DIVERSITE TAXONOMIQUE ET STRUCTURE DES COMMUNAUTES D'HETEROPTERES AQUATIQUES (HETEROPTERA) DU BASSIN VERSANT DE LA MEDJERDA (TUNISIE SEPTENTRIONALE)

Noura SLIMANI[1*], Jean THIOULOUSE[2], Malika TRABELSI-AYADI[1], Kais NAHDI[1], Moncef BOUMAÏZA[1]

[1]*Université de Carthage. Faculté des Sciences de Bizerte. LR05ES09 Laboratoire des applications de la chimie aux ressources et substances naturelles et à l' environnement (LACREsNE),7021, Bizerte, Tunisia.*
[2]*Université de Lyon, 69000 Lyon, Université Lyon 1, CNRS, UMR 5558, Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, 69622 Villeurbanne Cedex, France*
**Corresponding author:* noura.slimani@laposte.net

Reçu le 06-07-2025, Accepté le 10-08-2025

Résumé

Les hétéroptères aquatiques ont été étudiés dans 11 stations du bassin versant de la Medjerda : quatre stations du cours principal et sept stations de ses affluents au cours des quatre saisons de l'année 2013. Au total, 18 espèces ont été recensées. Les relations entre les caractéristiques de l'habitat et la structure de la communauté d'hétéroptères aquatiques dans l'espace et dans le temps ont été analysées à l'aide de la méthode d'ordination de K tableaux COSTATIS. La température, l'oxygène dissous, la salinité et la vitesse d'écoulement sont les principaux paramètres structurant les peuplements des hétéroptères aquatiques et influençant l'abondance et la richesse des espèces.

Mots clés : Hétéroptères aquatiques / Ecologie / COSTATIS / Medjerda / Tunisie.

Introduction :

Par sa position géographique en Méditerranée centrale, l'un des 25 points chauds de la biodiversité mondiale, la Tunisie présente une biodiversité biologique et écologique élevée [1]. La préservation, la conservation de la biodiversité et la gestion des services éco-systémiques requiert une bonne connaissance de la communauté aquatique et de son rôle au sein de l'écosystème [2]. En effet, les macro-invertébrés aquatiques sont une composante importante de la faune aquatique et jouent un rôle important dans les réseaux trophiques, ainsi que dans la production et la stabilité des écosystèmes [3,4]. Les macro-invertébrés benthiques présentent l'avantage d'être dominants, en termes de biomasse et de richesse spécifique, et de répondre rapidement aux stress et de constituer un des premiers maillons de la chaîne alimentaire des cours d'eau. De plus, ils sont des indicateurs de

changement fonctionnel [5]. Toutes ces qualités valent aux macro-invertébrés benthiques de constituer un groupe clé d'intérêt majeur pour la biosurveillance et la conservation biologique de l'écosystème [6]. Ainsi, compte tenu de leur diversité, de leur abondance, de leur présence dans divers types de plans d'eau, de la spécialisation de leur habitat et de leur sensibilité aux polluants, les hétéroptères aquatiques jouent un rôle important, aussi bien économique, écologique qu'environnemental [7,8,9]. De toute évidence, la taxonomie et l'écologie qui façonnent les assemblages d'espèces d'invertébrés aquatiques constituent un outil efficace et recommandé pour la gestion et la conservation des zones protégées. Ceci est essentiel de nos jours étant donné qu'ils peuvent fournir des services écologiques nécessaires au développement social [10,11].

Contrairement aux flores et aux vertébrés supérieurs qui sont relativement mieux connus et disposent de registres des espèces signalées des différentes aires protégées [12], les invertébrés ne suscitent pas l'intérêt de conservation, bien qu'ils constituent près de 95% des espèces du règne animal [13]. Parmi les insectes, les connaissances sur la systématique, la biodiversité et la biologie du sous-ordre des hétéroptères ont également progressé au cours des 50 dernières années. Ils constituent un groupe diversifié dans les écosystèmes aquatiques, composé de trois infraordres : Leptopodomorpha, Gerromorpha et Nepomorpha représentés par 20 familles, 326 genres et 4656 espèces [14]. La biodiversité et les contraintes taxonomiques des punaises sont évaluées à l'aide des méthodes statistiques dites multi-tableaux. Les caractéristiques principales de la biologie et de l'écologie sont abordées, en mettant l'accent sur les changements environnementaux associés à l'émergence de nouvelles niches aquatiques, les besoins en matière d'habitat et les préférences alimentaires. Ces aspects sont analysés en s'appuyant sur la littérature récente dans le domaine de la statistique exploratoire multidimensionnelle appliquée à l'écologie. Pour combler les lacunes encore existantes, un suivi écologique de la communauté d'hétéroptères aquatiques permet d'établir un état de référence pour ces peuplements et d'identifier les facteurs environnementaux régissant la structure et le fonctionnement de l'écosystème dulcicole du nord tunisien, en particulier dans le bassin versant de la Medjerda et ses affluents.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Milieu d'étude

Le bassin versant de la Medjerda, l'un des principaux bassins versants en Afrique du Nord (Figure 1), s'étend sur une superficie d'environ 23 500 km² dont 7 600 km² sont situés en Algérie [15]. Le cours d'eau principal prend sa source à 1317 m d'altitude dans la région de Ras El Alia au Nord Est de l'Algérie et coule ensuite vers l'Est jusqu'à la Tunisie puis pénètre dans le golfe de Tunis. Le fleuve fait partie de l'étage bioclimatique semi-aride supérieur typique du climat méditerranéen, caractérisé par des hivers doux et pluvieux et des étés chauds. Les prospections sur le terrain se sont déroulées saisonnièrement durant l'année 2013 et ont concerné 11 stations. Les coordonnées GPS et les altitudes des stations d'étude figurent dans le tableau 1.

Les mesures des paramètres physico-chimiques (température de l'eau (TE), conductivité électrique (CE), taux d'oxygène dissous (OXY), salinité (S), pH) ont été effectuées « in situ » à chaque station à l'aide d'un potentiomètre/sonde (WTW Inolab, MPP350). La vitesse du courant (VC) a été calculée par le temps mis par un flotteur (bouchon de liège) pour parcourir une distance minimale d'un mètre. La turbidité (TUR) a été mesurée au labo en utilisant un turbidimètre (HACH model 2100A).

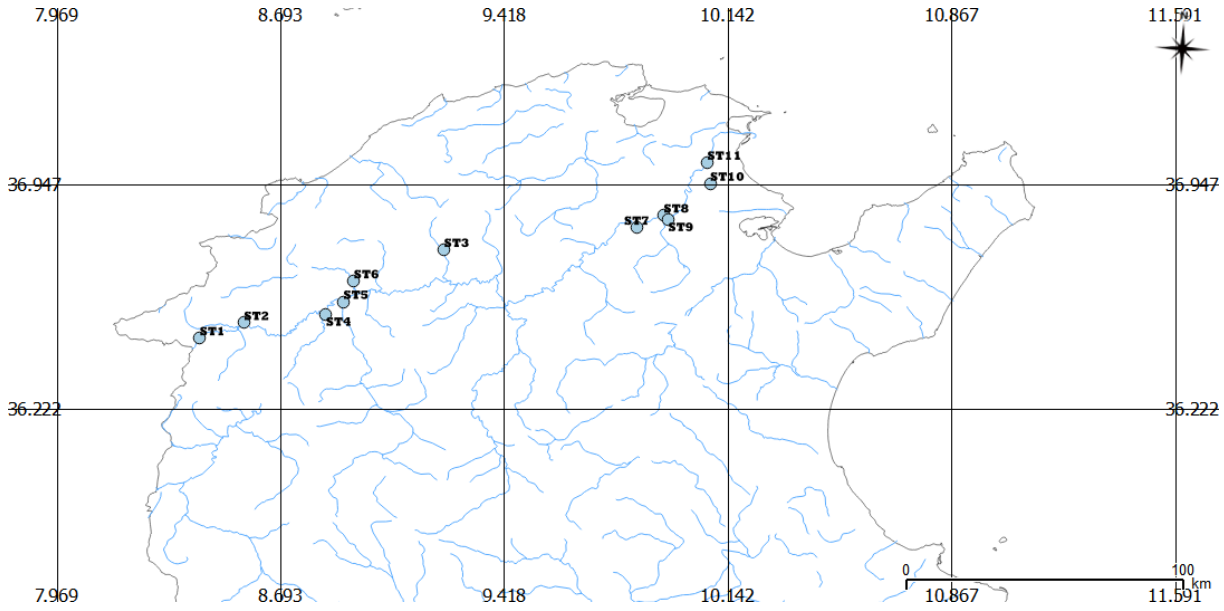


Figure 1. Localisation des sites d'étude dans le bassin versant de la Medjerda

Tableau 1 : Localisation et caractéristiques des stations d'étude.

Code station	Station	Typologie	ALT (m)	Cordonnées GPS
ST1	Medjerda à Ghardimaou	Cours principal	197	36°27'01.87"N ; 08°26'01.56"E
ST2	Chemtou	affluent sud	173	36°30'00.38"N ; 08°34'33.23"E
ST3	Béja	affluent nord	147	36°44'11.04"N ; 09°13'25.15"E
ST4	Mellègue	affluent sud	136	36°31'42.18"N ; 08°50'28.93"E
ST5	Bouhertma	Affluent nord	131	36°38'05.44"N ; 08°55'53.35"E
ST6	Tessa	Affluent sud	127	36°34'05.91"N ; 08°53'51.98"E
ST7	Medjerda à Batan	Cours principal	24	36°48'29.99"N ; 09°50'53.43"E
ST8	Medjerda à Djedeida	Cours principal	23	36°50'52.00"N ; 09°56'05.03"E
ST9	Chafrou	Affluent sud	18	36°4'54.67"N ; 09°56'54.62"E
ST10	Khlaidia	affluent sud	6	36°57'02.71"N ; 10°05'06.72"E
ST11	Medjerda à Kalaat El Andalous	Cours principal	3	37°01'07.45"N ; 10°04'33.27"E

2.2. Echantillonnage et analyse des données

L'échantillonnage des hétéroptères aquatiques a été effectué à quatre occasions lors des quatre saisons : printemps (février), été (mai), automne (septembre) et hiver (décembre) durant l'année 2013, à l'aide d'un filet troubleau ou D-net de 300µm de vide de maille, muni d'un collecteur permettant de minimiser la détérioration des organismes. Les échantillons ramassés sont fixés in situ dans des bocaux en plastique renfermant de l'alcool 95°. Au laboratoire, ils sont d'abord lavés sur un tamis à maille égale à 0.3 mm dans le but de les débarrasser des gros débris organiques ou inorganiques. Les animaux ont été identifiés, jusqu'au rang de l'espèce, sous une loupe binoculaire à l'aide de plusieurs clés de détermination [16,17,18] puis conservés définitivement dans des petits flacons en verre contenant de l'alcool à 70°.

La structure des communautés d'hétéroptères a été caractérisée par leur densité (ind/m²), leur abondance relative (Pi) et par trois indices de diversité qui sont la richesse spécifique, l'indice de diversité de Shannon-Wiener H' [19] et l'indice de Pielou ou équitabilité J' [20] qui permet de rapporter la diversité observée à la diversité totale.

Afin d'étudier l'évolution des relations espèces-variables dans le temps et de caractériser la typologie des stations étudiées en fonction de cette évolution temporelle, une méthode d'analyses multi-tableaux appelée COSTATIS a été réalisée à l'aide du logiciel R [21]. Cette méthode [22] est basée sur l'analyse de co-inertie des deux tableaux de compromis obtenus par l'analyse triadique partielle des deux séries de tableaux (une série de tableaux des

paramètres physico-chimiques et une série de tableaux faunistiques). Chaque série de tableaux fourni un tableau compromis, exprimant un résumé de la structure des tableaux individuels. L'analyse de co-inertie finale permet d'étudier la façon dont ces deux tableaux compromis varient simultanément. Elle est basée sur l'analyse des covariances entre l'abondance des espèces et les valeurs des variables abiotiques du milieu. L'analyse COSTATIS permet donc d'étudier la façon dont les relations espèces-environnement évoluent au cours du temps, grâce à l'analyse simultanée de données tri-dimensionnelles : tableau faunistique× tableau des paramètres physico-chimiques × quatre saisons.

3. Résultats

3.1. Paramètres physico-chimiques

Les valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques dans les 11 stations prospectées sont consignées dans le tableau 2 pour les quatre saisons. Le pH était généralement alcalin (entre 7.5 et 7.9). La minéralisation (CE entre 2.8 et 3.6 mS/cm) et la salinité (S entre 1.4 et 1.9 PSU) étaient relativement fortes. La température variait de 10 °C en hiver à 25°C en été.

Tableau 2. Caractéristiques physico-chimiques (valeurs moyennes et écarts types) des stations du cours principal de la Medjerda et de ses affluents (H= hiver; P= printemps; E= été; A= automne)

	Cours principal de la Medjerda				Affluents de la Medjerda			
	H	P	E	A	H	P	E	A
pH	8±0.2	7.8±0.1	7.6±0.2	7.8±0.1	7.8±0.2	7.75±0.1	7.5±0.2	7. 8±0.3
S (PSU)	2±1.1	1.8±0.5	1.5±0.7	1.74±1	1.6±1.4	1.9±1.1	1.6±1	1.5±1.3
CE (mS/cm)	3.3±1.4	3.6±1	2.8±1.2	3.4±1.6	2.8±2.1	3.65±2	3.1±1.7	3±2.2
OXY (mg/l)	6.5±1	4.9±0.6	5. 6±0.3	9.5±0.3	7.12±1	5.43±1.1	5.2±0.6	9.4±0.3
TUR (NTU)	20.8±5	2.5±1	4.4±1.7	14±8.73	21±6.3	7.50±9.2	8.8±1.7	17.4±8
TE (°C)	11±1.5	20±2.5	25±2	11±0.8	11±1.4	18.49±0.8	24.3±1	10±0.6
VC (cm/s)	36±13	27.1±10	25±6	43±19.7	30±8.8	21.14±6.1	20.3±5	43.5±13

3.2. Structure de la communauté des hétéroptères aquatiques

L'analyse de plus de 2121 individus a permis de mettre en évidence 18 espèces d'hétéroptères aquatiques, réparties en 11 genres et 8 familles. Ces individus, échantillonnés dans les 11 sites étudiés (tableau 3), représentaient 40% des espèces

d'hétéroptères peuplant l'ensemble du territoire tunisien [23,24,25,26,27]. Ce pourcentage illustrait la forte diversité de ces arthropodes dans ce réseau hydrographique. Parmi ces espèces, *Micronecta scholtzi* (55.30 %) et *Aquarius cinereus* (25.69 %) dominaient largement les assemblages, suivies mais avec des pourcentages beaucoup plus faibles par *Naucoris maculatus conspersus* (4.66 %), *Hydrometra stagnorum* (3.48 %) et *Notonecta maculata* (2.12 %). Quatre espèces : *Corixa affinis*, *Sigara stagnalis stagnalis*, *Gerris brasili* et *Gerris thoracicus* étaient très fréquentes mais nettement moins abondantes (<1 %) (Tableau 3).

La richesse spécifique saisonnière variait de 12 à 18 espèces, tandis que les densités saisonnières moyennes, variaient de 2100 à 7933.33 individus/m^2 (moyenne = 4495,83 ± 2665,073 individus/m^2) (Figure 2). Ces deux indices, les plus élevés en période printemps-été (richesse spécifique jusqu'à 9 et 10 au printemps), régressent fortement en hiver-automne (richesse spécifique généralement entre 1 et 2 en automne) (Tableau 4) en rapport avec la variation des paramètres abiotiques comme la vitesse du courant, la minéralisation et le niveau thermique des eaux.

L'indice de diversité de Shannon varie de 1,32 bits/individu au niveau du cours d'eau principal à 0,24 bits/individu dans les affluents. Sur le plan temporel, cet indice varie entre 1,6 bits/individu en été et 1,28 bits/individu en hiver. Comme pour l'indice de diversité, l'équitabilité est plus forte (0,66) aux sites du cours principal et nettement plus faible (0,15) aux sites des affluents.

3.3. Facteurs de variabilité spatiale

Les deux premiers axes de l'analyse de co-inertie globale réalisée entre les ACP faune et paramètres environnementaux absorbent 75,80 % de l'inertie totale (respectivement 54,68% et 21,12 % pour le premier et le second axe). Par conséquent, seuls les deux premiers sont conservés pour l'interprétation des analyses (Tableaux 5, 6). Les coefficients de corrélation entre les deux premiers axes de l'analyse de co-inertie et entre les deux seconds sont respectivement de 0,81 et 0,95.

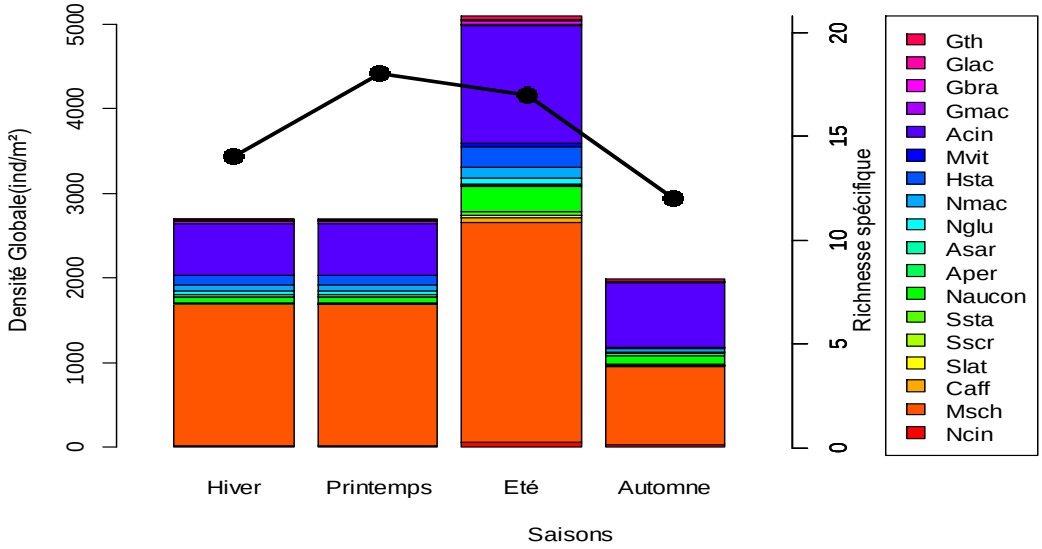


Figure 2. Variation temporelle de la densité globale spécifique des Hétéroptères aquatiques et de la richesse spécifique au cours de la période d'étude (les codes des noms d'espèces sont définis dans le tableau 3).

Les valeurs des covariances entre les espèces et les paramètres physico-chimiques (Figure 3) montrent une typologie des hétéroptères en rapport avec leur distribution longitudinale dans les cours d'eau, ceux peuplant les sites à salinité et conductivité électrique fortes mais avec une vitesse du courant faible (gros carrés blancs) : *Sigara stagnalis* (Ssta), *Naucoris maculatus conspersus* (Naucon), *Sigara lateralis* (Slat), *Gerris lacustris* (Glac), *Notonecta glauca* (Nglu), *Notonecta maculata* (Nmac), *Gerris maculatus* (Gmac), *Gerris brasili* (Gbra), *Nepa cinerea* (Ncin), et ceux à plus large valence écologique des eaux à conductivité faible et vitesse du courant importante : *Aquarius cinereus* (Acin), *Hydrometra stagnorum* (Hsta), *Corixa affinis* (Caff), *Anisops sardeus sardeus* (Asar), *Gerris thoracicus* (Gth), *Mesovelia vittigera* (Mvit), *Anisops debilis perplexus* (Aper), *Micronecta scholtzi* (Msch), *Sigara scripta* (Sscr). Cette structure peut être mise en relation avec le gradient de variation amont-aval touchant certains paramètres physico-chimiques du milieu notamment la minéralisation des eaux et la vitesse du courant.

Tableau 3. Les effectifs, la densité globale moyenne (ind/m^2) et l'abondance relative (%) des hétéroptères aquatiques identifiés dans les stations du cours principal et des affluents nord et sud de l'oued Medjerda durant les quatre saisons. H= hiver; P= printemps; E= été; A= automne

Infra-ordre	Familles	Espèces	Abr	Cours principal de l'oued Medjerda				Affluents nord et sud de l'oued Medjerda				Densité Globale (ind/m^2)	AR (%)
				H	P	E	A	H	P	E	A		
Nepomorpha	Nepidae	*Nepa cinerea*	Ncin	2	6	5	2	0	8	2	2	225	1.27
	Micronectidae	*Micronecta scholtzi*	Msch	84	131	148	45	116	420	164	65	9775	**55.3**
	Corixidae	*Corixa affinis*	Caff	0	0	0	0	1	2	6	1	83.33	0.47
		Sigara lateralis	Slat	0	1	0	0	0	1	3	0	41.67	0.23
		Sigara scripta	Sscr	0	4	0	0	0	0	0	0	33.33	0.18
		Sigara stagnalis stagnalis	Ssta	0	0	0	0	2	3	5	2	100	0.57
	Naucoridae	*Naucoris maculatus conspersus*	Naucon	5	14	12	5	3	27	25	8	825	4.67
	Notonectidae	*Anisops debilis perplexus*	Aper	0	1	0	3	0	0	1	0	41.67	0.24
		Anisops sardeus sardeus	Asar	0	0	1	0	3	3	1	2	83.33	0.48
		Notonecta glauca glauca	Nglu	6	7	7	0	0	1	2	0	191.67	1.08
		Notonecta maculata	Nmac	7	11	10	4	0	7	5	1	375	2.13
Gerromorpha	Hydrometridae	*Hydrometra stagnorum*	Hsta	7	10	16	1	8	19	12	1	616.67	3.48
	Mesoveliidae	*Mesovelia vittigera*	Mvit	0	0	0	0	0	2	6	0	66.67	0.38
	Gerridae	*Aquarius cinereus*	Acin	36	92	77	44	36	123	89	48	4541.67	25.7
		Gerris maculatus	Gmac	3	10	2	0	1	5	0	0	175	0.99
		Gerris brasili	Gbra	1	6	4	0	0	3	2	1	141.67	0.81
		Gerris lacustris	Glac	1	19	1	0	0	2	0	0	191.67	1.08
		Gerris thoracicus	Gth	1	5	0	0	0	6	5	3	166.67	0.94
Total	8	18		155	319	301	116	170	633	328	136	17675	100

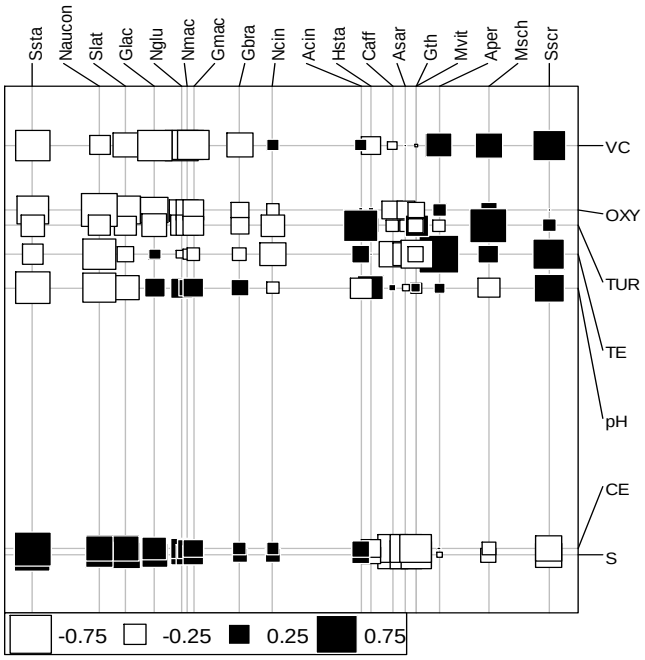


Figure 3. Résultats de l'analyse de co-inertie globale décrivant la co-structure entre les ACP faune et variables environnementales pour le peuplement des hétéroptères aquatiques défini par les axes 1 et 2 de l'analyse. La taille des carrés est proportionnelle à la valeur absolue de la covariance entre les variables du milieu et les espèces d'hétéroptères, avec des carrés noirs pour les covariances positives (l'abondance de l'espèce augmente avec la valeur de la variable du milieu) et des carrés blancs pour les covariances négatives (l'abondance de l'espèce diminue avec la valeur de la variable du milieu). La position des espèces et des variables est donnée par leur coordonnée sur le premier axe de l'analyse de co-inertie, ce qui maximise la corrélation sur cette représentation graphique.

3.4. Dynamique spatio-temporelle du peuplement des hétéroptères en fonction des paramètres environnementaux

Il paraît, clair que la majeure partie de la variation dans la composition spécifique était liée aux différences des paramètres environnementaux, assez bien représentées par le premier axe de l'analyse de co-inertie (Figure 3). En effet, l'analyse COSTATIS a permis de constituer trois groupes d'espèces en fonction de leurs préférences environnementales (Figure 4).

Ces groupes d'espèces sont positivement corrélés aux paramètres environnementaux et ils sont précisés sur la figure 5, qui correspond à l'interaction espace-temps : elle montre la projection des lignes (4 dates pour chaque site d'échantillonnage) des deux séries de tableaux, superposée avec les variables physico-chimiques (Figure 5a) et les espèces de punaises d'eau (Figure 5B).

Tableau 4. Diversité des peuplements des hétéroptères aquatiques dans les stations du cours principal et des affluents nord et sud de l'oued Medjerda (Hiver-Printemps-Eté- Automne 2013). RT : Richesse Taxonomique ; N : Effectif total ; H' : indice de diversité de Shannon - Wiener (en bits) ; J' : Equitabilité

	RT	RT saisonnière				N	H' (bits)	J'
		H	P	E	A			
ST1	7	4	6	4	1	194	0.99	0.35
ST2	4	0	1	4	2	87	0.52	0.26
ST3	5	0	5	3	1	83	1.12	0.48
ST4	9	4	7	8	3	191	1.31	0.41
ST5	9	3	7	8	4	200	1.41	0.44
ST6	5	2	4	4	2	385	0.82	0.35
ST7	9	4	6	6	3	383	0.92	0.29
ST8	5	2	4	4	2	57	1.21	0.52
ST9	9	0	9	2	2	261	1.17	0.37
ST10	4	3	3	4	2	57	1.35	0.67
ST11	10	6	10	8	4	223	1.93	0.58

Tableau 5. Coefficients de corrélation entre les variables environnementales et les deux premiers axes des analyses de co-inertie.

	Codes	Comp1	Comp2
pH	pH	0.549	0.170
Salinité	S	-1.252	-0.650
Conductivité électrique	CE	-1.214	-0.687
Oxygène dissous	OXY	0.874	-0.366
Turbidité	TUR	0.620	-0.367
Température de l'eau	TE	0.677	-0.963
Vitesse du courant	VC	1.247	-0.433

Tableau 6. Coefficients de corrélation entre les espèces et les deux premiers axes des analyses de co-inertie

Espèces	Codes	axe 1	axe 2
Nepa cinerea	Ncin	-0.297	0.136
Micronecta scholtzi	Msch	0.481	-0.300
Corixa affinis	Caff	0.2160	0.696
Sigara lateralis	Slat	-0.846	-0.002
Sigara scripta	Sscr	0.824	-0.132
Sigara stagnalis stagnalis	Ssta	-1.224	-0.123
Naucoris maculatus conspersus	Naucon	-0.966	0.068
Anisops debilis perplexus	Aper	0.561	-0.554
Anisops sardeus sardeus	Asar	0.252	0.666
Notonecta glauca glauca	Nglu	-0.599	0.111
Notonecta maculata	Nmac	-0.597	0.100
Hydrometra stagnorum	Hsta	0.192	0.293
Mesovelia vittigera	Mvit	0.265	0.614
Aquarius cinereus	Acin	-0.255	-0.438
Gerris maculatus	Gmac	-0.535	0.150
Gerris brasili	Gbra	-0.400	0.160
Gerris lacustris	Glac	-0.705	0.002
Gerris thoracicus	Gth	0.316	0.446

Pour chaque site d'échantillonnage (noté de 1 à 11), les 4 points correspondants aux 4 dates d'échantillonnage saisonnières (hiver, printemps, été, automne) sont regroupées dans une enveloppe convexe grisée. Cette figure montre l'importance relative des structures spatiales et temporelles dans les variables environnementales et dans la répartition des espèces d'hétéroptères aquatiques.

Le groupe S1 composé de *M. scholtzi* (Msch), *A. debilis perplexus* (Aper), *S. scripta* (Sscr), et *A. cinereus* (Acin) (figure 5B) est positivement corrélé à l'oxygène dissous (OXY), à la vitesse du courant (VC) et à la turbidité (TUR), ainsi qu'à une faible minéralisation (S, CE). Le second groupe S2 (figure 5B) comprend *H. stagnorum* (Hsta), *C. affinis* (Caff), *A. sardeus sardeus* (Asar), *G. thoracicus* (Gth) et *M. vittigera* (Mvit). Il correspond à des espèces abondantes dans le site 5, caractérisé par une faible minéralisation et une température de l'eau peu élevée au printemps et en été. Le troisième groupe S3 (figure 5B) est le plus riche, il comprend les espèces *S. stagnalis* (Ssta), *N. maculatus conspersus* (Naucon), *S. lateralis (Slat), G. lacustris (Glac), N. maculata (Nmac), N. glauca (Nglu), G. maculatus (Gmac), G. brasili (Gbra) et N. cinerea (Ncin)*, qui sont surtout présentes dans les sites aval (8, 9, 10, 11), présentant une minéralisation forte, une faible teneur en oxygène, une température de l'eau peu élevée en hiver, et une faible vitesse du courant. La position *d'A. cinereus* (Acin) est intermédiaire entre les groupes S1 et S3, ce qui correspond à des présences élevées à la fois en aval (sites 10, 11) et dans le cours moyen (sites 6, 7).

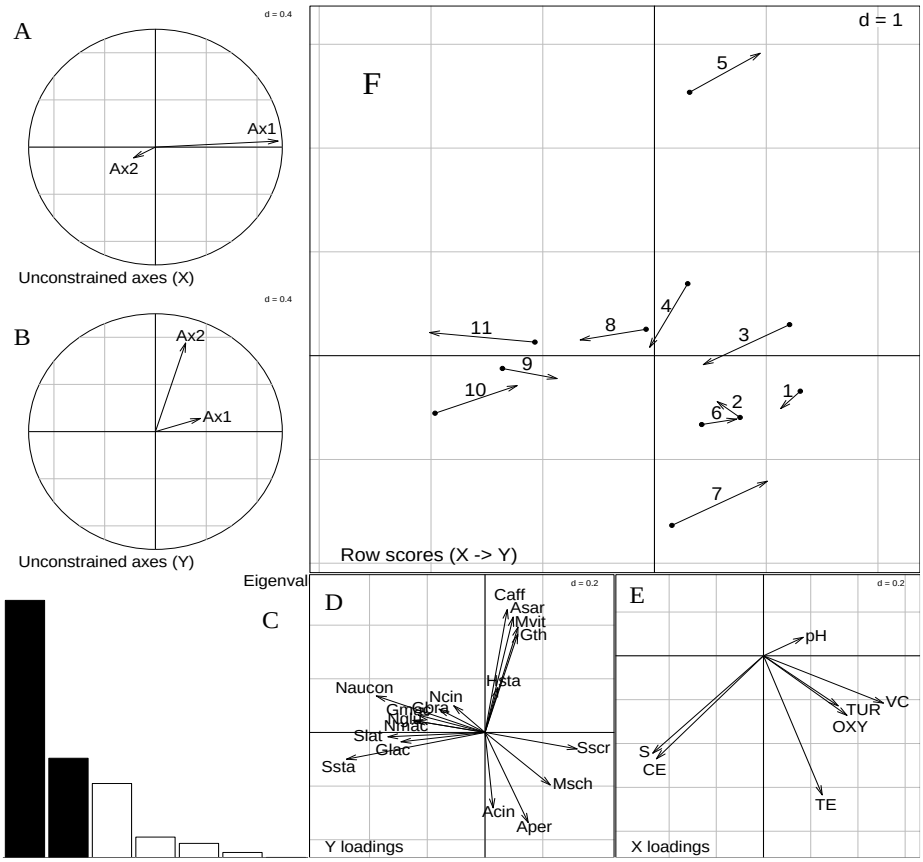


Figure 4. Représentation résumée des résultats de la méthode COSTATIS. Représentation des 18 espèces et des sept variables physico-chimiques sur les deux premiers axes de Co-inertie et projection des coordonnées des 11 sites d'échantillonnage. A et B : projection des axes principaux des analyses séparées (ACP) des deux tableaux. C, D et E : valeurs propres et coordonnées des espèces et des variables dans l'analyse de co-inertie. F : projection des coordonnées des lignes des deux tableaux. Pour chaque site, l'origine de la flèche correspond à la coordonnée de la ligne du tableau des variables physico-chimiques et la pointe de la flèche correspond à la coordonnée de la ligne du tableau des espèces d'hétéroptères aquatiques. Plus la flèche est courte et plus la cohérence entre les deux structures est bonne.

DISCUSSION

L'analyse de la richesse faunistique indique que 15 des 18 espèces collectées sont communes aux sites du cours d'eau principal de la Medjerda et à ceux de ses affluents. Globalement, la structure du peuplement des hétéroptères aquatiques du bassin versant de la Medjerda est dominée, en termes de densité et de richesse spécifique, par les Corixidae et les Gerridae. La variabilité spatiale de la densité totale est essentiellement due aux deux espèces numériquement dominantes, *M. scholtzi* et *A. cinereus*. Cette structure n'est pas caractéristique des peuplements dulcicoles tunisiens seulement, puisqu'elle se rencontre également dans les réseaux hydrographiques dulcicoles méditerranéens du nord-est algérien [28], du bassin versant

Laou marocain [29] et le long du bassin de la Moulouya et de la région orientale du Maroc [30].

Cet ordre de dominance est observé également au niveau d'autres réseaux hydrographiques méditerranéens, comme ceux de Seguar en Espagne [31]. En revanche, pour le réseau hydrographique dulcicole méditerranéen de la province de Madrid (Espagne), la structure est essentiellement dominée par *H. vermiculata*, *M. minuscules*, *A. marazanofi* et *S. stagnalis* [32]. La famille des Gerridae est représentée par trois espèces : *Gerris lateralis*, *G. lacustris* et *G. thoracicus* dans deux zones humides importantes de la plaine du Gharb au Maroc [33].

La structure spatiale présente un gradient amont-aval lié à la zonation longitudinale abiotique mais elle peut également être influencée par les fluctuations saisonnières des régimes hydrauliques notamment en périodes de crues et d'étiages. Les résultats sont en accord avec ceux de Slimani et al. [15] qui ont révélé des concentrations élevées de matières dissoutes dans le bassin versant de la Medjerda. De plus, la minéralisation était plus élevée dans les affluents de la rive sud du bassin versant de la Medjerda par rapport aux rivières du nord de la Tunisie [3].

L'analyse COSTATIS a permis aussi de préciser les espèces les plus caractéristiques de chacune de ces stations. En effet, *Micronecta scholtzi* occupe la première position (55%). Ceci s'expliquerait par son abondance au niveau des stations ST1, ST2, ST3, ST5, ST7 et ST8 liée à son large spectre trophique dans ces cours d'eau bien oxygénés [34]. Les données faunistiques ont révélé la présence de structures spatiales fortes, qui existent aussi dans les données environnementales. Il est donc justifié de rechercher une co-structure reliant ces deux types de structures. Cette co-structure s'exprime principalement sur un axe qui caractérise le gradient amont-aval touchant notamment la nature du substrat [26,27], le niveau thermique des eaux, leur minéralisation et leur vitesse d'écoulement. Nos résultats ont montré que la variation spatio-temporelle de la densité des hétéroptères aquatiques au cours des quatre saisons diffère d'une station à l'autre. Aucune des espèces n'était présente dans tous les sites en raison d'une forte hétérogénéité des biotopes échantillonnés ainsi que des préférences et du degré d'adaptation de chaque espèce.

Les habitats étudiés ont montré l'existence d'une relation étroite entre la structure de la communauté et les fluctuations saisonnières des facteurs environnementaux tels que la température, qui affecte l'écologie et la biogéographie de toutes les faunes benthiques des rivières [35]. Ainsi, la température joue clairement un rôle clé dans

la répartition longitudinale de la zoocénose [36].

Par ailleurs, la construction de plusieurs barrages hydroélectriques a augmenté les ressources trophiques en aval, favorisant ainsi la prolifération de certaines espèces comme *Nepa cinerea* commune dans les mares à végétation riche. Aussi, l'abondance d'*Aquarius cinereus* serait-elle l'une des causes de la faible abondance du peuplement entomologique aux stations des affluents de la Medjerda. En effet, cette espèce est un prédateur de larves d'insectes aquatiques [34].

CONCLUSION

Les facteurs environnementaux (notamment température, minéralisation, taux d'oxygène et vitesse d'écoulement des eaux) déterminent la distribution et l'abondance des communautés d'hétéroptères aquatiques du nord tunisien selon un gradient amont-aval. Indépendamment des saisons, la richesse spécifique est dominée par les Gerromorpha aux stations du cours principal et par les Nepomorpha aux stations des affluents de l'oued Medjerda. Deux espèces majoritaires ont été mises en évidence : *Aquarius cinereus* et *Micronecta scholtzi*.

D'autres études, y compris une approche plus systématique sont nécessaires dans les recherches futures pour une contribution précieuse de la biodiversité locale basées, soit sur des analyses phylogénétiques (ADN mitochondrial, ribosomal), ce qui pourrait être un moyen très efficace pour étudier l'affiliation biogéographique des espèces, soit la modélisation de la répartition des espèces (SDM).

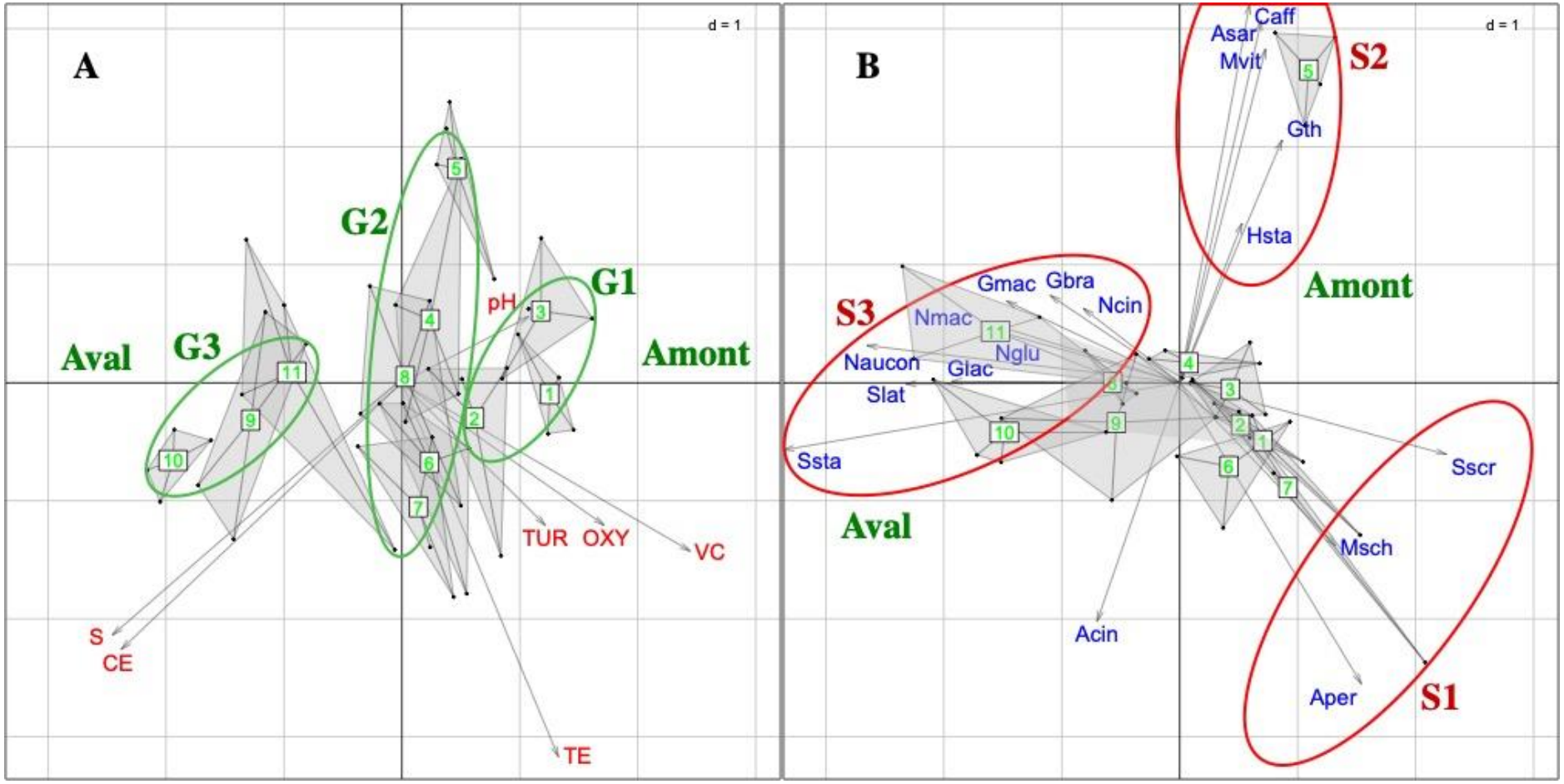


Figure 5. Résultats de la méthode COSTATIS (étape de l'intrastructure) : projections des lignes (sites de prélèvement) des deux séries de tableaux, superposées avec les variables environnementales (A) et les espèces d'hétéroptères (B). Pour chaque site de prélèvement (notés de 1 à 11), les 4 points regroupés dans des enveloppes convexes grisées correspondent aux 4 dates de prélèvement (printemps, été, automne, hiver)

Références

[1] Slimani N, Sánchez-Fernández D, Guilbert E, Boumaiza M, Guareschi S, Thioulouse J. (2019) Assessing potential surrogates of macroinvertebrate diversity in north-African Mediterranean aquatic ecosystems. *Ecol Indic*, 101: 324-329.

[2] Tierno de Figueroa JMT, López-Rodríguez MJ. Fenoglio S, Sánchez-Castillo, Fochetti R. (2013) Freshwater biodiversity in the rivers of the Mediterr-anean Basin. *Hydrobiologia*, 719: 137-186.

[3] Boumaïza M. (1994) Recherches sur les eaux courantes de Tunisie. Faunistique. Ecologie et Biogéographie. Thèse de doctorat d'Etat es-Sciences Biologiques. Faculté des Sciences. Tunis, 429 p.

[4] Slimani N, Béjaoui M, Boumaiza M, (2015) Taxonomic diversity and benthic community structures of watersheds of Medjerda and Joumine (North east of Tunisia). *Int res J earth sci*, 3: 24-30.

[5] Heino J, Louhi P, Muotka T. (2004) Identifying the scales of variability in stream macroinvertebrate abundance functional composition and assemblage structure. *Freshw Biol*, 49: 1230–1239.

[6] Emmons SC, Cashman MJ, Fanelli RM, Pond GJ, Noe GB, Woods TE, Maloney K O. (2025) Stressor-driven changes in freshwater biological indicators inform spatial management strategies using expert knowledge, observational data, and hierarchical models. *Ecol Indic*, 174: 113501.

[7] Rewicz T, Tończyk G, Trębicki Ł, Gadawski P, Mamos T, Pešić V, Zawal A, Grabowski, M. (2023) DNA barcode-based survey documents underestimated diversity and intricate phylogeographic patterns of aquatic Heteroptera in an endangered Balkan biodiversity hotspot: ancient Lake Skadar basin. *Biodivers Conserv, 32*(12): 4111-4138.

[8] Nery L, Carvalho B, Dias-Silva K, Vieira TB, Moreira FFF. (2025) Distribution and conservation of semiaquatic bugs (Hemiptera: Heteroptera: Gerromorpha) in the states of Alagoas and Sergipe, northeastern Brazil. *Aquat Ecol*, 59 :21-37.

[9] de Sousa DC, Veras DS, de Azevedo, CA.S. Cunha EJ, Juen L. (2024). Efficiency in using genera and families of heteroptera for stream biomonitoring in the Cerrado Biome, Eastern Maranhão, Brazil. Environ Monit Assess 196: 1278.

[10] Luo Q, Luo L, Zhou Q, Song Y. (2019) Does China's Yangtze River Economic Belt policy impact on local ecosystem services? *Sci Total Environ*, 676: 231-241.

[11] Song F, Su F, Mi C, Sun D. (2021) Analysis of driving forces on wetland ecosystem services value change: A case in Northeast China. *Sci Total Environ*, 751: 141778.

[12] Le Floc'h É, Boulos L, Véla E. (2010) Catalogue Synonymique Commenté de La Flore de Tunisie; République Tunisienne. Ministère L'Environnement du Développement Durable. Banque nationale de gènes: Tunisia. Tunisie.

[13] Eisenhauer N, Hines J. (2021) Invertebrate biodiversity and conservation. *Curr Biol*, 31: R1214-R1218.

[14] Polhemus JT, Polhemus DA. (2008) Global diversity of true bugs (Heteroptera; Insecta) in freshwater. *Hydrobiologia*, 595: 379-391.

[15] Slimani N, Guilbert E, Ayni F, Jrad A, Boumaiza M, Thioulouse J. (2017) The use of STATICO and COSTATIS, two exploratory three-ways analysis methods: an application to the ecology of aquatic heteroptera in the Medjerda watershed (Tunisia). *Environ Ecol Stat,* 24: 269-295.

[16] Poisson R. (1957) Hétéroptères aquatiques. Faune de France. Vol. 61. Fédération Française des Sociétés de Sciences Naturelles. Paris. 263p.

[17] Tamanini L. (1979) Guide per il riconoscimento delle specie animali delle acque interne italiane. 6. Eterotteri acquatici (Heteroptera: Gerromorpha. Nepomorpha). Consiglio Nazionale delle Ricerche. Verona. 106 p.

[18] Jansson A. (1986) The Corixidae (Heteroptera) of Europe and some adjacent regions. *Acta Entomol Fenn*, 52:1-93.

[29] Shannon CE. (1948) A mathematical theory for communication. *Bell Syst Tech J*, 27: 379-423 and 623-65.

[20] Pielou.EC. (1966) The measurement of diversity in different types of biological collections. *J Theor Biol*, 13: 131-144.

[21] Thioulouse J, Dray S, Dufour AB, Siberchicot A, Jombart T, Pavoine S. (2018) Multivariate Analysis of Ecological Data with ade4. 330p. Springer Statistics books - ISBN: 978-1-4939-8848-8.

[22] Thioulouse J. (2011) Simultaneous analysis of a sequence of paired ecological tables: A comparison of several methods. *Ann Appl Stat*, 5: 2300-2325.

[23] Aukema B, Rieger C. (1995) Catalogue of the Heteroptera of the Palaearctic Region. Vol. 1. Enicocephalomorpha, Dipsocoromorpha, Nepomorpha, Gerromorpha and Leptopodomorpha. Netherlands Entomological Society, Amsterdam, Wageningen

[24] Carapezza A. (1997) Heteroptera of Tunisia. Naturalista Siciliano, Serie IV, 21 (Supplement A), 1–312.

[25] Aukema B, Rieger Ch, Rabitsch W. (2013) Catalogue of the Heteroptera of the Palaearctic Region. VI. Supplement. The Netherlands Entomological Society, Amsterdam, xxiii + 629 pp.

[26] Slimani N, Moulet P, Chen PP, Nieser N, Pluot-Sigwalt D, Boumaïza M, Guilbert E. (2015) Checklist, distribution, and a new record of Nepomorphan water bugs (Hemiptera, Heteroptera) in northern Tunisia. Zootaxa, 3981, 151–176.

[27] Slimani N, Chen PP, Nieser N, Moulet P, Inacio Ribeiro JR, Boumaïza M, Guilbert E. (2016) Annotated check-list of semi-aquatic bugs (Hemiptera: Heteroptera: Gerromorpha) of Tunisia, with detailed faunistic survey of North Tunisia. Entomol. Am. 122, 55–71.

[28] Annani F. (2013) Essai de biotypologie des zones humides du constantinois. Thèse Doctorat en Sciences Biologiques. Faculté des Sciences de Badji Mokhtar Annaba, 227p.

[29] Lmohdi O, El Haissoufi M, Bennas N, Millan A. (2008) Contribution à la connaissance des Hétéroptères aquatiques du bassin versant Laou. *Trav Inst Sci, Rabat*, 5: 67-74.

[30] Taybi AF, Mabrouki Y, Chavanon G, Berrahou A, Millan A. (2018) New data on the distribution of aquatic bugs (Hemiptera) from eastern Morocco with notes on chorology. *Zootaxa*, *4459*(1), 139-163.

[31] Carbonell JA, Gutiérrez-Cánovas C, Bruno D, Abellán P, Velasco J, Millán A. (2011) Ecological factors determining the distribution and assemblages of the aquatic Hemiptera (Gerromorpha & Nepomorpha) in the Segura River basin (Spain). *Limnetica*, 30: 59-70.

[32] López T. (1998) Heterópteros acuáticos de la provincia de Madrid. Doctor en Ciencias Biológicas. Universidad Complutense de Madrid, 359p.

[33] Slim M, Hafsa O, Fadli M. (2023) Biodiversity of aquatic Heteroptera in relation to physico-chemical parameters, the Biological Reserve of Sidi Boughaba and the Merja of Fouarat as a case study (Gharb Plain, Morocco). *Acta Zool Lilloana*: 473-488.

[34] Slimani N, Guilbert E, White JC, Hill MJ, Wood PJ, Boumaïza M, Thioulouse, J. (2022) Unravelling the environmental correlates influencing the seasonal biodiversity of aquatic Heteropteran assemblages in northern Africa. *Limnologica*, 97: 126021.

[35] Skern M, Zweimüller I, Schiemer F, (2010) Aquatic Heteroptera as indicators for terrestrialisation of floodplain habitats. *Limnologica-Ecology and Management of Inland Waters*, 40: 241-250.

[36] Bonacina L, Fasano F, Mezzanotte V, Fornaroli R. (2023) Effects of water temperature on freshwater macroinvertebrates: a systematic review. *Biol Rev*, 98: 191-221.