallico è collegato tramite tre tiranti ad una lunga fune con la quale viene calato l'attrezzo fino al fondo del pozzo. Mediante movimenti rapidi di caduta e successive trazioni si opera uno scuotimento e una filtrazione del sedimento del fondo. A partire da un diametro di 400 mm e oltre sono utilizzabili pompe idrovore ad immersione.

### Considerazioni generali

Le diverse tecniche presentano sistemi investigativi ben delineati e forniscono materiale e informazioni abbastanza specifici sulla fauna raccolta. Tuttavia, la diversità dei siti investigabili non consente di definire il "sistema di campionamento ideale" per ogni ambiente; è necessario pertanto, prima di ogni campagna d'indagine, valutare accuratamente la tecnica di pre-

lievo più opportuna tenendo conto dell'ambiente acquifero e delle caratteristiche litologiche ed idrogeologiche locali. Gli inconvenienti più frequenti nei prelievi di fauna interstiziale, soprattutto iporreica (es. metodo Bou-Rouch), sono legati alla possibile contaminazione-infiltrazione di acque superficiali determinata dalla depressione creata dall'aspirazione della pompa. Meno probabile risulta invece la cattura di organismi superficiali poiché, contrariamente all'acqua, gli organismi sono trattenuti negli strati superiori di terreno alluvionale. Le sonde mobili forniscono risultati semiquantitativi mentre le sonde fisse, atte soprattutto alla colonizzazione e ritirate dopo un certo periodo, permettono di raccogliere dati qualitativi talvolta specifici a seconda della natura del substrato studiato.

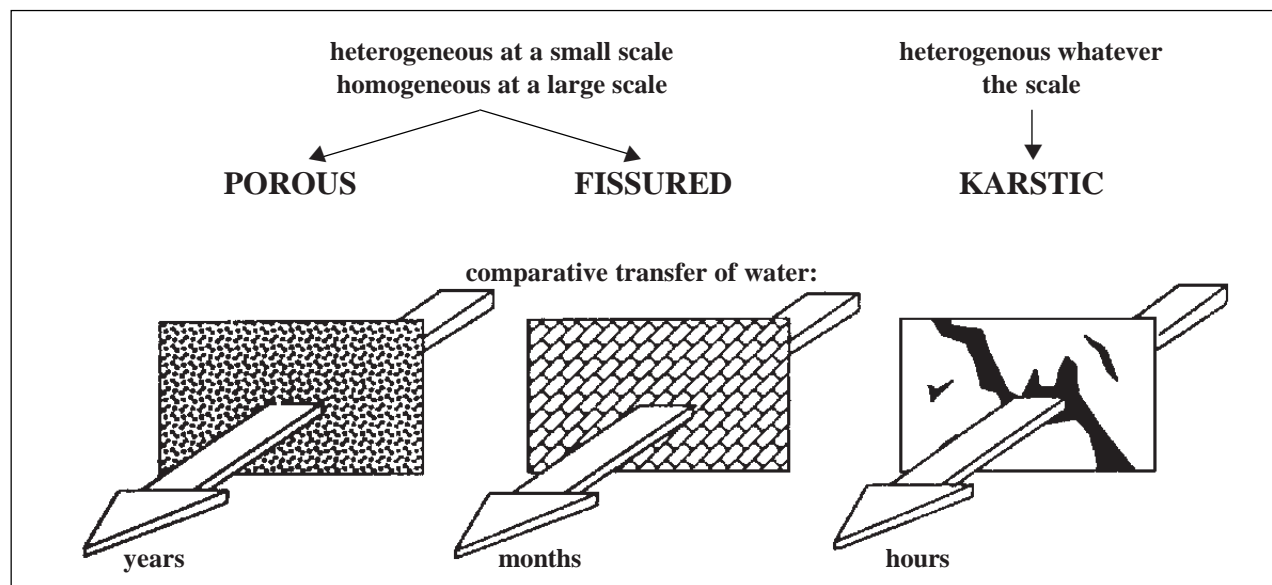
### HABITAT SOTTERRANEI

Le falde sotterranee possono essere classificate in diversi gruppi a seconda della struttura e della dimensione degli spazi interstiziali e della variabilità spaziale; le principali tipologie sono gli acquiferi interstiziali, quelli fessurati e quelli carsici (GIBERT *et al.*, 1990; CREUZÉ DES CHATELLIERS e POINSART, 1991; CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991; MARMONIER *et al.*, 1993).

Gli *acquiferi interstiziali* sono situati in corrispondenza delle piane alluvionali dei corsi d'acqua e sono di spessore variabile (da pochi centimetri fino a centinaia di metri). I sedimenti possono essere di natura diversa: sabbiosi, formati da ghiaia e ciottoli, talvolta con lingue argillose, limosi o fangosi o fluvio-glaciali di derivazione morenica. L'ambiente di falda associato ai corsi d'acqua superficiali, caratterizzato da una ricca fauna direttamente dipendente da quella del corpo idrico di alimentazione, è detto *iporreico* per distinguerlo dal più generale ambiente *freatico* non direttamente a contatto con il corso d'acqua superficiale. Sebbene i due habitat siano caratterizzati da peculiari differenze faunistiche con biotopi ben distinti (ORGHIDAN, 1959 in CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991), la separazione tra essi non è mai netta e si sposta nel corso dell'anno, determinando continui scambi di fauna e ripopolamenti dell'ambiente sotterraneo.

Gli *acquiferi fessurati* sono dotati di fratture di dimensioni maggiori rispetto a quelle degli acquiferi interstiziali e sono caratteristici di formazioni litologiche prevalentemente compatte.

Gli *acquiferi carsici* sono invece costituiti da rocce ricche di carbonati che vengono disciolte per mezzo



**Fig. 3.** Principali tipi di acquiferi: interstiziale (poroso), fessurato e carsico. Questi habitat differiscono principalmente per la struttura fisica, in particolare per le dimensioni degli spazi vuoti; tale fattore determina una diversa permeabilità nei confronti degli elementi provenienti dai sistemi superficiali ed influenza alcune caratteristiche biologiche della fauna sotterranea (da MARMONIER *et al.*, 1993).



dell'acqua che in esse penetra e circola (MANGIN, 1985, 1986; BAKALOWICZ, 1986); gli spazi creati dal carso sono molto più ampi di quelli esistenti negli acquiferi porosi e fessurati. Il carso presenta una morfologia particolare, caratterizzata da strutture superficiali (esocarso), come le doline, e da un complesso reticolo di spazi profondi (endocarso), costituito da canali, piccole grotte, corsi d'acqua sotterranei. Nell'ambiente carsico le acque, in genere assenti in superficie, sono immagazzinate in profondità e danno vita a sorgenti molto abbondanti (GIBERT, 1990; GIBERT *et al.*, 1990; CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991).

Gli ambienti sopra descritti differiscono principalmente per la loro struttura fisica, in particolare per le dimensioni degli spazi vuoti (Fig. 3); ne deriva una diversa permeabilità nei confronti dell'ambiente superficiale che influenza le caratteristiche biologiche della fauna sotterranea (ROUCH, 1977; CREUZÉ DES CHATELLIERS, 1991; CREUZÉ DES CHATELLIERS & POINSART, 1991; MARMONIER *et al.*, 1993).

Di particolare interesse è lo studio degli ecotoni sotterranei (Fig. 4), zone dotate di una caratteristica elasticità fisica che varia irregolarmente nel corso dell'anno in funzione delle stagioni, delle condizioni meteorologiche, delle piene, ecc. Le zone di connessione tra livelli superficiali e profondi si ampliano durante le esondazioni o le piene; in queste situazioni nuove specie possono colonizzare gli strati saturi della sottostante falda. L'ecotono non solo agisce nell'integrazione tra due ambienti distinti ma determina una zona di continuità con caratteristiche fisiche, chimiche e biologiche intermedie tra sistema superficiale e ipogeo (GIBERT, 1991; PLENET *et al.*, 1992 a).

Gli ecotoni vengono generalmente distinti in:

- *Ecotoni terra-acqua a legame idrico indiretto*, ad esempio l'interfaccia suolo insaturo-saturo, attraversata in senso discendente dall'acqua piovana che percola per gravità e in senso contrario dall'acqua che risale per capillarità dalla zona satura. L'instabilità idrologica determina oscillazioni verticali dell'interfaccia (fluttuazioni stagionali) stabilendo così un legame indiretto tra l'ecosistema "terra" e quello "acqua". Ecotoni di questo tipo sono caratterizzati da instabilità delle biocenosi interstiziali, da comunità con un basso indice di diversità e da forme adattatesi ancestralmente all'acquifero e, forse, in grado di superare momenti sfavorevoli in fase criptica.

- *Ecotoni acqua-acqua con legame diretto*: si realizzano in tutti i sistemi in cui vi sia un collegamento diretto tra acque superficiali e profonde. Aumenti di portata possono ampliare la zona di ecotono. Le popolazioni tenderebbero potenzialmente alla stabilità con possibilità di modificarsi nel tempo; infatti, essendo sistemi aperti, ad una frazione di fauna "adattata" si aggiungono periodicamente nuove forme biologiche epigee che possono successivamente adattarsi all'acquifero.

## ASSOCIAZIONI BIOLOGICHE

### ● Colonizzazione e adattamenti

Un tempo le acque sotterranee venivano considerate ambienti caratterizzati da una certa monotonia, quasi privi di variabilità nei parametri fisici, chimici e biologici, in cui si riteneva assente la produzione primaria. Recenti studi più approfonditi hanno messo in rilievo una eterogeneità delle falde acquifere tale da farle considerare ambienti variabili quasi quanto quelli superficiali (DOLE-OLIVIER *et al.*, 1993; MARMONIER *et al.*, 1993).

Sembra che la colonizzazione dell'ambiente sotterraneo da parte di organismi viventi abbia avuto inizio sia da antenati marini che di acque dolci; per spiegare tale processo sono stati proposti due modelli distinti: il "modello rifugio" ed il "modello di colonizzazione attiva" (ROUCH e DANIELOPOL, 1987; DANIELOPOL & ROUCH, 1991; MARMONIER *et al.*, 1993).

Secondo il primo modello, adottato negli anni '50-'60, le acque sotterranee costituirono nel passato un rifugio per gli organismi superficiali da situazioni ambientali divenute estreme (ad esempio le variazioni climatiche); ovviamente, in tale processo era necessario il preadattamento della specie pioniera a questo nuovo ambiente che doveva presentare condizioni non troppo dissimili da quelle di provenienza. Questo modello non spiegava però le ragioni della colonizzazione di falde sotterranee nei climi caratterizzati, anche nel passato, dalla quasi totale assenza di variazioni "fisico-ambientali" delle acque superficiali e da condizioni climatiche pressoché invariabili (per es. nelle zone tropicali).

In contrasto con l'ipotesi del "rifugio", ROUCH e DANIELOPOL (1987) hanno proposto il modello di colonizzazione attiva, secondo cui la colonizzazione delle

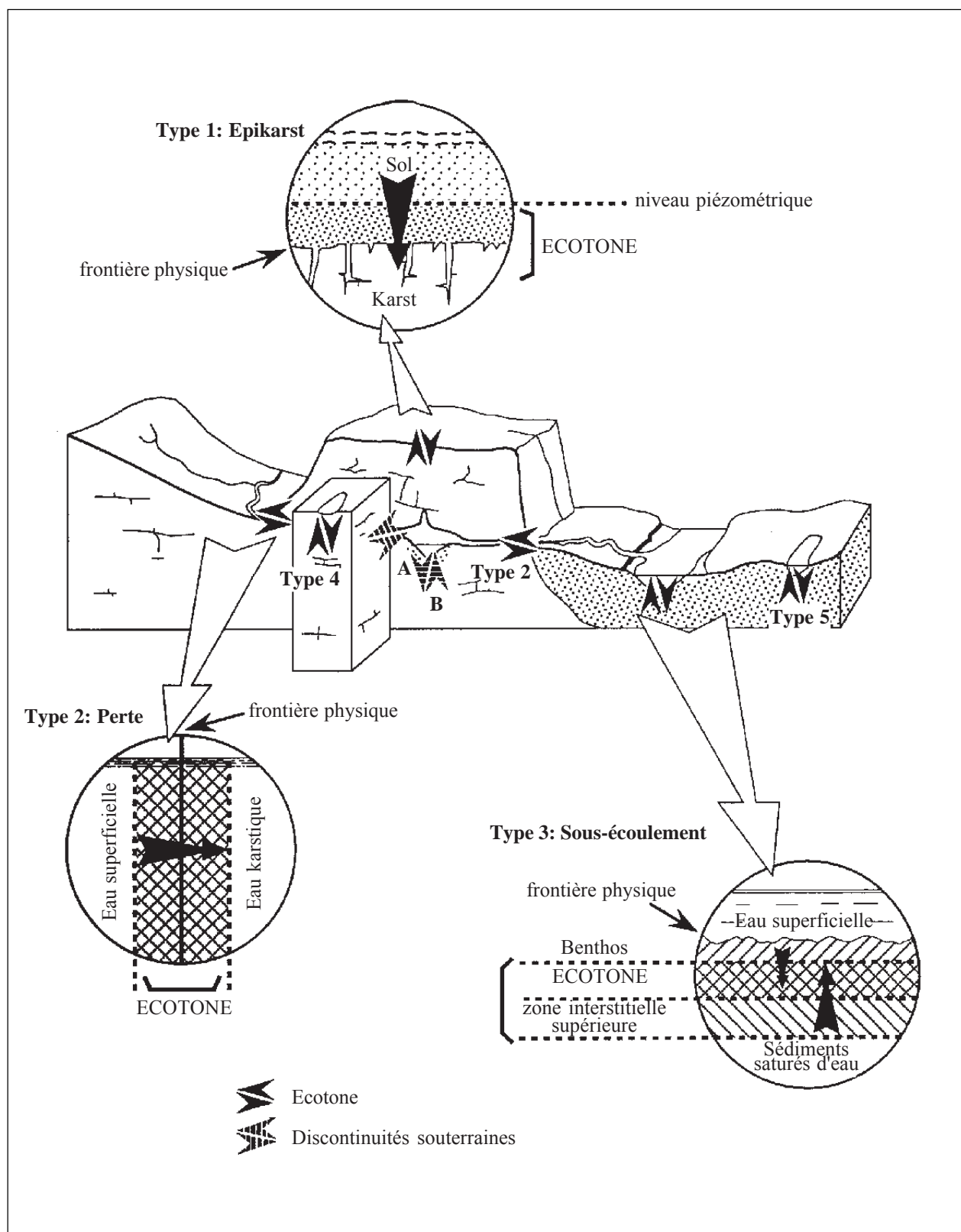


Fig. 4. Principali tipi di ecotoni acqua superficiale/acqua sotterranea verticali e orizzontali (da PLENET e GIBERT, 1993).

acque sotterranee è il risultato di una progressiva estensione, rispetto alla distribuzione originale, di alcune specie all'interno del sistema sotterraneo, legata alla capacità di esplorazione e di adattamento degli organismi stessi. Secondo tale ipotesi, le diverse specie colonizzarono l'ambiente ipogeo in periodi caratterizzati da condizioni ambientali e climatiche piuttosto stabili ed utilizzarono gli ecotoni per adattarsi più facilmente al passaggio da un ambiente all'altro.

Gli organismi tipici delle acque sotterranee hanno sviluppato nel tempo caratteristiche morfologiche convergenti, quali la perdita di pigmentazione, la gracilità, l'allungamento delle appendici, la regressione o scomparsa degli occhi (quest'ultima compensata dall'ipertrofia di altri organi sensoriali); analogie si riscontrano anche nei caratteri fisiologici –come il metabolismo rallentato, il basso tasso di riproduzione, l'alta longevità– e in alcuni aspetti comportamentali quali bassa attività, stereotropismo, termotattismo, speciali strategie eto-fisiologiche e alimentazione polifaga.

Gli organismi rinvenibili nell'ambiente sotterraneo sono stati distinti (ROUCH e DANIELOPOL, 1987), in relazione al diverso grado di connessione con l'ambiente ipogeo, in:

a) *Stigosseni*: organismi epigei che appaiono raramente e con distribuzione casuale nelle acque sotterranee (es. l'Anfipode *Gammarus fossarum*);

b) *Stigofili*: organismi epigei che compaiono anche nelle acque sotterranee, senza però alcun tipo di adattamento alla vita sotterranea stessa. In particolare, questi organismi si suddividono in:

- iporreici facoltativi: vivono sia nelle acque superficiali sia nel sedimento, ma hanno uno stadio epigeo obbligato (ad es. molti insetti acquatici ed il benthos di superficie);

- iporreici permanenti: vivono sia nelle acque superficiali sia nei sedimenti, senza avere nessuno stadio epigeo obbligato.

c) *Stigobionti*: assenti nelle acque superficiali, sono abitanti comuni delle acque sotterranee e presentano caratteristiche adattative tipiche dell'ambiente ipogeo (es.: gli Anfipodi *Salentinella deramarei*, *Niphargus rhenorhodanensis*, *Niphargopsis casparyi*, l'Isopode *Proasellus walteri* e gli Ostracodi *Fabaeformiscandona wegwlini* e *Pseudocandona triquetra* (DOLE-OLIVIER *et al.*, 1993). Gli stigobionti detti “ubi-

quitari” sono in grado di colonizzare tutti i sistemi sotterranei; altri, denominati “freatobiti”, sono ristretti solo alle falde acquifere porose o interstiziali (freatiche) (Fig. 5).

Sebbene gli organismi ipogei presentino caratteristiche morfologiche analoghe, non devono tuttavia essere considerati un gruppo omogeneo (CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991; MARMONIER *et al.*, 1993); recenti studi condotti su specie diverse hanno evidenziato notevoli differenze nelle risposte a fattori ambientali (ad es., strategie diverse per sopperire alla scarsità di ossigeno); inoltre, piccole differenze morfologiche fra singole specie possono significare grandi diversità fisiologiche.

Gli ecotoni risultano particolarmente importanti in quanto forniscono rifugio alle forme superficiali durante le piene. Questi particolari ambienti, inoltre, presentano una maggiore quantità di ossigeno e di materia organica a causa dei continui scambi con lo strato d'acqua superficiale soprastante, costituendo un substrato più ricco rispetto a quello ipogeo.

#### ● Differenze faunistiche tra acquiferi

Gli ambienti sotterranei sono diversificati quasi quanto quelli superficiali e le specie ipogee presentano differenze a seconda del sistema sotterraneo in cui vivono. Tra le specie ipogee, alcune sembrano legate ad un tipo particolare di ambiente, altre hanno colonizzato ambienti molto diversi tra loro (ad esempio l'Isopode *Proasellus cavaticus* e l'Anfipode *Niphargus rhenorhodanensis*).

Nelle falde porose o interstiziali, costituite per lo più da formazioni mobili sabbiose o ghiaiose, i minuscoli spazi intergranulari permettono esclusivamente la colonizzazione di organismi di piccole dimensioni; al contrario, le falde acquifere calcaree o granitiche, caratterizzate da spazi molto ampi, ospitano i più grandi organismi del mondo sotterraneo (CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991).

#### ● Alimentazione

Gli ambienti sotterranei sono sistemi eterotrofi che attingono l'energia dai sistemi superficiali. Nei sistemi carsici, tuttavia, l'apporto di energia può realizzarsi in modo diretto per trascinamento, ad opera delle acque superficiali, di depositi legnosi o vegetali (foglie, rami, frammenti organici di varia natura), oppu-



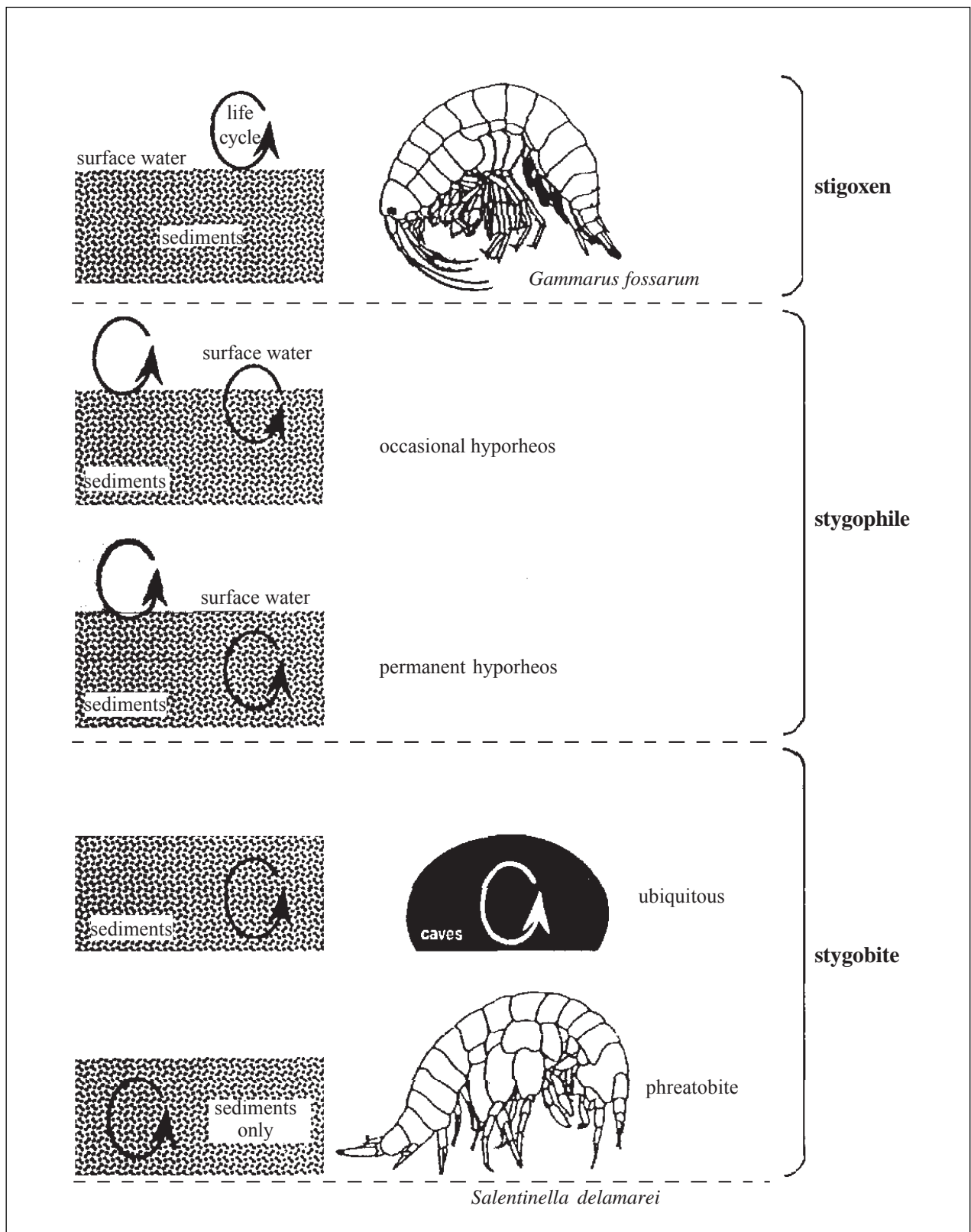


Fig. 5. Differenti organismi presenti nelle acque sotterranee (da MARMONIER *et al.*, 1993).

re di organismi morti o vivi che possono rappresentare prede per le forme sotterranee.

Forme batteriche sono riscontrabili anche in acquiferi isolati, caratterizzati da limitatissimi apporti organici, in cui possono pervenire elementi algali o muffe che rappresentano un ottimo substrato per la proliferazione di cospicue e specifiche flore batteriche. Le argille ed i fanghi sotterranei, nei quali si accumula sostanza organica proveniente dagli strati superiori e si accrescono i microrganismi, rappresentano un pabulum importante che favorisce una ricca fauna. Gli organismi ipogei sono infatti generalmente microfagi e detritivori; solo qualche organismo di grandi dimensioni, appartenente ai generi *Niphargus* e *Proasellus*, presenta un regime polifago tale da essere considerato un potenziale predatore; osservazioni condotte su Anfipodi Niphargidi e Isopodi Asellidi (CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991) hanno dimostrato che tali crostacei ipogei possono alimentarsi con queste risorse indirette di energia.

Nei sistemi idrici sotterranei le catene alimentari sono dunque relativamente corte e i Crostacei possono essere considerati gli equivalenti dei pesci nelle acque superficiali.

#### ● Ciclo biologico

Generalmente la maggioranza degli organismi superficiali presenta ritmi sessuali discontinui, legati alle variazioni stagionali, alla durata della luce e alla temperatura. Al contrario, gli animali ipogei non presentano interruzioni nella riproduzione e le femmine ovigere compaiono tutto l'anno. Tuttavia, in alcuni Artropodi ipogei sono state osservate variazioni del ciclo sessuale con alternanza di periodi di maggiore e di minore attività riproduttiva, sebbene non si verifichi mai un periodo di pausa o arresto riproduttivo (CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991).

Studi effettuati da HENRY (1976, in CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991) su Isopodi ipogei hanno mostrato che le popolazioni interstiziali, direttamente influenzate dal corso d'acqua superficiale soprastante, presentano un periodo di massima riproduzione più accentuato rispetto ai popolamenti carsici; le variazioni stagionali e quindi termiche si ripercuotono rapidamente nell'ambiente interstiziale, mentre negli ambienti carsici le variazioni sono attenuate e la temperatura dell'acqua risulta pressoché costante; tutta-

via nelle cavità carsiche maggiormente a contatto con l'ambiente idrico superficiale i cicli riproduttivi hanno un andamento più simile a quello degli organismi interstiziali, caratterizzato da periodi di maggiore riproduzione.

Da studi effettuati da TURQUIN (1981), sembra che la riproduzione dell'Anfipode *Niphargus virei* sia correlata non tanto alle variazioni di temperatura stagionale, ma ad altri riferimenti temporali come ad esempio al ciclo idrologico del sistema carsico, a sua volta indirettamente correlato alle variazioni stagionali dell'ambiente superficiale.

#### ● Densità e forme tipiche sotterranee

È difficile stimare la densità di organismi presenti nelle piane alluvionali o nei sistemi carsici dei corsi d'acqua; campionamenti effettuati sul Fiume Rodano filtrando campioni di 10 litri di acqua e sedimento hanno fornito valori intorno ai 7.000 individui/campione, con netta preponderanza di Crostacei. Nei sistemi carsici la densità è risultata ugualmente alta; nel massiccio di Dorvan è stato stimato un valore medio annuo di circa 45.000 individui/campione, considerando solo il genere *Niphargus*; nel sistema carsico del Baget, in ogni ciclo idrologico (anno solare) vengono introdotti nell'ambiente sotterraneo dai 7 ai 14 milioni di organismi (CREUZÉ DES CHATELLIERS *et al.*, 1991). I valori di densità riscontrati, generalmente elevati, hanno condotto a nuove ricerche allo scopo di delineare le tipicità biologiche dei diversi ambienti.

DOLE-OLIVIER *et al.* (1993), analizzando un tratto del Fiume Rodano caratterizzato da un materasso alluvionale con sedimenti di diversa tipologia, hanno riscontrato la presenza di numerose specie (alcune delle quali non strettamente stigobionti) appartenenti a 12 gruppi diversi, prevalentemente Crostacei: Cladoceri, Ciclopoidi, Arpacticoidi, Ostracodi, Isopodi, Anfipodi e Sincaridi. Gli Anfipodi sono risultati i più significativi, presenti con 10 specie. Differenze sono state osservate nella composizione qualitativa e quantitativa della stigofauna; solo due generi (*Niphargopsis* e *Niphargus*) sono stati riscontrati in tutti i siti, mentre altre forme sono risultate assenti in alcune stazioni e ben rappresentate in altre. La distribuzione verticale della fauna ipogea è risultata non uniforme, caratterizzata in superficie da poche specie ben rappresentate e in profondità da un maggior numero di

forme, presenti però in minore densità. Le differenze quali-quantitative degli stigobionti dipendono principalmente dal momento idrologico in cui avviene il campionamento; pertanto, tali organismi possono essere considerati utili indicatori delle fluttuazioni idrologiche del sistema superficiale-sotterraneo e utilizzabili nel biomonitoraggio (CREUZÉ DES CHATELLIERS e POINSART, 1991; MARMONIER e CREUZÉ DES CHATELLIERS, 1991).

Nell'ambiente sub-fluviale la fauna interstiziale è dominata dagli Anfipodi del genere *Niphargus* che, per le sue caratteristiche biologiche, può essere considerato una specie ipogea a larga valenza ecologica, in grado di sopportare condizioni ambientali molto variabili. Il genere *Salentinella*, invece, è uno stigobionte per eccellenza, molto sensibile a modificazioni dell'ambiente. Gli Isopodi ipogei sono rappresentati dal genere *Proasellus*, ospite abituale dei sistemi alluvionali dei corsi d'acqua. Tra gli Ostracodi ipogei, il genere *Fabaeformiscandona* non penetra mai molto in profondità, mentre *Pseudocandona* (come *Niphargus* e *Niphargopsis*) predilige terreni porosi interessati da recenti esondazioni (CREUZÉ DES CHATELLIERS, 1991).

Studi effettuati nel Fiume Rodano (MARMONIER *et al.*, 1992) hanno evidenziato che nelle zone interstiziali iporreiche, interessate dall'apporto continuo di acque di superficie, durante le piene primaverili si verifica un dilavamento imponente del sistema interstiziale con conseguente depauperamento della fauna ipogea; questi ambienti, rimasti privi della maggior parte delle specie freatiche, nel periodo estivo sono in breve tempo ricolonizzati da numerose forme epigee. Nelle zone sotterranee quasi esclusivamente interessate da acque di falde maggiormente profonde, durante le piene primaverili gli scarsi apporti di acque superficiali determinano una scarsa penetrazione di organismi negli interstizi, permettendo così la conservazione della sottostante fauna ipogea. Le caratteristiche idrodinamiche e la posizione della falda rispetto al corso d'acqua superficiale influenzano quindi la distribuzione e la ricchezza della fauna interstiziale.

Nelle zone carsiche povere di sedimento, il fenomeno delle piene ha un effetto "catastrofico" poiché tende a dilavare completamente l'area dalla fauna che vi alberga; al contrario, nelle zone carsiche ricche di sedimento, dove gli effetti delle piene sono meno

disastrosi, gli organismi ipogei hanno maggiori possibilità di rifugio e la ricolonizzazione è immediata. In particolare, è stata studiata la distribuzione dell'Anfipode *Niphargus*, stigobionte dotato di grandi capacità di adattamento, in due zone carsiche (Massiccio di Dorvan e Giura), rilevando una stretta correlazione tra le caratteristiche geologiche e idrologiche e l'abbondanza di questa specie (MATHIEU e ESSAFI, 1991; ESSAFI *et al.*, 1992).

Studi sulla distribuzione e sull'abbondanza di *Niphargus rhenorhodanensis* e *Proasellus valdensis*, condotti in zone carsiche (MATHIEU *et al.*, 1992) con substrati artificiali affondati nel sedimento, hanno evidenziato una maggiore densità di organismi negli strati superficiali; indagini condotte prima e dopo l'effetto di una piena piuttosto violenta, hanno rilevato diminuzioni nette del popolamento seguite da lente ricolonizzazioni.

Particolare rilievo hanno assunto, negli ultimi anni, gli studi sul tropomorfismo. Una ricerca effettuata su alcuni aspetti comportamentali di *Niphargus* (ESSAFI *et al.*, 1991) ha evidenziato differenze di locomozione in popolazioni diverse, prevalentemente causate dalle diverse dimensioni di ogni singola specie; tuttavia il comportamento assunto durante la locomozione potrebbe essere condizionato dall'habitat: gli organismi che vivono in ambienti molto ristretti e che sono a contatto con entrambi i lati del corpo con le pareti interstiziali, in genere, nuotano indifferentemente su entrambi i lati, mentre quelli che vivono in ambienti più ampi sembrano prediligere un solo lato durante la locomozione.

Tipici abitanti delle acque sotterranee sono gli Ostracodi, la cui biogeografia è stata studiata da numerosi Autori (MARMONIER e WARD, 1990; CREUZÉ DES CHATELLIERS e REYGROBELLET, 1990; CREUZÉ DES CHATELLIERS, 1991; CREUZÉ DES CHATELLIERS e POINSART, 1991; CREUZÉ DES CHATELLIERS e MARMONIER, 1993; MARMONIER, 1991; MARMONIER e CREUZÉ DES CHATELLIERS, 1991; MARMONIER e CREUZÉ DES CHATELLIERS, 1992); studi condotti sulla distribuzione di questi organismi in ambienti bentonici ed interstiziali hanno evidenziato una stretta relazione tra la densità, il grado di eutrofizzazione del corso d'acqua e gli scambi di acqua tra ambiente bentonico e interstiziale; la microdistribuzione non appare tanto legata ai parametri chimico-fisici quanto invece alle caratteristiche

idrologiche e geomorfologiche dello specifico corpo idrico.

### **ORGANISMI STIGOBIONTI COME BIOINDICATORI**

Nello studio delle acque sotterranee è necessario stabilire le relazioni tra sistema acquifero e dinamica delle popolazioni presenti in tale ambiente, cercando di capire come le variazioni spaziali e temporali dell'habitat ipogeo influiscano sulla composizione, struttura e biologia delle comunità ivi stanziate. Inoltre, è necessario conoscere l'impatto derivante dalle perturbazioni antropiche sulle popolazioni sotterranee; sotto questo aspetto gli organismi ipogei rivestono un ruolo di rilevante importanza nella ricerca delle sostanze inquinanti, dei loro effetti sull'ambiente e, più in generale, nella conoscenza del funzionamento degli ecosistemi sotterranei. Gli organismi ipogei, infatti, possono essere considerati validi indicatori biologici, in grado di fornire informazioni di sintesi sulle caratteristiche ambientali dell'ecosistema sotterraneo e di rilevarne le eventuali alterazioni.

Il modo in cui i contaminanti vengono trasportati e diffusi attraverso le acque sotterranee dipende dal tipo di falda e dalla natura del substrato; numerose variabili ambientali di natura fisica (temperatura, dimensioni del sedimento e degli spazi interstiziali ecc.), chimica (pH, particelle in soluzione, ecc.) e biologica (attività microbica, fauna ipogea) possono infatti influenzare la diffusione di inquinanti (GIBERT, 1990).

In generale le falde acquifere in terreni porosi (falde di terreni alluvionali), caratterizzate da spazi interstiziali molto ristretti, presentano buone proprietà di filtrazione fisica, chimica e biologica e quindi notevole capacità di autodepurazione dei contaminanti, riducendo l'impatto delle sostanze inquinanti sulla qualità dell'acqua sotterranea. Nei sistemi carsici la capacità filtrante è invece ridotta a causa dei grandi spazi presenti, con un conseguente maggior rilascio di sostanze tossiche (P.I.R.EN., 1990; GIBERT *et al.*, 1991).

Alcuni usi del territorio comportano ripercussioni sugli habitat sotterranei. In ambienti carsici, i drenaggi volti ad eliminare l'endoreismo causano l'accumulo di depositi carbonatici, il prosciugamento delle sorgenti e l'erosione accelerata delle valli; l'approvvigionamento d'acqua per gli impianti idroelettrici deter-

mina modificazioni nella dinamica dei corsi d'acqua e quindi delle falde ipogee; il dragaggio di sedimenti causa l'abbassamento del livello idrico del corso d'acqua e della falda ad esso associata; la deforestazione nelle aree di ricarica delle falde induce l'erosione del suolo e l'aumento di sedimento fine nei sistemi ipogei; modificazioni quasi irreversibili negli ambienti sotterranei sono state provocate da dighe in seguito all'apertura delle paratoie, con conseguente ritorno d'acqua innaturale ed irregolare nell'habitat sotterraneo e sconvolgimento della biocenosi sotterranea. I danni più gravi derivano comunque dall'agricoltura intensiva e dall'industria i cui effetti inquinanti, noti a tutti, si estendono anche negli strati più profondi (GIBERT *et al.*, 1991).

Secondo DARMENDRAIL (1988 in GIBERT *et al.*, 1991) cinque sono i processi che intervengono nel passaggio di sostanze dalla superficie al sistema ipogeo: adsorbimento/desorbimento, precipitazione/soluzione, degradazione biotica e abiotica, complessazione (con formazione di ossidi e carbonati) e flocculazione/coagulazione/peptizzazione (con formazione di macromolecole organiche); questi processi possono interferire con il trasporto dei soluti e, quindi, del materiale inquinante.

La necessità di conoscere a fondo le interazioni tra gli inquinanti presenti nelle falde e gli organismi che in tali ambienti vivono ha indotto a promuovere ricerche sugli effetti causati dai contaminanti alla fauna sotterranea, sui processi di degradazione e riciclaggio degli inquinanti attuati dalla fauna e sull'uso di tali forme come indicatori di qualità delle falde ipogee (GIBERT, 1989; DURBEC & LAFONT, 1991; PLENET *et al.*, 1992; PLENET & GIBERT, 1993; MALARD *et al.*, 1994).

In seguito all'azione tossica di contaminanti sono stati osservati, oltre alla morte degli organismi, numerosi effetti quali alterazioni morfologiche e genetiche (ad es. deformità nelle setole di Oligocheti esposti a concentrazioni di mercurio), modificazioni nel ciclo vitale e riproduttivo e nelle abitudini, modificazioni nella struttura della comunità, presenza di fauna epigea saprobionte all'interno della falda (ad es. Tubificidi e Chironomidi) e induzione della carcinogenesi.

Studi recenti hanno evidenziato modificazioni nella struttura delle popolazioni ipogee per la presenza di sostanze inquinanti in un tratto del Fiume Rodano caratterizzato da contaminazione cronica (SCHMIDT *et*

*al.*, 1991); sono state osservate notevoli differenze rispetto alla fauna sotterranea presente a monte della città; diversi gruppi faunistici sono risultati particolarmente sensibili all'inquinamento mentre numerosi organismi della fauna interstiziale, come i Cladoceri, gli Ostracodi e i Copepodi, sembrano essere meno sensibili agli inquinanti; potrebbe quindi essere possibile considerare i microcrostacei come indicatori di un ambiente parzialmente degradato.

GIBERT *et al.* (1991), in studi condotti sulla falda del Fiume Botunya (Bulgaria), hanno osservato che la presenza di inquinanti nelle acque profonde (liquami civili, fertilizzanti chimici e scarichi industriali) causa la crescita delle popolazioni batteriche, la formazione di composti chimici (nitrati e fosfati) e la scomparsa dei macroinvertebrati.

DANIELOPOL *et al.* (1992) hanno osservato le variazioni nella distribuzione della fauna ipogea in un sistema sotterraneo interessato da fenomeni di ipossia. In condizioni di grave ipossia si registrava un forte decremento del numero di specie; il ripopolamento si verificava non appena la concentrazione di ossigeno aumentava. Gli Isopodi sono risultati il primo gruppo a insediarsi nuovamente nelle zone studiate, seguiti da Anfipodi e Cladoceri.

Le forme appartenenti alla meio- e macrofauna rivestono un ruolo importante nella degradazione delle sostanze inquinanti, attuando alcuni specifici processi (P.I.R.EN., 1990):

- Biodegradazione e biotrasformazione: la fauna ipogea è in grado di trasformare alcuni inquinanti in prodotti non tossici. Numerosi studi hanno individuato i processi di degradazione degli idrocarburi e di regolazione di alcuni metalli pesanti.
- Bioaccumulo: Le sostanze tossiche sono accumulate sulle pareti del corpo per assorbimento, oppure ingerite e assimilate dal tubo digestivo; attraverso la catena alimentare i contaminanti già concentrati dagli organismi predati passano in quelli di livello trofico superiore. Con tali processi, alcuni fenomeni inquinanti sono rallentati o temporaneamente contenuti in modo da favorire il ripristino delle condizioni ambientali primitive.
- Bioturbativa: lo spostamento e il trasporto dei sedimenti da parte degli organismi è definito processo di "bioturbativa"; è provocato da Oligocheti, larve di Chironomidi, e, in maniera meno efficace, da Crosta-

cei e altre larve di Insetti; tale processo crea modificazioni nella struttura del sedimento, in particolare nella porosità e nella conseguente ritenzione di inquinanti.

Non è quindi da sottovalutare il contributo che complessivamente è svolto dalle attività biologiche nel concorrere alla "depurazione" delle acque sotterranee.

I macroinvertebrati delle acque sotterranee possono giocare, entro certi limiti dipendenti dal quantitativo organico presente, un ruolo significativo nella decomposizione e nel consumo di materia organica derivante da scarichi fognari; da uno studio effettuato in una falda localizzata a valle di uno scarico fognario (SINTON, 1984, in GIBERT *et al.*, 1991) è stato osservato infatti un aumento di stigobionti nelle zone ricche di materiale organico ma, al contrario, un'alta mortalità della fauna ipogea in caso di carico inquinante eccessivo. Questo fenomeno può essere considerato come un processo di purificazione biologica nell'ambiente interstiziale; i metazoi infatti rimuovono materiale biogenico tramite l'ingestione, contribuendo così alla depurazione dell'acqua da un eccesso di sostanza particellata sospesa e migliorando la capacità di assorbimento del sedimento.

PLENET *et al.* (1992) riportano le osservazioni su alcuni organismi interstiziali esposti a diverse concentrazioni di metalli pesanti presenti nel sedimento; dai dati ottenuti è risultato che gli organismi stigobionti sono in grado di accumulare una certa quantità di metalli pesanti all'interno del loro corpo, contribuendo così alla rimozione ed al riciclo di tali elementi nell'ambiente acquatico ipogeo.

La capacità degli organismi sotterranei di accumulare metalli sembra dipendere da diversi fattori quali la longevità, la stretta associazione con gli spazi interstiziali all'interno del sedimento (tigmotattismo) e l'alimentazione detritivora; per tutte queste caratteristiche, gli stigobionti possono essere considerati potenziali "sentinelle" dell'inquinamento da metalli pesanti disciolti lungo la colonna d'acqua e nelle zone profonde.

Gli indicatori più utili nella parte superiore delle falde sono risultati i Chironomidi ed i Tubificidi (LAFONT e DURBEC, 1990; DURBEC e LAFONT, 1991). Sono stati identificati sei gruppi di specie che sembrano correlati a contaminanti specifici; i raggruppamenti di specie sono stati creati in base al valore di Carbonio



organico presente nel sedimento (disponibilità trofica) e alla concentrazione dei metalli pesanti (grado di inquinamento) (LANG e LANG DOHL, 1979 in GIBERT, 1989).

Gli indicatori biologici sono utili anche per studi ecologici retrospettivi: i resti fossili di Chironomidi, Chaoboridi e Ceratopogonidi reperibili nei sedimenti sono considerati validi indicatori paleolimnologici nello studio della storia dell'inquinamento dei laghi durante i secoli XIX e XX (GIBERT, 1989).

Nello studio dello stato di salute dell'ambiente sotterraneo è necessario conoscere sia il numero di specie bioindicatrici sia il numero di individui per ogni singola specie poiché anche l'aspetto quantitativo è importante per stabilire le condizioni ambientali del sistema stesso.

Secondo DANIELOPOL *et al.* (1992) esiste una correlazione diretta tra la concentrazione di ossigeno nelle acque sotterranee e l'abbondanza e diversità della fauna ipogea, per cui gli stigobionti possono essere usati come bioindicatori nella valutazione del grado di ossigenazione di ambienti sotterranei.

LAFONT & DURBEC (1990) hanno osservato le modificazioni delle acque sotterranee in seguito all'apporto di acque superficiali inquinate, attraverso l'analisi delle popolazioni di Oligocheti presenti nel substrato; gli agenti inquinanti di origine industriale possono provocare simultaneamente l'eliminazione delle diverse specie di organismi (effetto letale) e la migrazione dai loro siti per sfuggire ai tossici. Le indagini biologiche condotte sull'abbondanza e sul comportamento di alcuni invertebrati bentonici (DURBEC & LAFONT, 1991) hanno confermato interazioni tra acque sotterranee e superficiali; questo scambio reciproco acqua sotterranea-acqua superficiale potrebbe forse favorire anche la diffusione di elementi inquinanti.

PLENET e GIBERT (1993) hanno condotto una ricerca sulla presenza di inquinanti metallici nell'interfaccia sistema acquatico superficiale-interstiziale, basandosi sullo studio di bioindicatori e sulla valutazione della composizione e della struttura delle popolazioni. In generale, le specie ipogee sono risultate meno sensibili rispetto a quelle epigee; in particolare, sembra che alcune specie sotterranee accumulino talvolta una maggiore quantità di metalli pesanti rispetto alle concentrazioni presenti nel sedimento, mostrando quindi un effettivo bioaccumulo dei metalli stessi; tali

organismi potrebbero essere utili come indicatori nella valutazione di contaminazione da metalli, sia dal punto di vista diagnostico sia nella gestione della qualità dell'acqua.

MALARD *et al.* (1994), studiando le popolazioni ipogee di un corso d'acqua soggetto a scarichi fognari, hanno osservato una distribuzione spazio-temporale strettamente correlata al flusso delle acque provenienti dal sistema di scarico; durante i periodi di magra, caratterizzati da un basso apporto di acqua pulita e un alto tasso di acque di scarico, la comunità sotterranea era dominata da organismi epigei che colonizzavano la maggior parte degli interstizi; al contrario, durante i periodi di intenso apporto e ricambio delle acque sotterranee, gli organismi epigei trascinati a valle erano sostituiti da fauna sotterranea, che ricolonizzava l'habitat interstiziale. Gli organismi stigobionti risultavano quindi sensibili a fattori di alterazione delle acque. Dai dati ottenuti, gli Autori suggeriscono che gli invertebrati sotterranei possono essere usati come indicatori dello stato di salute dei sistemi ipogei e di eventuali fenomeni di contaminazione, in quanto le variazioni nella qualità delle acque sotterranee influiscono direttamente sulla struttura delle popolazioni ipogee.

## BIBLIOGRAFIA

BAKALOWICZ M., 1986. De l'hydrogéochimie en karstologie. *Journées sur le karst en Euskadi, Donostia-San Sebastian*, 2: 105-129.

BRUYÈRE E., TURQUIN M.J., REYGROBELLET J.L., 1993. Le tracage biologique, une nouvelle approche du milieu souterrain aquatique. *C.R.Acad.Sci. Paris*, 317 (Série II): 479-485.

- CREUZÉ DES CHATELLIERS M., 1991. Geomorphological processes and discontinuities in the macrodistribution of the interstitial fauna. A working hypothesis. *Vehr.Internat.Verein.Limnol.*, **24**: 1609-1612.
- CREUZÉ DES CHATELLIERS M., REYGROBELLET J.L., 1990. Interactions between geomorphological processes, benthic and iporheic communities: first results on a by-passed canal of the French upper Rhone River. *Regulated rivers: Research and Management*, **5**: 139-158.
- CREUZÉ DES CHATELLIERS M., DOLE-OLIVIER M.J., 1991. Limites d'utilisation du sondage de type Bou-Rouch pour la capture de la faune interstitielle. (I) tracage chimique au chlorure de sodium. *C.R.Acad.Sci. Paris*, **312** (Série III): 671-676.
- CREUZÉ DES CHATELLIERS M., POINSART D., 1991. Caractéristiques des aquifères alluviaux et diversité faunistique du sous-écoulement du Rhone. *Hydrogéologie*, **3**: 201-215.
- CREUZÉ DES CHATELLIERS M., TURQUIN M.J., GIBERT J., 1991. Les aquifères: des systèmes biologiques. *Hydrogéologie*, **3**: 163-185.
- CREUZÉ DES CHATELLIERS M., MARMONIER P., 1993. Ecology of benthic and interstitial ostracods of the Rhone River, France. *Journal of Crustacean Biology*, **13** (2): 268-279.
- DANIELOPOL D.L., ROUCH R., 1991. L'adaptation des organismes au milieu aquatique souterrain. Réflexions sur l'apport des recherches écologiques récentes. *Stygologia*, **6** (3): 129-142.
- DANIELOPOL D.L., DREHER J., GUNATILAKA A., KAISER M., NIEDERREITER R., POSPISIL P., CREUZÉ DES CHATELLIERS M., RICHTER A., 1992. Ecology of organisms living in a hypoxic groundwater environment at Vienna (Austria); methodological questions and preliminary results. *U.S. Environmental Protection Agency American Water Resources Association*, April: 79-90.
- DOLE-OLIVIER M.J., CREUZÉ DES CHATELLIERS M., MARMONIER P., 1993. Repeated gradients in subterranean landscape - Example of the stygofauna in the alluvial floodplain of the Rhone River (France). *Arch.Hydrobiol.*, **127** (4): 451-471.
- DURBEC A., LAFONT M., 1991. Sensibilité à la pollution des zones de captage en site alluvial. *Informations Techniques du CEMA-GREF*, **83** (4): 1-8.
- ESSAFI K., MATHIEU J., LEGAY J.M., 1991. Asymmetries and locomotor behaviour for *Niphargus* (stygoibiont amphipod). *Stygologia*, **6** (2): 91-95.
- ESSAFI K., MATHIEU J., BEFFY J.L., 1992. Spatial and temporal variations of *Niphargus* populations in interstitial aquatic habitat at the karst/floodplain interface. *Regulated rivers: Research and Management*, **7**: 83-92.
- GIBERT J., 1989. The role of fauna in contaminated aquifers. *Scope Workshop on Groundwater Contamination-Stanford University (July 27-28)*: 1-6.
- GIBERT J., 1990. Behavior of aquifers concerning contaminants: differential permeability and importance of the different purification processes. *Wat.Sci.Tech.*, **22** (6): 101-108.
- GIBERT J., 1991. Les écotones souterrains/superficiels: des zones d'échanges entre environnements souterrain et de surface. *Hydrogéologie*, **3**: 233-240.
- GIBERT J., DOLE-OLIVIER M.J., MARMONIER P., VERVIER P., 1990. Surface water-underwater ecotones. In: "Ecology and Management of aerobic-terrestrial Ecotones." R.J. Nainan et H. Decamps, Pastenon Publ., London: 199-225.
- GIBERT J., MARMONIER P., TURQUIN M.J., MARTIN D., 1991. Anthropogenic disturbance of surface landscape: consequences on groundwater ecosystems. In: "Terrestrial and aquatic ecosystems: perturbation and recovery." O. Ravera, Ellis Horwood Limited, 613 pp.: 310-319.
- LAFONT M., DURBEC A., 1990. Essai de description biologique des interactions entre eau de surface et eau souterraine: vulnérabilité d'un aquifère à la pollution d'un fleuve. *Annls Limnol.*, **26** (2-3): 119-129.
- MALARD F., REYGROBELLET J.L., MATHIEU J., LAFONT M., 1994. The use of invertebrate communities to describe groundwater flow and contaminant transport in a fractured rock aquifer. *Arch.Hydrobiol.*, **131** (1): 93-110.
- MANGIN A., 1985. Progrès récents dans l'étude hydrogéologique des karsts. *Stygologia*, **1** (3): 239-257.
- MANGIN A., 1986. Reflexion sur l'approche et la modelisation des aquifères karstiques. *Journées sur le karst en Euskadi, Donostia-San Sebastian 1986*: 11-30.
- MARMONIER P., WARD J., 1990. Superficial and interstitial Ostracoda of the South Platte River (Colorado, U.S.A.) - Systematics and biogeography. *Stygologia*, **5** (4): 225-239.
- MARMONIER P., 1991. Effect of alluvial shift on the spatial distribution of interstitial fauna. *Vehr.Internat.Verein.Limnol.*, **24**: 1613-1616.
- MARMONIER P., CREUZÉ DES CHATELLIERS M., 1991. Effects of spates on interstitial assemblages of the Rhone River. Importance of spatial heterogeneity. *Hydrobiologia*, **210**: 243-251.
- MARMONIER P., CREUZÉ DES CHATELLIERS M., 1992. Biogeography of the benthic and interstitial living ostracods (Crustacea) of the Rhone River (France). *Journal of Biogeography*, **19**: 693-704.
- MARMONIER P., DOLE-OLIVIER M.J., CREUZÉ DES CHATELLIERS M., 1992. Spatial distribution of interstitial assemblages in the floodplain of the Rhone River. *Regulated Rivers: Research and Management*, **7**: 75-82.
- MARMONIER P., VERVIER P., GIBERT J., DOLE-OLIVIER M.J., 1993. Biodiversity in Ground Waters. *Reviews in Ecology and Evolution*, **8** (11): 392-395.
- MATHIEU J., ESSAFI K., 1991. Variations des effectifs de populations interstitielles de *Niphargus* (Amphipodes stygobies) à l'interface karst/plaine alluviale. *C.R.Acad.Sci. Paris*, **312** (Série III): 489-494.
- MATHIEU J., MARMONIER P., LAURENT R., MARTIN D., 1991. Réculte du matériel biologique aquatique souterrain et stratégie d'écha-

tillonnage. *Hydrogéologie*, **3**: 187-200.

MATHIEU J., ESSAFI-CHERGUI K., CULVER D.C., 1992. Variations in the structure of stygobiont crustacean populations (*Niphargus rhenorhodanensis* and *Proasellus valdensis*) within the sediments of a karst outflow. *Hydrobiologia*, **231**: 41-49.

P.I.R.EN. (Programme Interdisciplinaire de la Recherche "Environnement"), 1990. Recherche et Environnement. Colloque. Eaux souterraines - comptes rendus. 17 et 18 décembre 1990, Forum la Part - Dieu, Lyon.

PLENET S., GIBERT J., VERVIER P., 1992. A floodplain spring: an ecotone between surface water and groundwater. *Regulated rivers: Research and Management*, **7**: 93-102.

PLENET S., MARMONIER P., GIBERT J., STANFORD J.A., BODERGAT A.M., SCHMIDT C.M., 1992. Groundwater hazard evaluation: a perspective for the use of interstitial and benthic invertebrates as sentinels of aquifer metallic contamination. *First international conference on ground water ecology. U.S. Environmental Protection Agency American Water Resources Association*, 319-329.

PLENET S., GIBERT J., 1993. Etude du devenir des pollutions métalliques à l'interface cours d'eau/nappe alluviale. *Travaux de l'équipe "Hydrobiologie et Ecologie des Eaux Souterraines"*. U.A. CNRS 1451 - *Ecologie des Eaux Douces et des Grands Fleuves*.

ROUCH R., 1977. Considérations sur l'Ecosystème karstique. *C.R.Acad.Sc. Paris*, **284**: 1101-1103.

ROUCH R., DANIELOPOL D.L., 1987. L'origine de la faune aquatique souterraine, entre le paradigme du refuge et le modèle de la colonisation active. *Stygologia*, **3** (4): 345-372.

SCHMIDT C.M., MARMONIER P., PLENET S., CREUZÉ DES CHATELLIERS M., GIBERT J., 1991. Bank filtration and interstitial communities. Example of the Rhone River in a polluted sector (downstream of Lyon, Grand-Gravier, France). *Hydrogéologie*, **3**: 217-233.

TURQUIN M.J., 1981. Profil démographique et environnement chez une population de *Niphargus virei* (Amphipode troglobie). *Extrait du Bulletin de la Société Zoologique de France*, **106**: 457-466.

## ERRATA CORRIGE al n° 2/3

*Nell'articolo di Massimo Morpurgo "Descrizione sintetica del Saprobienindex" pubblicato sul numero 2/3 di Biologia Ambientale sono sfuggiti alcuni errori tipografici; ce ne scusiamo con i lettori e con l'Autore.*

**A pagina 19** le due formule corrette sono:

$$S = \frac{\sum s_i \cdot A_i \cdot G_i}{\sum A_i \cdot G_i}$$

$$SM = \pm \sqrt{\frac{\sum (s_i - S)^2 \cdot A_i \cdot G_i}{(n - 1) \cdot \sum A_i \cdot G_i}}$$

**A pagina 23**, nel riferimento bibliografico dell'appendice, è stato omissso l'Autore (FRIEDRICH, 1990).