

ecologia mediterranea

Revue internationale d'écologie méditerranéenne
International Journal of Mediterranean Ecology

Vol. 50 (2) – 2024

Sommaire/Contents

Seed-dispersing birds in steppe areas Case study of the Naâma region (western Algeria) <i>Avifaune disséminatrice des graines dans les steppes. Étude de cas de la région de Naâma (ouest de l'Algérie)</i> A. T. YOUCEFI, A. GOUACEM, K. LITIM, L. HADDI, F. MESSAOUI	3
Les araignées des îles du Parc national des Calanques (sud-est de la France): nouvelles données et état des lieux des connaissances <i>Spiders of the islands of Calanques National Park (Southeast of France): New data and current state of knowledge</i> M. CZYZ, C. MAZZIA, L. BERVILLE, P. PONEL, É. BUISSON	13
Environmental impact on the macrobenthic communities' structure and diversity along the southern part of the Gulf of Tunis Running head: Gulf of Tunis Macrobenthic communities B. AISSI, W. BOULAJFENE, A. EL MLAYAH, S. TLIG -ZOUARI	29
Impact of soil management on invertebrates and soil quality in the eastern suburbs of Algiers (Algeria) <i>Impact de la gestion des sols sur les invertébrés et la qualité des sols dans la banlieue Est d'Alger (Algérie)</i> H. AMGOUD, A. M. SAHNOUN, N. SAADOUN	43
Résumés de thèses – <i>Ph. D summaries</i> M. MAUDUIT, M. GRENIER, L. PETIT DIT GRÉZÉRIAT, P. KUZNETSOV, L. VIOLLAT, C. MUTILLOD, R. BLAYA, M. DERRIEN	57

Revue indexée dans Pascal-CNRS et Biosis
Journal indexed in PASCAL-CBRS and Biosis
<http://ecologia-mediterranea.univ-avignon.fr/>

Acknowledgments – Remerciements

The editorial committee thanks the associate editors and reviewers who have participated in this volume for their advices, corrections and opinions.

Le comité éditorial de la revue remercie les éditeurs associés et les relecteurs qui ont participé à ce numéro pour leurs conseils, corrections et avis.

Editorial Board – Comité éditorial

D^r Pierre CHEVALDONNÉ, CNRS, Marseille, France
D^r Marc CHEYLAN, EPHE, Montpellier, France
D^r Bruno FADY, INRAE, Avignon, France
P^r Thierry GAUQUELIN, Aix Marseille Université, Marseille, France
D^r Grant WARDELL-JOHNSON, University of Western Australia, Australie
D^r Antoine GAZAIX, Tour du Valat, Arles, France
D^r Raphaël GROS, Aix Marseille Université, Marseille, France
D^r Frédéric GUITER, Aix Marseille Université, Aix-en-Provence, France
P^r Serge KREITER, SupAgro, Montpellier, France
P^r Frédéric MÉDAIL, Aix Marseille Université, Aix-en-Provence, France
D^r Tom PARKER, San Francisco State University, États-Unis
D^r Philippe PONEL, CNRS, Aix-en-Provence, France
D^r Roger PRODON, EPHE, Montpellier, France
D^r Sandra SAURA-MAS, Autonomous University of Barcelona, Espagne
D^r Isabelle SCHWOB, Aix Marseille Université, Marseille, France
D^r Irene TEIXIDOR-TONEU, IRD, Marseille, France
D^r Thekla K. TSITSONI, Aristotle University of Thessaloniki, Grèce
D^r Errol VÉLA, Université de Montpellier, Montpellier, France
D^r Éric VIDAL, IRD, Nouvelle-Calédonie
D^r Mercedes VIVAS, Universidad of Concepción, Chili
D^r Ioannis VOGIATZAKIS, Open University of Cyprus, Chypre

Seed-dispersing birds in steppe areas

Case study of the Naâma region (western Algeria)

Avifaune disséminatrice des graines dans les steppes *Étude de cas de la région de Naâma (ouest de l'Algérie)*

Ahmed Toufik YUCEFI^{1, 2, *}, Ali GOUACEM¹, Kouider LITIM¹,
Leila HADDI¹, Fatima MESSAOUI¹

1. Directorate of Forestry of the Wilaya of Naâma, Algeria

2. Ph.D., Sustainable management of natural resources in arid and semi-arid areas laboratory,
Institute of science, Salhi Ahmed University center of Naâma, Algeria

* Corresponding author: ahmed.youcefi@cuniv-naama.dz

Received: 30 March, 2024; First decision: 20 Sept., 2024; Revised: 28 Sept., 2024; Second decision: 4 Nov., 2024;
Revised: 5 Nov., 2024; Accepted: 6 Nov., 2024

Abstract

The present paper attempts to determine a nominal list of birds that can participate in seed dispersal in the region of Naâma (Algerian Western Steppe). Our working method was based on multiple field trips to inventory and enumerate the bird species. The study of the phenological status of the birds identified in the study area allowed us to identify the species that can actually participate in disseminating seeds: such species must be totally or partially granivorous and must be regularly present and active in the steppes during the vegetation period. The distribution of species observed by families shows a clear dominance of Alaudidae, followed by Muscicapidae and Pteroclididae. These birds can be used as vectors for spreading steppe seeds.

Résumé

Le présent article tente de déterminer une liste nominative des oiseaux pouvant participer à la dispersion des graines dans la région de Naâma (steppe occidentale algérienne). Notre méthode de travail s'est basée sur des sorties sur terrain pour inventorier et dénombrer les espèces d'oiseaux. L'étude de leurs statuts phénologiques a permis d'évaluer les espèces pouvant effectivement participer à la propagation des semences: ces espèces doivent être totalement ou partiellement granivores, être présentes et avoir une activité régulière dans les steppes durant la période de végétation. La répartition des espèces observées par familles montre une nette dominance des Alaudidae, suivies des Muscicapidae et des Pteroclididae. Ces oiseaux peuvent être utilisés comme vecteurs pour assurer la dissémination des graines dans les steppes.

Keywords: Alaudidae, Muscicapidae, Naâma region, Pteroclididae, ornithochoria, seed-dispersing, steppe areas.

Mots-clés: Alaudidae, dissémination des graines, Muscicapidae, ornithochorie, Pteroclididae, région de Naâma, zones steppiques.

Introduction

In North Africa, many arid regions are suffering from land degradation, which can be an impediment to sustainable development (Grandi *et al.* 2017). This steppe is undergoing degradation, of which the rate and the intensity are accentuated, leading to a reduction in biological potential (Boukerker *et al.* 2021). The rehabilitation of steppe areas is based on taking into account climatic, social and edaphic aspects, but we believe that the study of the phenomena of dispersal of diaspores also deserve their place in the rehabilitation of these degraded areas.

The diaspores of seeds are transported by many vectors from which the dispersal modes are inferred, such as anemochory as spread by wind (Sádlo *et al.* 2018). Many plants interact with animal vectors for diaspore dispersal (Iluz 2010). Zoochory refers to the movement of diaspores facilitated by animals (Iluz 2010). Various methods exist through which animals can distribute plant seeds. Epizoochory involves seeds being carried externally on animals. In contrast, endozoochory involves seed dispersal through the consumption of seeds by animals and serves as the primary dispersal method for the majority of tree species (Iluz 2010). Most seeds are dispersed by three classes of vertebrates: birds, mammals and reptiles (Traveset *et al.* 2014). Ornithochory, the dispersal by birds, plays an important role in the formation of riparian vegetation for example, because many plant species are adapted to such dispersal (Jana *et al.* 2016).

The objective of this work is to determine which birds can participate in a permanent and regular way in the natural regeneration of plants in the steppe rangelands of the region of Naâma, characterized by its aridity (Youcefi *et al.* 2024). This determination is based on the classification of birds observed in the study area according to their phenological status and diet.

Methods

The study area

The Naâma region is located in the west of Algeria between the Tellian Atlas and the Saharan Atlas (Figure 1). It is a steppe region that covers an area of 29,819km² (DPMD,

2021). At the local level, agriculture is the leading economic sector and livestock, more specifically sheep breeding (Youcefi & Marouf 2023), is the main activity on which the local economy of this region, known for its agropastoral vocation, is based (Youcefi & Marouf 2024). The Naâma region is characterized by its topographical diversity, which can be divided into three large geographical areas: a steppe zone (74% of the total area), a mountainous zone (12%) and a pre-Saharan zone (14%). The natural landscape of this region is made up of a plant association represented by *Stipa tenacissima*, *Arthophytum scoparium*, *Lygeum spartum* and *Artemisia herba-alba*.

The Naâma region holds significant importance for a diverse array of birds exhibiting different phenological statuses; their ecosystems are home to 179 bird species where the Passeriformes, Charadriiformes, Anseriformes, Pelecaniformes and Accipitriformes are the most species-rich orders present (Youcefi & Marouf 2022). The bird species noted in the Naama region accounts for approximately 39% of the bird population recorded in Algeria, which is estimated to encompass 461 birds (Oiseaux.net 2024).

Sampling

During our work, the observations were made almost weekly in steppe areas between 2015 and 2023 all year-round, several devices and equipment are used: A terrestrial telescope with tripod (Swarovski), a pair of binoculars (Swarovski), and a digital camera (Sony). The Alaudidae, Muscicapidae, and Fringillidae families within the order Passeriformes comprise small birds that commonly inhabit the



Figure 1 – Location of the study area (region of Naâma).

steppes, rendering their observation and identification particularly challenging. The use of appropriate techniques is strongly recommended, as is the case with Fixed-radius Point Count, which is based on the installation of listening points with a duration varying from 5 to 20 minutes and to record individuals seen or heard (Hutto *et al.* 1986; Thiolley 1997). The birds were observed directly in their natural environments using the appropriate equipment and method, in order to draw up a list of the species that frequent the steppes of the Naâma region. The species identification is based essentially on the bird guide written by Svensson *et al.* (2014).

Bird selection

After the completion of the bird list, we proceeded to a series of selection in order to keep only species that can participate effectively in the propagation of seeds. Our selection approach refers to the phenological status of birds identified in the study area, where species that can effectively participate in the spread must be totally or partially granivorous and characterized by regular presence and activity in steppes during the vegetation period i.e. spring and early summer. The work method is to perform successive selection and disposal series (Figure 2).

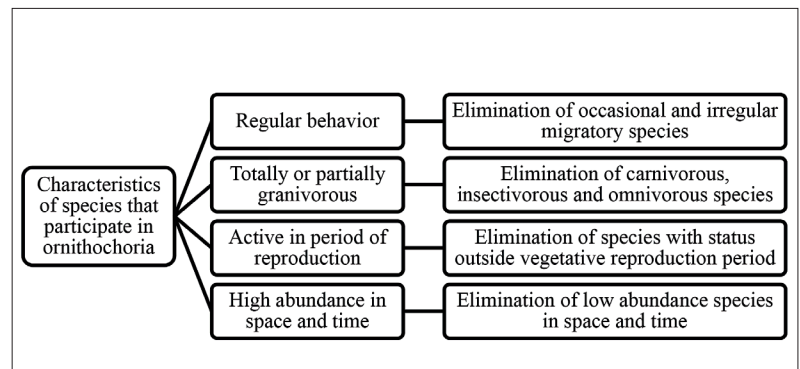


Figure 2 – Selection approach.

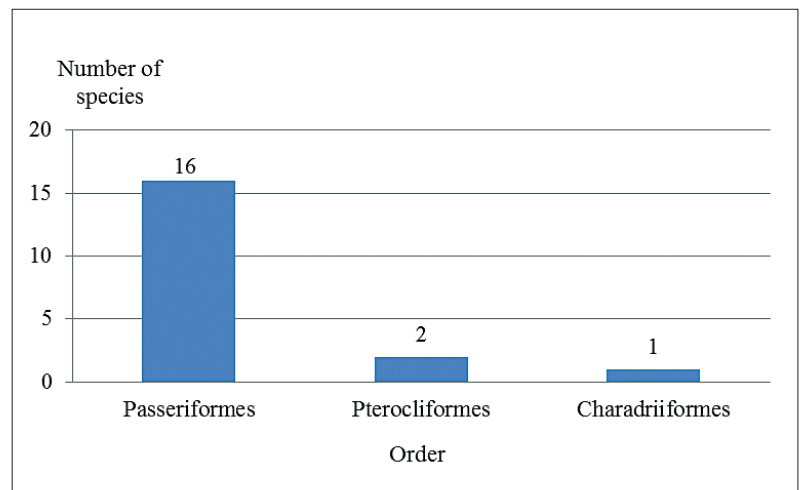


Figure 3 – Distribution of birds that may participate in seed dispersal by order.

Results

By orders

We listed 179 species between 2015 and 2023 in the Naâma steppes. In the initial selection, we removed 51 species, including migratory, irregular wintering, and rare birds. During the second selection, we discarded 38 birds that do not consume seeds. The third phase excludes 13 birds that are active outside the growing season. Finally, we also disqualified 58 species noted for their low abundance both spatially and temporally. The remaining 19 species form the final list of birds that adhere to the selection criteria, distributed over three orders and six families. The species belonging to the order Passeriformes represents nearly 85% (16 species) of the identified birds, while the other two orders, Pterocliiformes and Charadriiformes, represents 15% (3 species) (Figure 3).

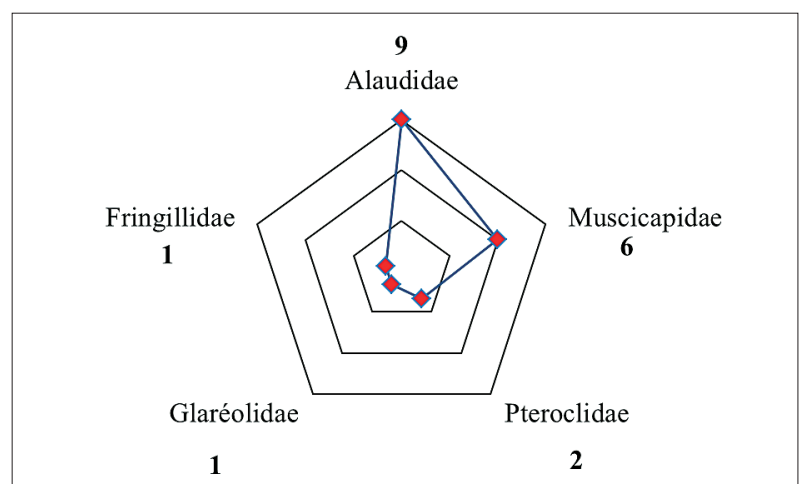


Figure 4 – Distribution of birds that may participate in seed dispersal by families.



Figure 5-13 – A: *Calandra lark* (*Melanocorypha calandra* Linnaeus, 1766), **B:** *Crested lark* (*Galerida cristata* Linnaeus, 1758), **C:** *Desert lark* (*Ammomanes deserti* Lichtenstein, MHK, 1823), **D:** *Greater hoopoe-lark* (*Alaemon alaudipes* Desfontaines, 1789), **E:** *Greater short-toed lark* (*Calandrella brachydactyla* Leisler, 1814), **F:** *Maghreb lark* (*Galerida macrorhyncha* Tristram, 1859), **G:** *Mediterranean short-toed lark* (*Alaudala rufescens* Vieillot, 1819), **H:** *Temminck's lark* (*Eremophila bilopha* Temminck, 1823), **I:** *Thick-billed lark* (*Ramphocoris clotbey* Bonaparte, 1850).
Photograph by Ahmed Toufik YUCEFI.

By families

The distribution of species observed by families (Figure 4) shows a clear dominance of Alaudidae (Figures 5 to 13) which represent a proportion of 48% (9 species), followed

by Muscicapidae with a proportion of 32% (6 species). The family of Pteroclididae come in third position with a proportion of 11% equivalent to 2 species. Then the remaining families are represented by a single species for each one is a proportion of 6%.

Discussion

Passeriformes is the most diverse bird order, comprising 5,700 species and representing about 60% of all living birds. Due to their enormous diversity, passerines have been the focus of many ecological and behavioural studies. The systematic relationships, early evolution and biogeography of passerines have long been debated among bird taxonomists (Ericson *et al.* 2014; Riamon *et al.* 2020). Birds from the Passeriforme order adopt different feeding strategies depending on the ecosystems they use. They may be granivorous with a natural diet that consists of the seeds of grasses and legumes. This feeding

behaviour induces an important role in the participation in the natural regeneration of the steppe vegetation cover. The best solution to rehabilitate degraded steppes is to restore the native plant cover. This can be implemented either by direct seeding or planting, or by promoting the natural dissemination of seeds. Our vision is based on the use of the birds listed above, qualified as seed-dispersing species, as vectors to improve seed propagation to ensure as much regeneration as possible. While dispersion is important, the processing of seeds through bird digestive tract greatly increase the chance of germination, which is essential in arid region. We thus recommend taking this into account when planning restoration

Table 1 – The species of the Alaudidae, Muscicapidae, Fringillidae, Pteroclididae and Glareolidae families.

Family	English name	Scientific name	Seasonal presence	Abundance
Alaudidae	Calandra lark	<i>Melanocorypha calandra</i> Linnaeus, 1766	Spring and early summer	From 1 to 2
	Crested lark	<i>Galerida cristata</i> Linnaeus, 1758	All year round	Usually more than 5
	Desert lark	<i>Ammomanes deserti</i> Lichtenstein, MHK, 1823	All year round	From 1 to 2
	Greater hoopoe-lark	<i>Alaemon alaudipes</i> Desfontaines, 1789	All year round	From 1 to 3
	Greater short-toed lark	<i>Calandrella brachydactyla</i> Leisler, 1814	Spring and early summer	From 1 to 3
	Maghreb lark	<i>Galerida macrorhyncha</i> Tristram, 1859	All year round	From 1 to 2
	Mediterranean short-toed lark	<i>Alaudala rufescens</i> Vieillot, 1819	All year round	From 1 to 2
	Temminck's lark	<i>Eremophila bilopha</i> Temminck, 1823	All year round	From 1 to 3
	Thick-billed lark	<i>Ramphocoris clotbey</i> Bonaparte, 1850	Spring and early summer	Usually more than 10
Muscicapidae	Black wheatear	<i>Oenanthe leucura</i> Gmelin, JF, 1789	All year round	Usually more than 5
	Desert wheatear	<i>Oenanthe deserti</i> Temminck, 1825	Spring and early summer	From 1 to 2
	Northern wheatear	<i>Oenanthe oenanthe</i> Linnaeus, 1758	Spring and early summer	From 1 to 2
	Red-rumped wheatear	<i>Oenanthe moesta</i> Lichtenstein, MHK, 1823	All year round	Usually more than 5
	Western black-eared wheatear	<i>Oenanthe hispanica</i> Linnaeus, 1758	Spring and early summer	From 1 to 2
	White-crowned wheatear	<i>Oenanthe leucopyga</i> Brehm, CL, 1855	Spring and early summer	From 1 to 2
Fringillidae	Trumpeter finch	<i>Bucanetes githagineus</i> Lichtenstein, MHK, 1823	All year round	Usually from 2 to 6
Pteroclididae	Pin-tailed sandgrouse	<i>Pterocles alchata</i> Linnaeus, 1766	All year round	Usually about 10, rarely more than 100
	Black-bellied sandgrouse	<i>Pterocles orientalis</i> Linnaeus, 1758	All year round	Usually from 2 to 6, rarely more than 10
Glareolidae	Cream-colored courser	<i>Cursorius cursor</i> Latham, 1787	All year round	Usually from 2 to 4

actions that involves bird-dispersed species: attracting birds to feed on the native steppe by creating temporary scattered water points, and, after a while shifting the water resource to degraded areas for them to move and release the seeds there would have to be tested.

Alaudidae are a widespread and large bird family, comprising over 100 species in genera across Africa and Eurasia (Martin *et al.* 2020). In our study area, the diet of Alaudidae (Table 1) is insectivorous and partially granivorous, their presence is very widespread and almost continuous in the steppes, in particular in the grass ecosystems characterized by *Stipa tenacissima*, *Artemisia herba alba*, *Lygeum spartum* and the steppes with halophytes and psammophytes. In the morning, they often frequent water points, especially near wells and drinking troughs.

Muscicapidae are a diverse bird family, comprising about 48 genera and near

275 species. Part of this family are widely distributed in the Palearctic, Afrotropical and Indo-Malayan regions, and some species occur in parts of Australasia and the Nearctic (Dickinson 2003; Clements 2007; George *et al.* 2010). Concerning our study area, these species (Table 1; Figures 14-19) frequent the entire steppe territory and generally perch on tufts or rocks.

The Fringillidae are one of several lineages of granivorous passerines. They form the only clade of seedeaters with an almost world-wide distribution, occurring in Africa, Eurasia, and North and South America, although their greatest diversity in terms of number of species and genera is found in Eurasia (Dario *et al.* 2012). In the study area, the Trumpeter Finch (*Bucanetes githagineus* Lichtenstein, MHK, 1823) generally frequents the steppes with halophytes (Figure 20 and Table 1), and the mineral soils with low plant cover; it moves in groups to drink.



Figure 14-19 – A: Black wheatear (*Oenanthe leucura* Gmelin, JF, 1789). B: Desert wheatear (*Oenanthe deserti* Temminck, 1825). C: Northern wheatear (*Oenanthe oenanthe* Linnaeus, 1758). D: Red-rumped wheatear (*Oenanthe moesta* Lichtenstein, MHK, 1823). E: Western black-eared wheatear (*Oenanthe hispanica* Linnaeus, 1758). F: White-crowned wheatear (*Oenanthe leucopygia* Brehm, CL, 1855).
Photograph by Ahmed Toufik YUCEFI.



Figure 20 – Trumpeter finch (*Bucanetes githagineus* Lichtenstein, MHK, 1823).
Photograph by Ahmed Toufik YUCEFI.



Figure 21 – Pin-tailed sandgrouse (*Pterocles alchata* Linnaeus, 1766).
Photograph by Ahmed Toufik YUCEFI.

The Pteroclididae is a family of longwinged and very short-legged terrestrial birds living in arid landscapes, and classified in the order Pteroclidiformes. This family includes two genera: *Pterocles* inhabiting various open arid habitats of Africa and southern Eurasia and *Syrrhaptes* confined to arid steppes and semi-deserts of Inner Asia (Znari *et al.* 2008; Zelenkov 2023). In our region of study the species belonging to this family are only two: the Pin-tailed sandgrouse (*Pterocles alchata* Linnaeus, 1766) and the Black-bellied sandgrouse (*Pterocles orientalis* Linnaeus, 1758) (Figures 21-22 and Table 1). They are robust-sized granivorous birds that frequent flat areas with low vegetation, they gather at the beginning of the day at the edge of the water points.

The family of Glareolidae frequent tropical, desert and savannah regions in Africa, and is also found higher up in mountains. This family is represented in our region study by a single species, namely: the Cream-coloured courser (Figure 23 and Table 1). It is a wader bird of an intermediate size between the sandpipers and plovers, which frequents degraded steppes with areas of bare soil or silt, where it can camouflage itself, if necessary it runs very quickly to escape from predators and it consumes insects and seeds.

We can divide the 19 species into two groups depending on their season of presence: the first group is present all year round and includes 12 species, and the second group consists of 7 regular migratory species frequent in the region in spring and summer (Table 1). The analysis of bird population



Figure 22 – Black-bellied sandgrouse (*Pterocles orientalis* Linnaeus, 1758).
Photograph by Ahmed Toufik YUCEFI.



Figure 23 – Cream-colored courser (*Cursorius cursor* Latham, 1787).
Photograph by Ahmed Toufik YUCEFI.

abundance (Table 1) shows that the majority of bird species are low in density because of the sparse nature of the dominant vegetation cover; an exception was for the Pin-tailed sandgrouse (*Pterocles alchata* Linnaeus, 1766) where its population exceeds 100 individuals in some cases (Table 1).

In addition to promoting granivorous birds presence on degraded areas, we also suggest to reinforce their population (i.e. intentional movement and release of an organism into an existing population of conspecifics). Such reinforcement could also be performed for other bird species, such as *Chlamydotis undulata*. Within a strictly legislative perspective, we additionally suggest safeguarding these species identified as disseminators in this analysis through the enactment of conservation laws. Furthermore, we propose establishing wildlife reserves to protect animals from poaching.

Acknowledgments

We thank reviewers for the time spent to review this paper. The quality of our manuscript would not have been the same without their efforts.

We would also like to thank all those who contributed directly or indirectly to the realization of this work, especially: Mohammedi Mohammed, Ouragh Abdelkader, Bouhafes Fatima, Tadj Houari, Rafai Ahmed, Figuigui Omar, Kenanda Noureddine, Allali Abdelkader.

References

- Boukerker, H., Boumedjene, M. R., Doghbage, A., Belhouadjeb, F. A., Kherifi, W., Hecini, L. & Bekiri, F. (2021). State of pastoral resources in the Algerian steppe regions: Main factors of degradation and definition of preservation and rehabilitation actions, *Livestock Research for Rural Development* 33(12).
- Budget Planning and Monitoring Directorate, wilaya of Naâma (2021). Statistical Yearbook of the Naâma Wilaya, 132. (Fr)
- Clements, J.F. (2007). *The Clements Checklist of Birds of the World*, Sixth ed., Cornell University Press, Ithaca.
- Zuccon, D., Prÿs-Jones, R., Rasmussen, C.P. & Per G.P. Ericson (2012). The phylogenetic relationships and generic limits of finches (Fringillidae), *Molecular Phylogenetics and Evolution* 62(2), 581-596. <https://doi.org/10.1016/j.ympev.2011.10.002>
- Dickinson, E.C. (2003). *The Howard and Moore Complete Checklist of the Birds of the World*, third ed., Christopher Helm, London
- Ericson, P.G., Klopstein, S., Irestedt, M., Nguyen, J.M. & Nylander, J.A. (2014). Dating the diversification of the major lineages of Passeriformes (Aves). *BMC Evol. Biol.* 14(8). <https://doi.org/10.1186/1471-2148-14-8>
- Sangster, G., Alström, P., Forsmark, E. & Olsson, U. (2010). Multi-locus phylogenetic analysis of Old World chats and flycatchers reveals extensive paraphyly at family, subfamily and genus level (Aves: Muscicapidae), *Molecular Phylogenetics and Evolution* 57(1), 380-392.
- Grandi, M., Hirche, A., Fernández-Ondoño, E., Martín-Peinado, F., Salamani, M. & Belala, F. (2017). Land degradation and sand dynamics in a steppe region (Naâma, south-western Algeria). *Spanish Journal of Soil Science* 7(3), 164-178.
- Hutto, R.L., Pletschet, S.M. & Hendricks, P. (1986). A fixed-radius point count method for non-breeding and breeding season use. *Ornithology* 103(3), 593-602.
- Iluz, D. (2010). Zoochory: The dispersal of plants by animals. In: Dubinsky, Z., Seckbach, J. (eds), *All Flesh Is Grass: Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrobiology*, vol. 16. Springer, Dordrecht, 199-214. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9316-5_9
- Ružicková, J., Lehotská, B., Kalivodová, E. (2016). Assessment of ornithochory in the north-western part of the Podunajská nížina Lowland (SW Slovakia), *Folia Oecologica* 43(1), 50-63.
- Thiollay, J.-M. (1997). Disturbance, selective logging and bird diversity: a Neotropical forest study. *Biodiversity and Conservation* 6, 1155-1173.
- Stervander, M., Hansson, B., Olsson, U., Hulme, M. F., Ottosson, U. & Alström, P. (2020). Molecular species delimitation of larks (Aves: Alaudidae), and integrative taxonomy of the genus *Calandrella*, with the description of a range-restricted African relic taxon, *Diversity* 12(11), 428. <https://doi.org/10.3390/d12110428>
- Oiseaux.net (2024). *The Birds of Algeria*. <https://www.oiseaux.net/birds/algeria.html>
- Riamon, S., Tourment, N. & Louchart, A. (2020). The earliest Tyrannida (Aves, Passeriformes), from the Oligocene of France. *Sci. Rep.* 10, 9776.
- Sádlo, J., Chytrý, M., Pergl, J. & Pyšek, P. (2018). Plant dispersal strategies: a new classification based on the multiple dispersal modes of individual species. *Preslia* 90, 1-22.
- Svensson, L., Mullarney, K. & Zetterstrom, D. (2014). *Le Guide ornitho. Le guide le plus complet des oiseaux d'Europe, d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient : 900 espèces*. Delachaux et Niestlé, Paris.
- Traveset, A., Heleno, R., Nogales, M. (2014). The ecology of seed dispersal. In: Gallagher, R.S. (ed.). *Seeds: The Ecology of Regeneration in Plant Communities*. CAB International, Oxford/Boston, 62-93.
- Van Leeuwen C. (2018). Internal and external dispersal of plants by animals: An aquatic perspective on alien interference. *Front. Plant Sci.* 9, 153. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00153>
- Youcef, A. T., Marouf, A. (2022). State of knowledge on the avifauna of the Naâma region (southwest Algeria), *Revue Agrobiologia* 12(2), 3276-3291.

- Youcefi, A. T., Marouf, A. (2023). Structure and age dynamics of breeders in the western Algerian steppes (region of Nâama). *Ikonomika i upravljenje na selskoto stopanstvo* 68(1), 32-37.
- Youcefi, A. T., Marouf, A. (2024). The valorization of agropastoral products and by-products: Case of the wilaya of Nâama (Western Algeria). *Ekonomika Poljoprivrede* 71(1), 253-261. <https://doi.org/10.59267/ekoPolj2401253T>
- Youcefi, A. T., Khiri, M., Sahnoun, A. & Marouf, A. (2024). The contribution of purified wastewater in the valorization of degraded steppe rangelands. Case study of the Mécheria region (western Algeria). *Natural Resources and Sustainable Development* 14(1), 129-140. <https://doi.org/10.31924/nrsd.v14i1.155>
- Zelenkov, N. (2023). A new species of sandgrouse (Aves: Pteroclididae) from the Early Pleistocene of the Crimea, *Doklady Biological Sciences* 511(1), 264-266.
- Znari, M., Aourir, M., Radi, M. & Melin, J. M. (2008). Breeding biology of the Black-bellied Sandgrouse *Pterocles orientalis* in west-central Morocco. *Ostrich* 79(1), 53-60. <https://doi.org/10.2989/OSTRICH.2008.79.1.6.363>

Les araignées des îles du Parc national des Calanques (sud-est de la France): nouvelles données et état des lieux des connaissances

Spiders of the islands of Calanques National Park (Southeast of France): New data and current state of knowledge

Martin CZYŻ¹, Christophe MAZZIA¹, Laurence BERVILLE¹, Philippe PONEL¹, Élise BUISSON^{1,*}

1. IMBE, Avignon Université, Aix-Marseille Université, CNRS, IRD

* Auteur correspondant: elise.buisson@univ-avignon.fr

Received: 30 October, 2024; First decision: 12 Nov., 2024; Revised: 10 Dec., 2024; Accepted: 12 Dec., 2024

Résumé

L'amélioration des connaissances sur la biodiversité des îles est la base d'une bonne gestion de ces milieux fragiles. Cette étude s'intéresse aux araignées, excellent taxon bio-indicateur au sein du groupe des arthropodes, recensées dans neuf îles du Parc national des Calanques. Dans un premier temps, nous avons identifié les espèces présentes sur les deux plus grandes îles de l'archipel du Frioul (Ratoneau et Pomègues) et sur l'île de Jarre (archipel de Riou) à partir d'échantillons prélevés en 2009 et 2010 dans des pièges à arthropodes initialement mis en place dans le cadre d'une thèse sur les fourmis. De plus, nous avons compilé les données validées provenant de prospections ciblées (listes mises à disposition par le Parc national des Calanques, OpenObs) ainsi que celles mises en ligne par des naturalistes de passage (iNaturalist, OpenObs, Silene PACA). Au total, 59 espèces sont présentes sur les neuf îles prospectées. L'île avec le plus

d'espèces recensées est Ratoneau (30 espèces), là où l'effort de prospection a été le plus grand. En effet, la prospection ciblée et la pose de pièges sont complémentaires et permettent l'échantillonnage de groupes fonctionnels variés. L'île d'If, qui possède la deuxième richesse la plus élevée (21 espèces), a fait l'objet de deux prospections ciblées. Les espèces les plus observées sont *Pelecopsis bucephala* (61 individus), *Bassaniodes bliteus* (19), *Argiope lobata* (18), *Pelecopsis inedita* (15) et *Microctenonyx subitaneus* (13). Cette étude permet de dresser une première liste des espèces connues d'araignées sur neuf îles du Parc national des Calanques mais met en évidence le déficit notable de données sur la biodiversité des araignées dans ces îles, en particulier celles de l'archipel de Riou, sous-étudiées. Il serait intéressant de standardiser les efforts d'échantillonnage et d'analyse pour comparer les îles entre elles afin de déterminer les effets des caractéristiques spatiales des îles sur la structure des communautés d'araignées.

Mots-clés: Arachnides, Araneae, données naturalistes, îlot, piège à fosse, piège Barber, prospections ciblées.

Abstract

*Improving knowledge of island biodiversity is essential for the effective management of these fragile environments. This study focuses on spiders, an excellent bioindicator taxon within the arthropod group, recorded on nine islands of the Calanques National Park. Firstly, we identified the species present on the two largest islands of the Frioul archipelago (Ratonneau and Pomègues) and on the island of Jarre (Riou archipelago) from samples taken in 2009 and 2010 in pitfall traps initially set up for a PhD thesis on ants. In addition, we compiled data from targeted surveys (lists made available by the Calanques National Park, OpenObs) as well as confirmed data from passing naturalists available online (iNaturalist, OpenObs, Silene PACA). In total, 59 species are present on the nine surveyed islands. The island with the most species is Ratonneau (30 species), where sampling effort was the greatest. Indeed, both targeted surveys and trap setting were carried out on that island and they are complementary by allowing the sampling of various functional groups. The island of If, which has the second highest richness (21 species), was the subject of two targeted surveys. The most observed species are *Pelecopsis bucephala* (61 individuals), *Bassaniodes bliteus* (19), *Argiope lobata* (18), *Pelecopsis inedita* (15) and *Microctenonyx subitaneus* (13). This study makes it possible to draw up a first list of known species of spiders on nine islands of the Calanques National Park but highlights the lack of data on the biodiversity of spiders on these islands, in particular those of the Riou archipelago, understudied. It would be interesting to standardize sampling efforts and analysis to compare islands and determine the effects of island spatial characteristics on spider community structure.*

Introduction

Même si les îles sont caractérisées par une richesse spécifique plus faible au regard de celle du continent, elles abritent des écosystèmes uniques et peuvent avoir un fort taux d'endémisme. Leur biodiversité est ainsi exceptionnelle (Kier *et al.* 2009). Leur isolement limite les échanges génétiques des populations, les réseaux trophiques y sont peu diversifiés, fragiles et composés d'espèces peu compétitrices (Cronk 1997; Walsh *et al.* 2012). Les îles possèdent ainsi une sensibilité particulière face aux changements globaux qui mettent en péril leurs patrimoines naturel, culturel, économique et

social (Gros-Désormeaux 2012; Veron *et al.* 2019). En effet, 75 % des extinctions répertoriées depuis l'expansion européenne dans le monde ont été observées sur des îles (tous groupes confondus; Fernández-Palacios *et al.* 2021). Les îles méditerranéennes n'échappent pas aux pressions liées aux changements environnementaux mondiaux (urbanisation, fragmentation des habitats, tourisme, surpâturage, invasions biologiques et changement climatique; Médail 2017). Ainsi, il est primordial de mener des actions de gestion afin de freiner la dégradation de la biodiversité qui peut parfois conduire à la disparition de populations locales voire à l'extinction d'une espèce endémique, et pour cela il est essentiel d'avoir de meilleures connaissances du fonctionnement de ces systèmes (Kueffer & Kinney 2017).

Les araignées ou Aranéides (ordre des Araneae) sont fréquemment utilisées comme un taxon bio-indicateur, parce qu'elles sont abondantes, qu'elles présentent une grande diversité spécifique et occupent une grande variété d'habitats et parce que leur écologie est relativement bien connue (Maelfait & Baert 1988; Hodkinson *et al.* 2001). De plus, la structure des assemblages d'araignées pouvant varier rapidement, elles sont considérées comme d'excellents taxons bio-indicateurs au sein du groupe des arthropodes (Fürst *et al.* 1993). Sur certaines îles, la forte densité en araignées est une conséquence d'un important flux de nutriments en provenance de la mer, soit par l'apport en matière organique des laisses de mer, soit par l'apport en matière organique lié à la fréquentation des îles par les oiseaux marins, comme les goélands (débris de nourriture, excréments, cadavres d'oiseaux, etc.) (Polis & Hurd 1995). Ces apports sont à l'origine de toute une chaîne alimentaire qui favorise entre autres les araignées, même dans des îles rocheuses dénudées où les ressources trophiques locales paraissent extrêmement faibles (Polis & Hurd 1995).

Cette étude fournit une liste inédite des espèces d'araignées identifiées durant l'automne 2023 sur les deux plus grandes îles de l'archipel du Frioul (Pomègues et Ratonneau) et sur l'île de Jarre (archipel de Riou) au sein du Parc national des Calanques à partir d'échantillons prélevés en 2009 et 2010 dans des pièges à arthropodes (pièges Barber) initialement mis en place dans le cadre d'une thèse de doctorat sur les fourmis (Berville 2013). De plus,

Keywords: Arachnids, Araneae, naturalist data, island, islet, pitfall trap, targeted surveys.

cette liste est complétée avec les espèces présentes sur des îles voisines, identifiées lors d'études précédentes ou par des naturalistes de passage (données compilées dans le cadre de cette étude). Cette étude permet ainsi de fournir une liste préliminaire, actualisée et commentée des araignées connues sur les îles du Parc national des Calanques.

Matériel et méthodes

Sites d'étude

Des données sur les araignées ont pu être recueillies sur neuf îles au sein du Parc national des Calanques. Les caractéristiques de ces dernières ainsi que leur localisation sont présentées sur le tableau 1 et la figure 1.

Tableau 1 – Caractéristiques des îles prospectées (Mutillod et al. 2023).

	Nom de l'île	Aire (ha)	Distance du continent (m)	Altitude maximale
Archipel du Frioul	Pomègues	89	2 800	86
	Ratonneau	95	1 800	74
	If	3	1 450	20
Archipel de Riou	Riou	90,3	3 100	190
	Maïre	27,6	50	141
	Plane	15	2 100	22
	Jarre	18	800	57
	Tiboulén de Maïre	2,3	525	47
NA	Planier	2	8 600	5



Figure 1 – Localisation des neuf îles du Parc national des Calanques dont il est question dans cette étude.

Origine des données

Les nouvelles données produites par cette présente étude proviennent de l'identification des araignées contenues dans des échantillons d'arthropodes prélevés dans des pièges Barber au cours de la thèse de doctorat de Laurence Berville ; cette thèse portait sur les fourmis et l'échantillonnage s'est fait en 2009 et 2010 sur les îles de Pomègues et Ratonneau (Frioul) et de Jarre (Riou) (Berville 2013). Le protocole d'échantillonnage est décrit dans la section suivante.

Afin de commenter et compléter les données issues de pièges Barber, d'autres données naturalistes des îles des archipels de Marseille ont été compilées. Tout d'abord, le Parc national des Calanques avait deux listes. Une première liste a été fournie par Michaël Dierkens suite à des échantillonnages effectués le 24 novembre 2007 sur les îles de Ratonneau et d'If lors de prospections ciblées sur les araignées (figure 1). Une seconde liste a été fournie par Philippe Ponel et Pierre Oger suite à des échantillonnages effectués le 8 juin 2012 sur le Tiboulon de Maïre et le 29 mars 2013 sur l'île d'If lors de prospections ciblées (figure 1). La méthode d'échantillonnage principale pour ces deux listes est la chasse à vue avec identification sous loupe binoculaire. Sur les îles d'If et du Planier, le tamisage de litière a aussi été pratiqué. Ensuite, nous avons bénéficié d'une liste fournie par un naturaliste de l'IMBE, Daniel Pavon, avec une observation sur l'île de Ratonneau et une observation sur l'île de Jarre. Enfin, nous avons interrogé trois bases de données en ligne sur l'ordre des Araneae pour l'ensemble des îles de Marseille (archipel de Riou et archipel du Frioul) le 10 janvier 2024 : 1) iNaturalist (iNaturalist 2023) ; 2) OpenObs de l'INPN, le portail français d'accès aux données d'observation sur les espèces (INPN 2023) ; 3) Silene PACA, plateforme régionale du Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (Silene-PACA 2023). Ces trois bases de données contiennent des données occasionnelles, mais également les données issues de prospections ciblées en ce qui concerne OpenObs et Silene (par exemple, les données issues des prospections ciblées de P. Ponel et P. Oger sur l'île du Planier). Le référentiel utilisé est TaxRef du Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (MNHN & OFB 2003-2024).

Méthodes de capture utilisée et identification

DONNÉES INÉDITES ISSUES DES PIÈGES BARBER

L'échantillonnage a été réalisé à l'aide de la méthode des pièges Barber (ou *pitfall traps*) mis en place dans le cadre d'une thèse portant sur la fourmi d'Argentine (Berville 2013). Le protocole détaillé ici est tiré d'un rapport d'étude antérieur (Berville 2011b). Chaque piège était composé d'un récipient en plastique mesurant 7 cm de profondeur et 3 cm de diamètre enterré de manière que son sommet affleure la surface du sol. Le récipient est rempli aux trois quarts d'un mélange non attractif de propylène glycol, choisi pour sa faible évaporation, ainsi que de quelques gouttes de liquide de vaisselle, utilisé comme agent tensioactif pour aider les arthropodes à couler au fond du piège. Chaque piège reste actif pendant 48 heures. Cette méthode d'échantillonnage permet d'obtenir un aperçu de l'entomofaune d'un site, en particulier des espèces qui se déplacent au sol. Elle présente l'avantage de ne pas introduire de biais de distribution liés à la sensibilité olfactive des arthropodes, offrant ainsi une estimation représentative de la faune active au sol. De plus, elle tient compte de la probabilité de captures aléatoires en fonction de la densité des arthropodes et de leur mobilité. Elle permet aussi de capturer des arthropodes nocturnes. Les pièges ont été installés en fonction des caractéristiques du milieu, suivant un réseau de transects comprenant chacun 10 pièges espacés de 10 mètres. Sur le Frioul, 150 pièges ont été posés les 29 et 30 septembre 2009 et 100 autres entre le 9 et le 11 juin 2010 avec environ un tiers des pièges sur Pomègues et deux tiers sur Ratonneau. Sur Jarre, 20 pièges ont été posés le 4 septembre 2010 (Berville 2011a).

Une fois au laboratoire, les échantillons ont été triés (coléoptères, fourmis, araignées, etc.) et conservés dans l'éthanol à 70 % (2009-2010). Durant l'automne 2023, les araignées ont été étudiées à la loupe binoculaire afin d'être identifiées jusqu'à l'espèce lorsque cela était possible (individus adultes, c'est-à-dire avec pédipalpes [mâles] ou épigyne [femelles] présent[s] et en bon état). Les identifications ont été réalisées par Martin Czyz et Christophe Mazzia. Pour ce faire, la famille a été identifiée grâce aux clés d'identification du livre de Roberts (2020). Ensuite, pour identifier jusqu'à l'espèce, pédipalpes ou épigynes

ont été comparés et identifiés grâce aux sites internet « Les araignées de Belgique et de France » (Oger 2023) et “*Araneae - Spiders of Europe*” (Nentwig *et al.* 2023). Le Parc national des Calanques est chargé de l’intégration de ces nouvelles données dans la base de données Silene-PACA.

AUTRES DONNÉES NATURALISTES

L’échantillonnage est considéré comme opportuniste s’il provient des bases de données en ligne (iNaturalist, OpenObs, Silene) à l’exception des données collectées par Philippe Ponel et Pierre Oger sur le Planier, qui sont issues de prospections ciblées. La chasse à vue, menée lors de prospections ciblées, a été pratiquée par Philippe Ponel (identification par Pierre Oger) pour le Tiboulen de Maire (8 juin 2012), l’île d’If (29 mars 2013) et l’île du Planier (31 mai 2017), par Michaël Dierkens sur les îles de Ratonneau et d’If (24 novembre 2007) et par Étienne Iorio sur l’île de Pomègues (début octobre 2011, prospection < 2 h aux environs du port). Cette méthode consiste donc à parcourir l’île et à identifier sur le terrain ou à capturer pour identification ultérieure le maximum d’espèces possibles (la capture peut se faire à l’aide d’un aspirateur à bouche par exemple). Si l’espèce est identifiable sur le terrain, alors elle est notée directement ; sinon, elle est capturée, conservée dans de l’éthanol à 70 %, puis identifiée à l’aide d’une loupe binoculaire et des clés d’identification. Enfin, le tamisage au tamis Winkler suivi de l’extraction sur appareil de Berlese a été réalisé sur certaines îles (Planier et If). Le tamis entomologique de Winkler (Colas, 1969), un tamis à grandes mailles (de 5 à 10 mm selon le milieu à échantillonner) muni d’une poche réceptrice en toile, est principalement utilisé pour le tamisage de la litière superficielle. Les accumulations de débris végétaux sont jetées par petites quantités dans le tamis, puis, au moyen de la poignée inférieure fixée à la grille, le contenu

du tamis est secoué vigoureusement. Cela permet de séparer les plus gros fragments des particules fines et des arthropodes convoités qui s’accumulent dans la poche inférieure. Après quelques dizaines de secondes de traitement, le contenu du tamis est éliminé et un nouvel échantillon de litière est introduit dans le tamis. Ce procédé permet d’éliminer les gros débris et de réduire considérablement le volume de matériaux à traiter. Au retour au laboratoire, les matériaux sont mis sur Berlese (Colas, 1969). L’appareil de Berlese est constitué d’un tamis circulaire à mailles de quelques millimètres, sous lequel se trouve un entonnoir surmontant un flacon collecteur. L’ensemble est suspendu ou posé sur un support et peut être complété par une source de chaleur, en général une lampe, pour accélérer la dessiccation. Le prélèvement de terre et litière est placé en couche fine sur la grille et est laissé en place jusqu’à sa dessiccation totale, ce qui peut prendre jusqu’à une quinzaine de jours. Au fur et à mesure de la déshydratation, la faune migre en profondeur, passe à travers la grille et tombe dans le flacon collecteur, rempli d’un liquide conservateur. Les arthropodes sont ensuite triés sous loupe binoculaire.

Résultats

Données inédites issues des pièges Barber

Jarre

Une nouvelle espèce a été identifiée dans les pièges Barber installés sur l’île de Jarre (archipel de Riou) : *Zodarion elegans* (Zodaridae). Avant cette étude, deux espèces avaient déjà été recensées (tableau 2). Ainsi, au total, seulement trois espèces, appartenant à trois familles différentes, ont été enregistrées sur cette île.

Tableau 2 – Comparaison des espèces trouvées dans différents cadres sur l’île de Jarre.

Famille	Genre	espèce	Pavon	Bazin	pièges Barber
Araneidae	<i>Argiope</i>	<i>lobata</i>		1	
Theridiidae	<i>Steatoda</i>	<i>triangulosa</i>	1		
Zodariidae	<i>Zodarion</i>	<i>elegans</i> *			1 (F)

* L’espèce est la nouvelle trouvée dans les pièges Barber, donc une donnée nouvelle pour le Parc national des Calanques. Les descripteurs des espèces et les codes TaxRef (MNHN & OFB, 2003-2024) sont disponibles dans l’annexe.

RATONNEAU ET POMÈGUES

L'identification des araignées sur l'île du Frioul (composée du Ratonneau et de Pomègues) à partir des pièges Barber de l'étude de Berville (2011b) a permis de dénombrer un total de 65 araignées adultes ainsi que 82 juvéniles et 17 individus abîmés. Sur Pomègues, 10 individus adultes ont été identifiés, appartenant à deux espèces : 9 individus de *Bassaniodes bliteus* et 1 individu de *Pelecopsis inedita*. Sur Ratonneau, 55 individus adultes ont été identifiés, appartenant à 16 espèces : *Alopecosa albofasciata* (1 individu), *Bassaniodes bliteus* (9), *Heser nilicola* (3), *Lycosoides coarctata* (2), *Marinarozelotes barbatus* (1), *Microctenonyx subitaneus* (1), *Nomisio celerrima* (1), *Oecobius maculatus* (1), *Palliduphantes sanctivincenti* (1), *Pelecopsis inedita* (10), *Pellenes arciger* (2), *Thanatus atratus* (1), *Thanatus vulgaris* (8), *Zelotes callidus* (1), *Zodarion pusio* (2) et *Zodarion elegans* (11) (tableau 3).

Au total, 16 espèces d'araignées ont été identifiées sur les îles du Frioul. Parmi celles-ci, une seule, *Lycosoides coarctata*, avait été signalée précédemment, lors de la prospection ciblée effectuée par M. Dierkens sur Ratonneau. Les autres données issues des prospections ciblées (réalisées par E. Iorio sur Pomègues) et des observations naturalistes occasionnelles ne présentent aucune espèce en commun (tableau 3). En considérant l'ensemble des données disponibles, 35 espèces d'araignées ont été recensées sur les îles du Frioul entre 2007 et 2023. Parmi celles-ci, 19 espèces n'ont pas été retrouvées dans les pièges Barber (tableau 3).

Données naturalistes recueillies en ligne

Vingt entrées naturalistes ont été enregistrées sur la plateforme Silene : une sur Jarre, deux sur Maïre, trois sur Plane, cinq sur Pomègues et neuf sur Riou. Parmi ces observations, treize concernent *Argiope lobata* (Araneidae) (toutes les observations de Jarre, Maïre et Plane + sept observations sur Riou). Les sept autres espèces identifiées ont été observées une seule fois chacune : sur Pomègues (*Cyrrba algerina*, *Filistata insidiatrix*, *Hogna radiata*, *Liophrurillus flavitarsis*, *Phlegra bresnieri*), lors d'une prospection ciblée par E. Iorio début octobre 2011, ou sur Riou (*Mizaga*

racovitzai : 1960, *Steatoda triangulosa* : 18 mars 2009) (annexe).

Vingt-deux entrées naturalistes ont été enregistrées sur la plateforme OpenObs, dont six identiques à celles de Silene. Parmi les seize observations exclusivement disponibles sur OpenObs, cinq ne disposent pas de coordonnées suffisamment précises pour être attribuées à une île (les données sont seulement au niveau de la maille). Parmi les onze observations restantes, une a été faite sur Riou (*Argiope lobata* : 3 août 2008), une sur Ratonneau (*Argiope lobata* : 22 juillet 2023) et neuf sur l'île du Planier (*Ariadna gallica*, *Chalcoscirtus infimus*, *Enoplognatha mandibularis*, *Evarcha jucunda*, *Heser nilicola*, *Menemerus semilimbatus*, *Psilochorus simoni*, *Spermophora senoculata*, *Steatoda grossa*), collectées lors d'une prospection ciblée par P. Ponel et P. Oger le 31 mai 2017 (annexe).

Sept entrées naturalistes ont été faites sur iNaturalist : deux sur l'île nord du Frioul, Ratonneau (*Argiope lobata* : 2 août 2018 ; *Hogna radiata* : 27 septembre 2021) et quatre sur l'île sud du Frioul, Pomègues (*Argiope lobata* : 23 juillet 2018 et 15 août 2023 ; *Hogna radiata* vue 2 fois le 23 septembre 2023). Une entrée a été faite sur iNaturalist pour l'île de Riou (*Phlegra bresnieri* : 6 juin 2022) (annexe).

Synthèse des données par île (prospections ciblées + données occasionnelles)

If

Sur l'île d'If, la chasse à vue effectuée par M. Dierkens, P. Ponel et P. Oger a permis d'identifier 21 espèces d'araignées appartenant à douze familles d'araignées (annexe).

Neuf espèces n'ont été trouvées que sur l'île d'If : *Crustulina scabripes*, *Enoplognatha diversa*, *Gibbaranea bituberculata*, *Mecopisthes peusi*, *Pelecopsis bucephala*, *Pseudeuophrys lanigera*, *Scotophaeus scutulatus*, *Silhouettella loricatula* et *Synema globosum*. Sept espèces sont présentes sur l'île d'If et de Ratonneau : *Alopecosa albofasciata*, *Amaurobius erberi*, *Dysdera crocata*, *Lycosoides coarctata*, *Microctenonyx subitaneus*, *Scotophaeus validus* et *Scytodes thoracica*. Les espèces *Bassaniodes bliteus* et *Pelecopsis inedita* ont été trouvées sur les îles d'If, Ratonneau et Pomègues. Deux

Tableau 3 – Comparaison des espèces trouvées dans différents cadres sur les îles du Frioul (Ratonneau et Pomègues).

Famille	Genre	espèce	Pièges Barber	Dierkens	Iorio	Pavon	INat.
Lycosidae	<i>Alopecosa</i>	<i>albofasciata</i> *	1 (F)				
Amaurobiidae	<i>Amaurobius</i>	<i>erberi</i>		1			
Araneidae	<i>Argiope</i>	<i>lobata</i>					1
Thomisidae	<i>Bassaniodes</i>	<i>bliteus</i> *	18 (17M 1F)				
Salticidae	<i>Cyrrba</i>	<i>algerina</i>			1		
Dysderidae	<i>Dysdera</i>	<i>crocata</i>		1			
Filistatidae	<i>Filistata</i>	<i>insidiatrix</i>		1	1		
Gnaphosidae	<i>Heser</i>	<i>nilicola</i> *	3 (2M 1F)				
Lycosidae	<i>Hogna</i>	<i>radiata</i>			1		1
Phrurolithidae	<i>Liophrurillus</i>	<i>favatarsis</i>			1		
Sicariidae	<i>Loxosceles</i>	<i>rufescens</i>		1			
Agelenidae	<i>Lycosoides</i>	<i>coarctata</i>	2 (1M 1F)	1			
Gnaphosidae	<i>Marinarozelotes</i>	<i>barbatus</i> *	2 (M)				
Linyphiidae	<i>Microctenonyx</i>	<i>subitaneus</i> *	1 (M)				
Gnaphosidae	<i>Nomisia</i>	<i>celerrima</i> *	1 (M)				
Oecobiidae	<i>Oecobius</i>	<i>maculatus</i> *	1 (M)				
Oonopidae	<i>Oonops</i>	<i>pulcher</i>		1			
Linyphiidae	<i>Palliduphantes</i>	<i>sanctivincenti</i> *	1 (F)				
Linyphiidae	<i>Pelecopsis</i>	<i>inedita</i> *	11 (2M 9F)				
Salticidae	<i>Pellenes</i>	<i>arciger</i> *	2 (M)				
Salticidae	<i>Phlegra</i>	<i>bresnieri</i>			1		
Gnaphosidae	<i>Scotopheus</i>	<i>validus</i>		1			
Scytodidae	<i>Scytodes</i>	<i>velutina</i>		1			
Scytodidae	<i>Scytodes</i>	<i>thoracica</i>				1	
Theridiidae	<i>Steatoda</i>	sp.				1	
Theridiidae	<i>Steatoda</i>	<i>nobilis</i>		1			
Theridiidae	<i>Steatoda</i>	<i>triangulosa</i>		1			
Agelenidae	<i>Tegenaria</i>	<i>parietina</i>		1			
Philodromidae	<i>Thanatus</i>	<i>atratus</i> *	1 (M)				
Philodromidae	<i>Thanatus</i>	<i>vulgaris</i> *	8 (6M 2F)				
Thomisidae	<i>Xysticus</i>	sp.		1			
Gnaphosidae	<i>Zelotes</i>	<i>callidus</i> *	1 (M)				
Zodariidae	<i>Zodarion</i>	<i>pusio</i> *	2 (1M 1F)				
Zodariidae	<i>Zodarion</i>	<i>elegans</i> *	10 (4M 6F)				
Zoropsidae	<i>Zoropsis</i>	<i>spinimana</i>		1			
TOTAL	identifiés	à l'espèce	16	12	5	1	2

* Les espèces ont été découvertes exclusivement dans les pièges Barber, constituant ainsi de nouvelles données pour le Parc national des Calanques. Les descripteurs des espèces et les codes TaxRef (MNHN & OFB 2024) sont disponibles dans l'annexe.

espèces sont présentes sur les îles d'If et du Planier (*Enoplognatha mandibularis* et *Evarcha jucunda*) alors qu'une espèce est présente sur les îles d'If et du Tiboulon de Maïre (*Heliophanus kochii*) (tableau 2).

Maïre

Deux observations d'araignées sur l'île de Maïre ont été signalées sur Silene, toutes deux concernant la même espèce : *Argiope lobata*. Ces observations ont eu lieu en 2008 et 2017.

Tableau 4 – Comparaison des espèces trouvées sur l'ensemble des îles prospectées dans le Parc national des Calanques.

	Archipel du Frioul												
			If		Pomègues			Ratonneau					
	Nb d'îles	Nb d'ind.	PC_Dierkens	PC_Ponel-Oger	Barber	INat.	PC_lorio	Barber	INat.	OO > 2012	Pavon		PC_Dierkens
<i>Aelurilus v-insignitus</i>	1	4											
<i>Alopecosa albofasciata</i>	2	2		1				1					
<i>Amaurobius erberi</i>	2	4	1	2								1	
<i>Argiope lobata</i>	6	18				2			1	1			
<i>Ariadna gallica</i>	1	1											
<i>Bassaniodes bliteus</i>	3	19	1		9			9					
<i>Chalcoscirtus infimus</i>	2	7											
<i>Crustulina scabripes</i>	1	6		6									
<i>Cyrba algerina</i>	1	1					1						
<i>Dysdera crocata</i>	2	5	1	3								1	
<i>Enoplognatha diversa</i>	1	1		1									
<i>Enoplognatha mandibularis</i>	2	9		8									
<i>Evarcha jucunda</i>	2	3		2									
<i>Filistata insidiatrix</i>	2	2					1					1	
<i>Gibbaranea bituberculata</i>	1	1		1									
<i>Heliophanus kochii</i>	2	3		2									
<i>Heser nilicola</i>	2	4						3					
<i>Hogna radiata</i>	2	4				2	1		1				
<i>Liophrurillus flavitarsis</i>	1	1					1						
<i>Loxosceles rufescens</i>	1	1										1	
<i>Lycosoides coarctata</i>	2	10	1	6				2				1	
<i>Marinarozelotes barbatus</i>	1	2						2					
<i>Mecopisthes peusi</i>	1	1		1									
<i>Menemerus semilimbatus</i>	1	1											
<i>Microctenonyx subitaneus</i>	2	13		12				1					
<i>Mizaga racovitza</i>	1	1											
<i>Nomisia celerrima</i>	2	7						1					
<i>Oecobius maculatus</i>	1	1						1					
<i>Oonops pulcher</i>	1	1										1	
<i>Palliduphantes sanctivincenti</i>	1	1						1					
<i>Pelecopsis bucephala</i>	1	61		61									
<i>Pelecopsis inedita</i>	3	15		4	1			10					
<i>Pellenes arciger</i>	1	2						2					
<i>Phlegra bresnieri</i>	2	2					1						
<i>Pritha nana</i>	1	2											
<i>Pseudeuophrys lanigera</i>	1	1		1									
<i>Psilochorus simoni</i>	1	1											
<i>Scotophaeus scutulatus</i>	1	1		1									

Archipel de Riou

	Archipel du Frioul												
			If		Pomègues			Ratonneau					
	Nb d'îles	Nb d'ind.	PC_ Dierkens	PC_ Ponel- Oger	Barber	INat.	PC_ lorio	Barber	INat.	OO > 2012	Pavon		PC_ Dierkens
<i>Scotophaeus validus</i>	2	2	1									1	
<i>Scytodes thoracica</i>	2	5	1	3							1		
<i>Scytodes velutina</i>	1	1										1	
<i>Silhouettella loricatula</i>	1	1		1									
<i>Spermophora senoculata</i>	1	1											
<i>Steatoda grossa</i>	2	2											
<i>Steatoda nobilis</i>	1	1										1	
<i>Steatoda triangulosa</i>	3	3										1	
<i>Synema globosum</i>	1	1		1									
<i>Tegenaria parietina</i>	1	1										1	
<i>Textrix caudata</i>	1	2											
<i>Thanatus atratus</i>	1	1						1					
<i>Thanatus vulgaris</i>	2	11						8					
<i>Zelotes callidus</i>	1	1						1					
<i>Zelotes tenuis</i>	1	2											
<i>Zelotes thorelli</i>	1	1											
<i>Zodarion elegans</i>	2	12						11					
<i>Zodarion pusio</i>	1	2						2					
<i>Zoropsis spinimana</i>	1	1										1	

Les chiffres dans les colonnes correspondent au nombre d'individus relevés lors des différentes prospections. La colonne « Nb d'îles » indique le nombre total d'îles où chaque espèce est présente. La colonne « Nb d'ind. » indique le nombre total d'individus échantillonnés sur les neuf îles. Les colonnes « Barber » indiquent les individus échantillonnés par pièges Barber. Les colonnes « Pavon » indiquent les individus des listes personnelles de D. Pavon. Les colonnes « PC_Dierkens », « PC_lorio », « PC_Ponel-Oger » indiquent les individus échantillonnés lors de prospections ciblées par M. Dierkens, E. Iorio ou P. Ponel. Les colonnes « INat. » indiquent les individus enregistrés sur la plateforme iNaturalist. Les colonnes « OO » indiquent les individus enregistrés sur la plateforme OpenObs, soit pour la période de 2000 à 2012 (OO_2000-2012), soit pour la période de 2012 au 10 janvier 2024 (OO > 2012). Les colonnes « Sil » indiquent les individus enregistrés sur la plateforme Silene, pour la période avant 2000 (Sil < 2000), pour la période de 2000 à 2012 (Sil_2000-2012) ou pour la période de 2012 au 10 janvier 2024 (Sil > 2012). Les descripteurs des espèces et les codes TaxRef (MNHN & OFB, 2024) sont disponibles dans l'annexe.

	Archipel de Riou													
	Jarre			Maïre		Plane		Planier	Riou					Tiboulén de Maïre
	Barber	Pavon	Sil_2000-2012	Sil_2000-2012	Sil > 2012	Sil/OO_2000-2012	Sil_2000-2012	PC_Ponel-Oger	INat.	OO_2000-2012	Sil/OO_2000-2012	Sil_2000-2012	Sil < 2000	PC_Ponel-Oger
								1						
								1						1
		1								1				
														2
														3
														2
														1
	1													

Plane

Sur cette île, une seule espèce, *Argiope lobata*, a été identifiée à trois reprises. Ces données, provenant des bases de données en ligne OpenObs et Silene, datent de 2008.

Planier

Neuf espèces ont été identifiées sur l'île du Planier grâce à la prospection ciblée réalisée par P. Ponel et P. Oger le 31 mai 2017. Quatre espèces, à savoir *Ariadna gallica*, *Menemerus semilimbatus*, *Psilochorus simoni* et *Spermophora senoculata* ont été trouvées uniquement sur cet îlot. Les espèces *Chalcoscirtus infimus* et *Steatoda grossa* se retrouvent également sur le Tiboulén de Maïre tandis que *Enoplognatha mandibularis* et *Evarcha jucunda* ont été trouvées sur l'île d'If. Enfin, *Heser nilicola* est aussi observée sur l'île de Ratonneau.

Riou

Quatre espèces d'araignées ont été identifiées sur l'île de Riou à partir des données provenant des trois bases de données en ligne (OpenObs, iNaturalist et Silene). Ces observations, toutes de nature occasionnelle, couvrent trois périodes distinctes. *Mizaga racovitzai* a été recensée une fois en 1960 tandis que *Phlegra bresnieri* a été recensée une fois en 2023. *Argiope lobata* a été observée huit fois et *Steatoda triangulosa* une fois, entre 2008 et 2010.

Tiboulén de Maïre

La prospection ciblée pratiquée par P. Ponel sur le Tiboulén de Maïre le 8 juin 2012 a permis d'identifier dix espèces. Parmi celles-ci, six espèces n'ont été trouvées que sur cet îlot : *Aelurillus v-insignitus*, *Heliophanus kochii*, *Pritha nana*, *Textrix caudata*, *Zelotes thorelli* et *Zelotes tenuis*. *Nomisio celerrima* et *Thanatus vulgaris* ont également été trouvées sur l'île de Ratonneau alors que *Chalcoscirtus infimus* et *Steatoda grossa* ont été identifiées sur l'île du Planier.

Les espèces recensées dans les îles du Parc national des Calanques

Au total, 59 espèces ont été recensées sur au moins une des neuf îles prospectées (tableau 4). L'île de Ratonneau se distingue avec le plus grand nombre d'espèces, totalisant 30 espèces, suivie par l'île d'If avec

21 espèces. Les autres îles comptent respectivement 10 espèces pour le Tiboulén de Maïre, 9 pour le Planier et 8 pour Pomègues (tableau 4).

Les espèces les plus fréquemment observées sont *Pelecopsis bucephala* (61 individus), *Bassaniodes bliteus* (19), *Argiope lobata* (18), *Pelecopsis inedita* (15) et *Microctenonyx subitaneus* (13) (tableau 4). *Pelecopsis bucephala*, une petite araignée de la famille des Linyphiidae, a été observée en 61 exemplaires, tous recensés sur l'île d'If par P. Ponel et P. Oger. *Bassaniodes bliteus*, une Thomisidae de taille moyenne, a été trouvée avec 19 individus : neuf sur l'île de Pomègues, neuf sur l'île de Ratonneau, tous capturés dans des pièges Barber, et un sur l'île d'If observé par M. Dierkens. *Argiope lobata* (Araneidae), la plus grande araignée recensée, est notable pour sa grande toile, ce qui la rend très visible et facile à identifier. Elle a été observée 18 fois sur six des neuf îles échantillonnées (à l'exception de l'île d'If, de l'île du Planier et du Tiboulén de Maïre). *Pelecopsis inedita* (15 individus) et *Microctenonyx subitaneus* (13 individus), deux petites Linyphiidae mesurant moins de 2 mm, ont été trouvées sur les îles d'If, de Pomègues et de Ratonneau, grâce à des prospections ciblées (P. Ponel et P. Oger) ou dans des pièges Barber. Deux espèces, *Aculepeira armida* et *Thanatus arenarius*, recensées dans OpenObs, n'ont pas de localisation suffisamment précise pour être attribuées à une île spécifique (données enregistrées par maille).

Discussion

Espèces

Les espèces les plus fréquemment inventoriées lors des échantillonnages ponctuels sont principalement celles qui fabriquent des toiles ou qui sont de grande taille. Parmi ces espèces, *Argiope lobata* se distingue par sa taille remarquable (femelle mesurant en moyenne 21,2 mm ; Nentwig *et al.* 2023) et a été observée 21 fois sur iNaturalist, OpenObs et Silene, en dehors des prospections ciblées par E. Iorio, P. Ponel et P. Oger. Cette araignée, qui tisse de grandes toiles dans la végétation, est facilement repérable en raison de sa taille et de son comportement. *Aculepeira armida* (femelle : 15,0 mm ; Nentwig *et al.* 2023), également de grande taille et connue pour

ses toiles dans la végétation, a été recensée une fois. *Hogna radiata*, une autre araignée de taille considérable (femelle : 18,8 mm), est souvent trouvée se déplaçant au sol, avec trois individus observés. *Bassaniodes bliteus* (Thomisidae), pourtant de taille moyenne (femelle mesurant environ 5,8 mm ; Nentwig *et al.* 2023), est la deuxième espèce la plus recensée (19 individus) : cela est dû à son abondance dans les pièges Barber sur les îles de Pomègues et de Ratonneau, en particulier.

Les petites espèces sont majoritairement échantillonnées par les prospections ciblées, notamment lors des tamisages et dans les pièges Barber. C'est le cas de l'ensemble des Linyphiidae, Oecobidae et Oonopidae échantillonnées sur les îles d'If et de Ratonneau. Située à 80 km du Parc national des Calanques, l'île de Bagaud, appartenant au Parc national de Port-Cros, a fait l'objet d'une étude dans laquelle les échantillonnages d'araignées ont été effectués par pièges Barber. De nombreux individus de ces familles ont également été trouvés (Braschi *et al.* 2021). Ainsi, les espèces *Microctenonyx subitaneus* (Linyphiidae) et *Silhouettella loricatula* (Oonopidae) sont à la fois mentionnées dans le Parc national de Port-Cros (Braschi *et al.* 2021) et dans le Parc national des Calanques (tableau 4). Les espèces *Pelecopsis inedita* et *Palliduphantes sanctivincenti* (Linyphiidae) sont également présentes dans les deux parcs (Parc national de Port-Cros – données non publiées – et tableau 4). Alors que *Oecobius navus* (Oecobidae) a été identifiée sur Bagaud (Braschi *et al.* 2021), *Oecobius maculatus* a été identifié dans le Parc national des Calanques. *Pelecopsis bucephala* (Linyphiidae) n'a été observée que dans le Parc national des Calanques.

Une seule espèce est commune aux échantillonnages par pièges Barber et aux autres types de prospection : *Lycosoides coarctata*. Cette araignée de taille moyenne (femelle : 10,3 mm ; Nentwig *et al.* 2023) est relativement facile à repérer lors de chasses à vue. *Lycosoides coarctata* fréquente une grande variété d'habitats (Trotta 2019), se déplace au sol et est donc également facilement capturée dans les pièges Barber. Cette espèce n'a pourtant pas été échantillonnée sur l'île de Bagaud (Braschi *et al.* 2021).

Effort d'échantillonnage

Les îles les mieux prospectées pour les araignées dans le Parc national des Calanques sont celles ayant bénéficié de prospections ciblées, telles que les îles d'If, de Ratonneau, du Tiboulou de Maire et du Planier ainsi que celles où un grand nombre d'araignées ont été retrouvées dans les pièges Barber (Berville 2011a, b), notamment les îles de Pomègues et de Ratonneau. Il n'est donc pas surprenant de trouver une plus grande richesse en espèces sur Ratonneau (30 espèces), If (21 espèces), Tiboulou de Maire (10 espèces), Planier (9 espèces) et Pomègues (8 espèces).

Ratonneau, qui possède le plus grand nombre d'espèces, bénéficie du plus grand effort de prospection. Elle a été prospectée de manière ciblée par M. Dierkens en 2001 et des pièges Barber ont été installés en 2009 et 2010 (Berville 2011b). La chasse à vue, pratiquée sur cette île, permet de capturer des araignées dans divers habitats, y compris les plantes, le sol et sous les pierres, en particulier des espèces diurnes, comme les Salticidae. Les pièges Barber complètent cet effort en échantillonnant principalement les espèces lapidoterricoles, qu'elles soient nocturnes ou diurnes. De plus, Ratonneau est accessible au public, avec trois entrées sur OpenObs et iNaturalist. L'île d'If, qui possède la deuxième richesse la plus élevée, a été l'objet de deux prospections ciblées : une en 2007 par M. Dierkens et une autre en 2013 par P. Ponel et P. Oger. Cette attention accrue explique en partie sa richesse en espèces.

En revanche, on aurait pu s'attendre à une richesse plus élevée pour l'île de Pomègues, qui est reliée à Ratonneau par une digue et possède une superficie comparable (respectivement 89 et 95 ha). L'île de Pomègues a également bénéficié des pièges Barber installés en 2009 et 2010 (Berville 2011b) et d'une prospection ciblée par E. Iorio en 2011, bien que cette dernière ait été de courte durée (< 2 h) et localisée autour du port (données présentes sur Silene et en partie sur OpenObs). L'île est également accessible au public, comptabilisant quatre entrées sur iNaturalist. Cependant, l'effort d'échantillonnage par pièges Barber a été moins important sur Pomègues que sur Ratonneau. De plus, Ratonneau est une île habitée, avec un port, un village et quelques jardins favorisant ainsi une plus grande diversité d'habitats : c'est sur cette île qu'a été trouvée, par exemple, l'espèce synanthropique *Thanatus vulgaris* (8 individus).

Jarre a fait l'objet de captures d'araignées avec des pièges Barber, mais ils étaient peu nombreux (20 pièges contre 376 sur les îles de Pomègues et Ratonneau). L'île n'est pas accessible au public et n'a pas fait l'objet de prospections ciblées. Il n'est donc pas étonnant que la richesse observée y soit faible (3 espèces).

Autres hypothèses pour expliquer les différences de richesse

Sur les neuf îles échantillonnées, la richesse spécifique varie de 1 à 30 espèces. Comme cela a été mentionné précédemment, les différences de richesse sont principalement dues aux efforts d'échantillonnage. Cependant, plusieurs autres facteurs doivent également être mentionnés.

Selon la théorie de biogéographie insulaire, le nombre d'espèces sur une île est dépendant du nombre d'habitats disponibles, lequel est lui-même dépendant de la surface de l'île (MacArthur & Wilson 2001). Cette théorie a été confirmée pour les araignées sur vingt îles de Macaronésie où la diversité des espèces est corrélée à la taille et à la diversité des habitats (Cardoso *et al.* 2010). D'autres facteurs liés à la taille des îles, tels que la topographie, influencent également le nombre d'habitats, créant une variété de microclimats, de végétation et de ressources. Les conditions insulaires imposent des défis particuliers : une exposition au vent, au soleil, aux embruns et une disponibilité de ressources souvent limitée. Par exemple, l'île Plane, qui culmine à 22 m (Mutillod *et al.* 2023), est caractérisée par de nombreuses zones basses exposées aux embruns. En revanche, Ratonneau, culminant à 86 m (Mutillod *et al.* 2023), présente une topographie plus variée, créant une plus grande diversité d'habitats naturels, complétée par des habitats anthropiques tels que jardins, maisons et port. Ainsi, on pourrait s'attendre à une plus grande richesse spécifique sur Ratonneau comparée à Plane à condition que les efforts d'échantillonnage soient proportionnels à la taille de chaque île. Il est important de noter que l'île Plane n'a jamais été prospectée de manière systématique ; seules trois observations opportunistes y ont été recensées. Ce manque d'effort d'échantillonnage systématique sur Plane pourrait expliquer en partie la faible richesse spécifique observée par rapport à des îles comme Ratonneau, où les conditions

écologiques variées et les efforts de prospection plus intenses ont permis d'identifier une plus grande diversité d'espèces.

Toujours d'après la théorie de la biogéographie insulaire proposée par MacArthur et Wilson (2001), l'éloignement géographique d'une île par rapport au continent peut expliquer une diminution de la richesse spécifique, car la colonisation par les espèces terrestres est alors plus difficile. Cette théorie a également été confirmée pour les araignées sur les vingt îles de Macaronésie, où la distance par rapport au continent a été corrélée à la richesse spécifique (Cardoso *et al.* 2010). À surface comparable, on pourrait donc s'attendre à trouver plus d'espèces sur l'île de Ratonneau (95 ha), qui est située à environ 1,8 km du continent, que sur l'île de Riou, distante d'environ 3 km (Mutillod *et al.* 2023). Cependant, cette hypothèse ne peut pas être pleinement vérifiée dans le contexte de cette étude, car Riou n'a fait l'objet que de onze observations opportunistes, tandis que Ratonneau a bénéficié d'une prospection ciblée et de la pose de pièges Barber. L'effort d'échantillonnage plus intensif sur Ratonneau pourrait donc expliquer en partie la plus grande richesse spécifique observée, rendant difficile la distinction des effets d'éloignement géographique sur la richesse des espèces.

Une autre hypothèse à considérer est celle de la connexion avec le continent. Pomègues, Ratonneau et If ont une riche histoire liée à la présence humaine, aux activités maritimes et militaires. Elles sont également accessibles par des navettes régulières, ce qui pourrait faciliter l'arrivée et la dispersion des espèces, y compris les araignées. Le transport de voyageurs et de marchandises au fil du temps pourrait avoir favorisé l'introduction et l'établissement de nouvelles espèces sur ces îles. Par exemple, la présence de l'espèce synanthropique *Thanatus vulgaris* sur Ratonneau pourrait suggérer une influence anthropique et une introduction liée aux activités humaines. En outre, le fait que ces îles soient accessibles par navettes régulières permet également une prospection plus fréquente et plus facile par des naturalistes. Les données disponibles sur des plateformes comme iNaturalist montrent un nombre plus élevé d'échantillonnages ponctuels pour Pomègues et Ratonneau que pour les autres îles qui nécessitent une autorisation spécifique du Parc national des Calanques pour être visitées. Cette accessibilité accrue peut donc expliquer en partie la richesse spécifique plus élevée observée sur

ces îles, en raison de l'effort de prospection plus important et des opportunités accrues pour la collecte de données. En somme, la connexion avec le continent *via* des navettes régulières et l'accessibilité des îles jouent probablement un rôle significatif dans la diversité des espèces observées, influençant à la fois les processus de colonisation et les opportunités de prospection.

Conclusion et perspectives

Cette étude fournit une première liste des espèces d'araignées recensées sur neuf îles du Parc national des Calanques, totalisant 59 espèces. Cependant, en raison de la variation considérable dans l'effort d'échantillonnage entre les différentes îles, il est difficile d'effectuer des comparaisons fiables. Cette disparité complique l'évaluation précise du nombre réel d'espèces présentes et la corrélation avec des facteurs géographiques tels que la taille des îles et leur distance par rapport au continent. Cette étude met en évidence le manque de données sur la biodiversité des araignées des îles du Parc national des Calanques. En particulier, l'archipel de Riou apparaît comme sous-exploré, avec une couverture de prospection insuffisante qui limite notre compréhension de sa richesse spécifique. Une augmentation des efforts de prospection sur ces îles, notamment celles moins bien échantillonnées comme Riou, est essentielle pour obtenir une vue plus complète et précise de la biodiversité aranéologique dans cette région.

La pose des pièges Barber sur Jarre, Pomègues et Ratonneau n'ayant pas été initialement prévue pour une étude spécifique, il est recommandé de revoir et d'améliorer le protocole d'échantillonnage pour couvrir un éventail plus large d'habitats propices aux araignées sur toutes les îles. Nous avons constaté, particulièrement sur Ratonneau, que la combinaison de techniques de collecte, telles que le piégeage et la chasse à vue, permet d'identifier une diversité plus grande d'espèces. Pour obtenir une vue d'ensemble complète de la biodiversité arachnologique, il serait donc idéal d'utiliser plusieurs méthodes d'échantillonnage sur toutes les îles et îlots. Cela inclurait non seulement le piégeage et la chasse à vue, mais aussi le battage de la végétation avec un parapluie japonais, l'aspiration de la végétation basse et de la litière avec

un aspirateur thermique (voir par exemple Malumbres Olarte, 2010). Cependant, il est crucial de prendre en compte que les pièges Barber ne sont pas spécifiques aux araignées et peuvent capturer divers autres invertébrés, ainsi que potentiellement de petits vertébrés tels que les lézards. L'utilisation de petits entonnoirs pourrait éviter ces dernières prises, sans régler le problème de la capture non spécifique des invertébrés. Les avantages de l'utilisation de ces pièges doivent donc être pesés contre leurs inconvénients. Par exemple, l'étude conjointe d'autres groupes présents dans les pièges Barber est à prendre en considération. Pour minimiser leur impact négatif sur la biodiversité, il pourrait être envisagé de réduire le temps de pose des pièges. De plus, la pose de pièges Barber n'est pas toujours possible sur tous les îlots, notamment ceux qui sont très rocheux ou manquent de profondeur de sol. Les pièges peuvent également être endommagés par les rats et les goélands, nécessitant des ajustements tels que des agrafes pour sécuriser les pièges, bien que cela complique la collecte des échantillons. En résumé, il est essentiel de choisir des techniques complémentaires pour échantillonner le plus grand nombre possible de groupes fonctionnels d'araignées, y compris les espèces tissant des toiles et celles vivant dans des environnements lapidoterricoles, ainsi que les araignées diurnes et nocturnes. Une approche méthodologique diversifiée et soigneusement planifiée maximisera la couverture des habitats et la représentation des espèces dans les échantillons.

Annexe

Liste des espèces d'araignées présentes sur neuf îles du Parc national des Calanques (Pomègues, Ratonneau, If, Riou, Maire, Plane, Jarre, Tiboulén de Maire, Planier): données issues des pièges Barber et données issues de diverses sources (bases de données, listes personnelles, etc.).

<https://doi.org/10.5281/zenodo.14791169>

Remerciements

Nous tenons à remercier l'ensemble des personnes qui a contribué à l'étude des araignées sur les îles du Parc national des Calanques et qui a partagé ses données avec le parc, le CEN-PACA ou sur des sites participatifs.

Bibliographie

- Berville, L. (2011a). *Contribution à l'inventaire myrmécologique des îles de l'Archipel de Riou*. CNRS/IMEP. <https://hal.science/hal-03864593>
- Berville, L. (2011b). *Inventaire myrmécologique & Études de la capacité d'invasion, de dispersion et de contrôle de la fourmi d'Argentine (Linepithema humile) sur les îles du Frioul*. Région Provence-Alpes-Côte d'Azur/CNRS/IMEP. <https://hal.science/IMEP/hal-04650374v1>
- Berville, L. (2013). *La fourmi d'Argentine (Linepithema humile) face à une fourmi dominante du genre Tapinoma en milieu insulaire : écologie chimique, comportement et dynamique d'invasion*. Thèse de doctorat d'Aix-Marseille Université et Institut méditerranéen de la biodiversité et d'écologie marine et continentale, 310 p. <https://hal.science/tel-03956610>
- Braschi, J., Héléard, O., Mazzia, C., Oger, P., Ponel, P., Buisson, E. (2021). Impacts of the removal of invasive *Carpobrotus* on spider assemblage dynamics. *Biodiversity & Conservation* 30, 497-518 <https://doi.org/10.1007/s10531-020-02102-6>
- Cardoso, P., Arnedo, M. A., Triantis, K. A. & Borges, P. A. V. (2010). Drivers of diversity in Macaronesian spiders and the role of species extinctions. *J. Biogeogr.* 37(6), 1034-1046. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2009.02264.x>
- Colas, G. (1969). *Guide de l'entomologiste*. Boubée, Paris.
- Cronk, Q.C.B. (1997). Islands: stability, diversity, conservation. *Biodivers. Conserv.* 6(3), 477-493. <https://doi.org/10.1023/A:1018372910025>
- Fernández-Palacios, J.M., Kreft, H., Irl, S. D. H., Norder, S., Ah-Peng, C., Borges, P. A. V. et al. (2021). Scientists' warning – The outstanding biodiversity of islands is in peril. *Global Ecology and Conservation* 31, e01847. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01847>
- Fürst, P.A., Mulhauser, G. & Pronini, P. (1993). Possibilités d'utilisation des araignées en écologie-conseil. *Bollettino accademia gioenia scienze naturali* 26(345), 107-113.
- Gros-Désormeaux, J.-R. (2012). La biodiversité dans des territoires insulaires, approche théorique et perspectives de développement. *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie* 3(1). <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.9241>
- Hodkinson, I.D., Coulson, S.J., Harrison, J. & Webb, N.R. (2001). What a wonderful web they weave: spiders, nutrient capture and early ecosystem development in the high Arctic – some counter-intuitive ideas on community assembly. *Oikos* 95(2), 349-352. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2001.950217.x>
- iNaturalist (2023). *iNaturalist*. <https://www.inaturalist.org>
- INPN (2023). *Portail français d'accès aux données d'observation sur les espèces*. <https://openobs.mnhn.fr/>
- Kier, G., Kreft, H., Lee, T.M., Jetz, W., Ibsch, P.L., Nowicki, C., Mutke, J. & Barthlott, W. (2009). A global assessment of endemism and species richness across island and mainland regions. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 106(23), 9322-9327. <https://doi.org/10.1073/pnas.0810306106>
- Kueffer, C., & Kinney, K. (2017). What is the importance of islands to environmental conservation? *Environ. Conserv.* 44(4), 311-322. <https://doi.org/10.1017/s0376892917000479>
- MacArthur, R.H. & Wilson, E.O. (2001). *The Theory of Island Biogeography, Revised édition*. Princeton University Press, Princeton.
- Maelfait, J.-P. & Baert, L. (1988). Les araignées sont-elles de bons indicateurs écologiques? *C. R. X^{ème} Coll. europ. Arachnol., Bull. Soc. sci. Bretagne* 59, n° h.s. 1, 155-160.
- Malumbres Olarte, J. (2010). *Spider diversity and ecology in native tussock grasslands of the South Island, New Zealand*. PhD Thesis, Lincoln University, Christchurch, New Zealand.
- Médail, F. (2017). The specific vulnerability of plant biodiversity and vegetation on Mediterranean islands in the face of global change. *Reg. Environ. Change* 17, 1775-1790. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1123-7>
- MNHN & OFB (ed). (2003-2024). *Inventaire national du patrimoine naturel* (INPN). <https://inpn.mnhn.fr>
- Mutillod, C., Baumberger, T., Prudent, P., Saatkamp, A., Vidal, E., Le-Mire-Pecheux, L., & Affre, L. (2023). Yellow-legged gull populations (*Larus michahellis*) link the history of landfills to soil eutrophication and time-related vegetation changes on small Mediterranean islands. *Sci. Total Environ.* 878, 162948. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162948>
- Nentwig, W., Blick, T., Bosmans, R., Gloor, D., Hänggi, A., Kropf, C. & Stäubli, A. (2023). *Spiders of Europe*. Version 12.2023. <https://www.araneae.nmbe.ch>. <https://doi.org/10.24436/1>
- Oger, P. (2023). *Les araignées de Belgique et de France*. <https://arachno.piwigo.com>
- Polis, G.A. & Hurd, S.D. (1995). Extraordinarily high spider densities on islands: flow of energy from the marine to terrestrial food webs and the absence of predation. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 92, 4382-4386.
- Roberts, M.J. (2020). *Araignées de France et d'Europe*. Delachaux et Niestlé, Paris.
- Silene-PACA (2023). *Plateforme régionale du Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel*. <https://silene.eu/>
- Trotta, A. (2019). Note on spiders collected in coastal habitats and first Italian record of *Chaerea maritimus* (Arachnida, Araneae). *BELS – Bulletin of Environmental and Life Sciences* 1, 33-36.
- Veron, S., Mouchet, M., Govaerts, R., Haeveermans, T. & Pellens, R. (2019). Vulnerability to climate change of islands worldwide and its impact on the tree of life. *Sci. Rep.* 9, 14471. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-51107-x>
- Walsh, J.C., Venter, O., Watson, J.E.M., Fuller, R.A., Blackburn, T.M. & Possingham, H.P. (2012). Exotic species richness and native species endemism increase the impact of exotic species on islands. *Global Ecol. Biogeogr.* 21(8), 841-850. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2011.00724.x>

Environmental impact on the macrobenthic communities' structure and diversity along the southern part of the Gulf of Tunis

Running head: Gulf of Tunis Macrobenthic communities

Balkis AISSI¹, Wafa BOULAJFENE^{1,*}, Ammar EL MLAYAH², Sabiha TLIG-ZOUARI¹

1. Université Tunis El Manar II 2092, Tunis, Tunisie/Faculté des sciences de Tunis, Laboratoire de recherche biodiversité, parasitologie et écologie des écosystèmes aquatiques, Tunisie.

2. Technopôle de Bordj Cedria, 273, Soliman 8020, Centre de recherches et des technologies des eaux - Laboratoire de Géo-Ressources, Tunisie.

*Corresponding author: wboulajfene@gmail.com - 0021625389066

Abstract

This work constitutes a benthos diversity analysis in relation to abiotic parameters along the southern part of the Gulf of Tunis during the spring/summer of 2016. Some physical parameters, total organic matter, and metal and nutrient contents were measured and the granulometry was analyzed. In addition, some biotic indicators were estimated and crossed to classify the sites according to their disturbance rate. Granulometry examination allowed distinguishing two sediment fractions whereas the cumulative semi-logarithmic curves indicated the heterogeneity of the sediments along the study area. The organic matter analysis showed a normal sediment state at all the sites. The spatial variations of metal contents were insignificant whereas seasonal variations were pronounced only for zinc and cadmium. The study of biotic parameters and a similarity test suggested that granulometry, pH, salinity, metal contents, and nutrient salts did not significantly contribute to the organization of the communities' assemblages. The analysis of dissimilarity revealed the species contributing to the distinction between sites based on sand type, pH, salinity, nutrient salts, and metallic contamination. The deterioration of the water quality caused the azoic state of two of the sites due to orthophosphate enrichment in the first locality and high currents in the second one.

Keywords: Benthos, macroinvertebrate assemblages, abiotic parameters.

Introduction

Shorelines constitute a large ecotone (contact zone between the land and the sea) highly exposed to environmental and maritime impacts, allowing the existence of diverse, complex, and productive ecological systems (Lacaze 1993). The increase in anthropogenic activities generate deep modifications and multiple challenges in coastal ecosystems, particularly massive urbanization, chemical and agricultural industrialization, and biodiversity erosion requiring the protection of remaining natural sites (Oueslati 2004). This author suggested that the increase in urbanization and coastal use leads to acute erosion problems and coastal fringe regression with considerable economic, ecological, aesthetic, and ethical effects (Oueslati 2004). The Gulf of Tunis is an area highly affected by this anthropization and has thus become subjected, in addition to strong natural forcing, to annually-increasing anthropogenic pressures. Urban and industrial development constitutes the main source of discharges released in the Gulf, dating back more than thirty years (Boulajfene *et al.* 2015, Oueslati 2004). These discharges contain a variety of compounds (organic matter, pesticides,

fertilizers, trace metals, nutrients, etc.) which are generally transported by large wadis such as Wadi Medjerda and Wadi Meliane and by urban water drainage canals as well as by coastal lagoons and sebkhas (Ennouri *et al.* 2013). The Rades area, for example, is currently considered a significant source of pollution. Bousoufa (2012) estimated that a huge amount of wastewater is daily evacuated to this area from urban discharges and industrial activities that cross Wadi Meliane and finally emerge at Rades Beach.

Benthic macroinvertebrates are sedentary or poorly mobile organisms directly linked to the substrate and prone to assimilate the variations of their environment. Thus, they play an essential role in assessing variations in the state of the coastal environments (Diawara *et al.* 2008, Tlig-Zouari *et al.* 2009, 2010). Some researchers (Ayari & Afi 2003) have focused on the macro-benthic communities of the Gulf of Tunis and established a biotic inventory of the benthos in the Tunis Bay (southernmost part of the Gulf). Then, Zaabi & Afi (2006) studied the ecological and behavioral characteristics of polychete annelids facing some disturbances in the Gulf. In addition, Chemekhi (2013) focused on analyzing the diversity of macroinvertebrates from the northwestern part of the Gulf of Tunis and reported that the granulometry of surface sediment strongly influenced this diversity.

From an eco-toxicological point of view, certain researchers have focused on the impact of xenobiotics (metallic, chemical, organic substances) on some organisms in the Gulf. Bousoufa *et al.* (2007) used the bivalve mollusc *Donax trunculus* as an indicator of the coastal water quality in the Gulf of Tunis, since the metal pollution is important there. Ennouri *et al.* (2013) studied metal contamination in two different species of fish: red mullet (*Mullus barbatus*) and sardinella (*Sardinella aurita*) from the Gulf of Tunis. Furthermore, Boulajfene *et al.* (2017, 2019) reported a strong metal contamination in two gastropods *Phorcus turbinatus* and *Phorcus articulatus* in three localities in the Gulf of Tunis. In addition, Boulajfene *et al.* (2015) studied the chemical contamination by tributyltin (TBT) of the gastropod *Stramonita haemastoma* living in the rocky mid-littoral of the Gulf of Tunis and its impact on its reproduction. The contamination reported seems to be at the origin of a sexual anomaly, translated in a disruption of metabolic processes and by

the development of male sexual characteristics in transformed females. The continuous and alarming deterioration of the coastal biodiversity of the Gulf of Tunis on the first hand, and the fragmentary and limited scope of the works related to the impact of pollution on benthic macroinvertebrates in the southern part of the Gulf, on the other hand, have led us to undertake a study of the abiotic traits and of the diversity of macrobenthic communities in this area, supposing that communities and ecosystems are there suffering from the impact of anthropogenic activities. The coastlines in proximity to industrial activities, several sewage discharge and large public dumps are expected to be the most polluted and to display less biodiversity and specific richness.

The main objective of this study was to analyze the spatiotemporal changes in the benthic communities and relate them to natural and human-related abiotic variables by evaluating the impact of certain environmental factors on the macrobenthic communities' assemblages along the study area.

Material and methods

This work was performed during spring (cool period at the beginning of the season) and summer of 2016 (dry and hot period). In total, ten sites (Rades Beach (S6, S7), Ezzahra (S5), Hammam Lif (S4, S3), Hammam Chatt (S8), Ber El Bey (S9), Borj El Cedria (S1), Soliman (S2) and Port Aux Princes (S10)) were chosen according to their proximity to a source of pollution (urban or industrial) and the nature of their bottom (soft or hard substrata) (Figure 1). Some environmental characteristics such as the type of substratum and the exposure to waves were noted by referring to the works carried out in the study localities (Prunus & Pantoustier 1974, Ben Charrada & Moussa 1997, Tlig-Zouari *et al.* 2010, 2011) and using the scale adopted by Ballantine (1961).

Sampling

The benthic macrofauna was sampled randomly at low tides, in about 0.5m water depth. In the sites with a soft bottom, sampling of the first ca. 2cm layer was carried out using a quadrat of 0.25m² of surface. In addition, a

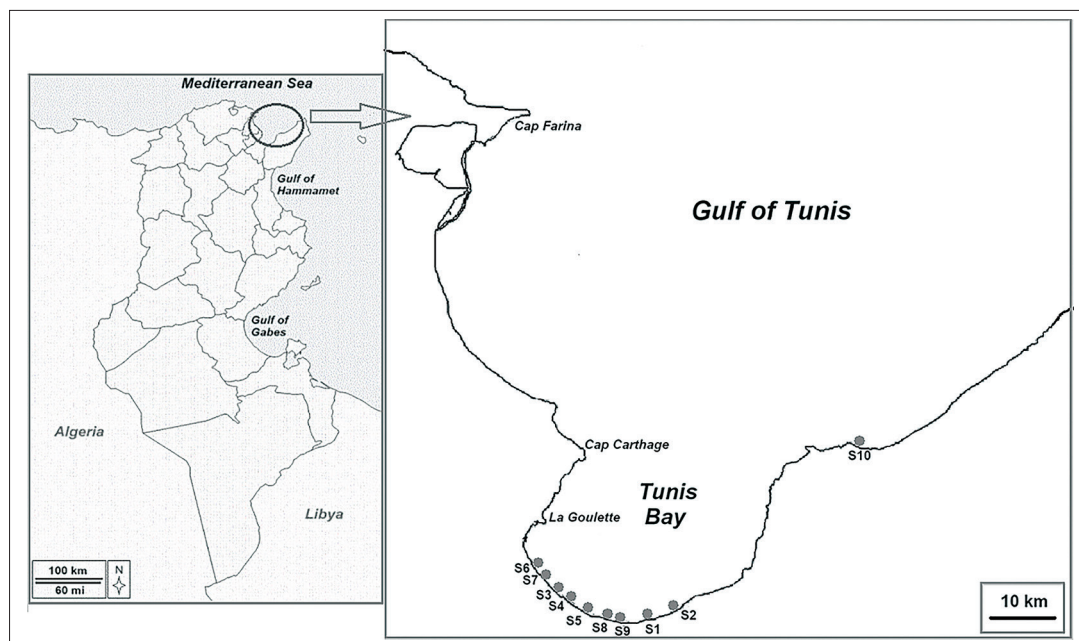


Figure 1 – The distribution of surveyed sites along the Gulf of Tunis.

core barrel of 0.2m diameter and 0.45m length was also used. Five replicates for each device were performed at each locality over the same surface of approximately 300m² (Boulajfene & Tlig-Zouari 2016, Tlig-Zouari *et al.* 2010). As for the sites with bedrock, only the quadrat was used and the fauna was scraped within it. In parallel, measurements of the physical parameters (pH and salinity) were executed in situ using a portable pH meter type 3110 SET 2 WTW and a salinometer type Cond 315i/SET. The sediment samples were taken using the core barrel for particle size analysis and for the determination of the total organic matter content as well as the metal content. In order to analyse the nutrient content, sea-water samples were taken at 0.3-0.5m from the water surface at each site in a 1l polypropylene bottle placed in a portable cooler. The samples were then stored at +4°C.

Abiotic parameters

In the laboratory, all the samples were sieved using a 0.5mm vacuum mesh sieve. Wet sieving was first performed on a 63µm sieve to separate a pelitic fraction (<63µm) and a fraction greater than 63µm which was passed, after drying at 60°C, through a series of seven sieves (type AFNOR) (empty mesh diameters of 2mm, 1mm, 630µm, 500µm, 250µm, 125µm, 80µm) for 15 min. Each sieve residue was weighed and the particle size

analysis was then determined by cumulative semi-logarithmic curves (Rivière, 1977). Four sedimentary fractions were distinguished according to the classification methods of Chassé and Glémarec (1976): Pelites (PEL) ≤ 63µm, 63µm < Fine sands (SF) ≤ 500µm, 500µm < Coarse sands (SG) ≤ 2000µm and Gravels (G) > 2000µm.

The organic matter content of the surface sediment was determined using the “fire loss” method using a muffle furnace (6 hours of incineration at 450°C) (Luczak *et al.* 1997). It was then estimated according to the formula:

$$\text{TOM (\%)} = \sum_1^n \frac{P1K - P2K}{P1K} \times 100$$

with K: the number of replicates, P1: The dry weight in gr, P2: The weight of the sediment without organic matter.

As for the classification of the sediment according to organic matter, it was carried out according to Hily (1984).

In addition, an assay of six metals (Cd, Fe, Ni, Cu, Zn, and Pb) was carried out in the fraction of sediment greater than 63µm by the aqua regia method using an atomic absorption spectrophotometer (SAA) of type AS 800 according to the method of Bouquegneau & Martoja (1982). The metal content (mg/kg) was determined from the final concentration of the sample:

$$C \text{ (mg/kg)} = \frac{C1.v}{P.D}$$

with C1: concentration of the sample solution (mg/L), V: final volume of the dosed solution (ml), P: weight of the sediment sample (g), D: dilution factor (Bouqueneau & Martoja, 1982).

In parallel, the water content in nutrients (in mg/L) was estimated, by colorimetry, in the 24 hours following the sampling according to the method of Rodier *et al.* (1984) using a PerkinElmer LAMBDA 25 UV/VIS SPECTROMETER molecular absorption spectrophotometer and a variant flame photometer. The nutrient salts assayed were Nitrates NO_3^- (at 415nm), nitrites NO_2^- (at 543nm), orthophosphates PO_4^{3-} (at 880nm), chlorides (Trimetric method of Mohr, 1956), sulfates (Nephelometric method), carbonates and bicarbonates, sodium Na^+ , potassium K^+ , calcium Ca^{2+} , and magnesium Mg^{2+} (Pelloux *et al.* 1971, Rodier *et al.* 1984).

Biotic parameters

Samples were fixed with formalin (7%) and the benthic macrofauna taxonomy, identification and counting were performed with the naked eye or under a binocular microscope (LEICA EZ4), using the following guides and publications Fauvel (1927), Riedl (1983), Campbell *et al.* (1986), Fischer *et al.* (1987), MNHN-LBIMM (2011) and the web site DORIS (2016). This identification allowed the specific richness (SR) and abundance (A) determination at each site and during the two study seasons. The trophic groups of the macroinvertebrates were determined according to Grall & Glémarec (1997), Diawara *et al.* (2008), and Tlig-Zouari *et al.* (2009). The ecological groups were assembled following the classification of Glémarec & Hily (1981) based on the reactions of benthic macrofauna to disturbances:

- Group I (GI): species sensitive to eutrophication, the first to disappear when disturbed. These are selective carnivores, suspension feeders and a few subsurface deposit feeders.
- Group II (GII): species indifferent to organic matter enrichment. Mainly poorly-selective carnivores and scavengers.
- Group III (GIII): species tolerant to organic matter enrichment. Mostly tube-dwelling deposit feeders.
- Group IV (GIV): secondary opportunistic species taking advantage in polluted areas. Mostly cirratulid polychaetes.

- Group V (GV): primary opportunistic species dominating highly polluted areas. Essentially deposit feeders.

Subsequently, the use of different diversity indices permitted the analysis of the community structure and the assessment of the ecological state of the communities living in this ecosystem. Indeed, based on the defined ecological groups, two stress indicators were evaluated namely the AMBI and the Bentix indices specifying the ecological state of benthic communities and their degrees of disturbance (azoic; seriously polluted; moderately polluted; slightly polluted or not polluted).

AMBI index provides a series of continuous values ranging from 0 to 7 and was calculated according to the formula (Borja *et al.*, 2000):

$$\text{AMBI} = ((0\% \text{ GI}) + (1.5\% \text{ GII}) + (3\% \text{ GIII}) + (4.5\% \text{ GIV}) + (6\% \text{ GV})) / 100$$

Bentix index (BI) is a simplified variant of the AMBI, providing a series of continuous values from 0 to 6. It was calculated as follows (Simboura & Zenetos, 2002):

$$\text{BENTIX} = (6\% \text{ GI} + 2\% (\text{GII} + \text{GIII})) / 100$$

The Shannon index:

$$H' = -\sum (N_i/N) \cdot \log_2(N_i/N)$$

with N_i : number of individuals of a given species, N: total number of individuals, H' varies from zero to $\log_2 S$ with S: specific richness.

Allows to describe the distribution of individuals between the different species (Grall & Coïc 2006) and can contribute to evaluating the ecological state of ecosystems according to Simboura & Zenetos (2002) classification. The evenness ($0 < J < 1$) allows to compare different communities or the same group at different periods (Grall & Coïc 2006). It is expressed as follows:

$$J = H' / \log_2 S$$

with H' : specific diversity: $\log_2 S = H'_{\max}$; S: specific richness.

Statistics

The significance of the differences between the studied variables was verified by Kruskal-Wallis test using Statgraphics software (absence of normality and homogeneity of variances). Multivariate analyses, namely the Bray-Curtis dendrogram and the non-parametric Multidimensional analysis (MDS) were established using the Primer software

(V6) using the abundance estimated at an area of 1m² previously transformed into log (x + 1) in order to reduce the effect of the most abundant species (Clarke *et al.* 2006). In addition, similarity analysis (ANOSIM) and Simper's test were performed to check if there is a significant difference between two or more groups of sampling units and to determine the contribution of the studied abiotic parameters and of each species to the dissimilarity between groups (Clarke & Warwick 1994, Clarke *et al.* 2006).

Results

Abiotic parameters

The physical parameters measurements were summarized in Table 1. The analysis of the granulometry allowed the separation of two fractions of the sediment composition: a first less than 63µm representing the clay content and a second greater than 63µm consisting of a mixture of fine/coarse sand, debris of shells, and gravel (Table 2). The analysis of the total organic matter (TOM) revealed rates that do not exceed 5% indicating that the sediments are in a normal state at all the sites. The highest content was noted at S9 (3.55%) while the lowest one was recorded at S10 (0.6%) (Figure 2).

Concerning the metal contents evaluated during the spring and summer of 2016, they were summarized in Table 3. The spatial variations of metal concentrations (Zn, Cd, Fe, Ni, Pb, Cu) were not significant (*p-value* = 0.314; 0.856; 0.291; 0.37; 0.155; 0.985 respectively). Seasonal variations were only pronounced for zinc and cadmium. Indeed, during summer Zn content decreased significantly (*p-value* = 0.004) while that of Cd increased significantly (*p-value* = 0.002). Note that a disappearance of Cd was noted in the spring at the site (S2). Regarding the remaining metals, their variation was not significant depending on the season (*p-value* = 0.325; 0.879; 0.449; 0.226 respectively).

The evaluation of nutrient salts in the water revealed an average concentration of nitrates equal to $8.05 \pm 0.61 \text{ mg.L}^{-1}$, during the spring, ranging between 9.49 mg.L^{-1} at S1 and 7.24 mg.L^{-1} at S10. A slight increase in the nitrate content was observed during summer, with an average concentration

Table 1 – Physical parameters in the southern part of the Gulf of Tunis during spring and summer 2016.

	Spring 2016	Summer 2016
pH	8.16 ± 0.01 from 7.84 (S7) to 8.35 (S10)	8.11 ± 0.03 from 8 (S4) to 8.24 (S1)
Salinity	33.84 ± 3.10 from 24.40 (S7) to 35.20 (S8)	34.70 ± 1.50 from 30.12 (S7) to 36.30 (S2)

(Mean value $\pm$ standard deviation; from minimum to maximum; salinity (‰)).

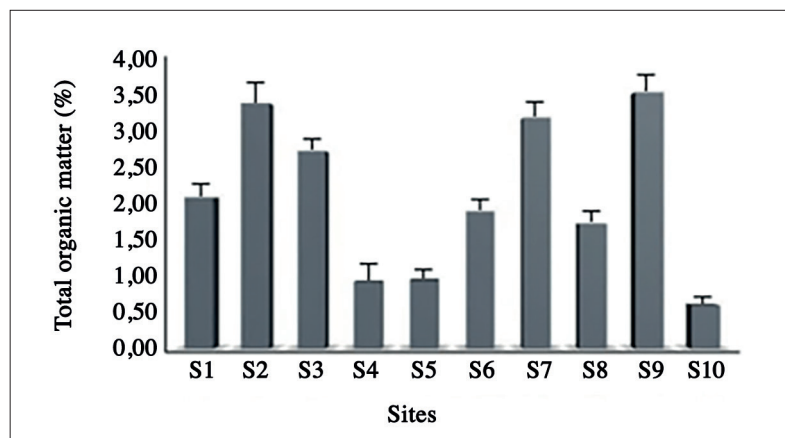


Figure 2 – Spatial distribution of the total organic matter content in the sediments in the various sites (S1 to S10) of the southern part of the Gulf of Tunis (2016).

of $9.07 \pm 1.09 \text{ mg.L}^{-1}$. The highest value (11.33 mg.L^{-1}) was recorded at S7 while the minimum (8.24 mg.L^{-1}) was recorded at S10. The average nitrite content was $0.03 \pm 0.05 \text{ mg.L}^{-1}$ during the spring ranging between a maximum of 0.20 mg.L^{-1} (S7) and a minimum of 0.003 (S10). During summer, the average concentration was estimated to be $0.024 \pm 0.01 \text{ mg.L}^{-1}$. Its minimum was noted at S5 (0.06 mg.L^{-1}) and its maximum (0 mg.L^{-1}) was recorded at S10. As for orthophosphates, their average concentration was equal to $0.0175 \pm 0.04 \text{ mg.L}^{-1}$ during the spring. It fluctuates between 0.0001 mg.L^{-1} at S10 and 0.176 mg.L^{-1} at S7. During the summer, the average concentration was $0.036 \pm 0.08 \text{ mg.L}^{-1}$ fluctuating between a maximum (0.167 mg.L^{-1}) recorded at S7 and zero at S10.

As for the major elements, their different contents recorded during the two seasons are shown in Table 4. The spatial variations of the concentrations of anions (*p-value* = 0.998) and of cations (*p-value* = 0.971) were not significant. As for their seasonal variations, they were only significant for the HCO_3^- , K^+ , Ca^{2+} , and Mg^{2+} ions (*p-value* = 0.0009; 0.02; 0.004 and 0.01 respectively).

Table 2 – Sediment fraction in the southern part of the Gulf of Tunis during spring and summer 2016.

Sites	Fraction <63µm (%)		Fraction >63µm (%)				
	Lutites		Sand		Total	Gravel	Pebbles
			0,2-0,5mm Fine Sand	0,5-2mm Coarse Sand			
S1	0.54		96.01	1.69	98.24	0.32	0
S2	0.54		92.37	4.11	97.02	2.74	0
S3	0.23		94.76	1.36	96.36	2.44	0
S4	0.73		76.77	12.82	90.32	9.84	0
S5	0.46		81.32	13.76	95.54	4.64	0
S6	0.26		93.24	6.18	99.67	0.09	0
S7	0.72		82.15	16.54	99.41	0.47	0
S8	0.52		96.85	2.47	99.84	0.07	0
S9	0.55		90.72	8.03	99.30	0.57	0
S10	0.67		88.96	9.69	99.32	0.17	0

Table 3 – The concentrations of metals in the sediment at different sites of the southern Gulf of Tunis, in mg.kg⁻¹ (spring, summer 2016).

Sites	Spring 2016						Summer 2016					
	Fe	Zn	Ni	Pb	Cu	Cd	Fe	Zn	Ni	Pb	Cu	Cd
S1	3187.5 ±172.58	100.5 ±21.36	29.75 ±3.32	31.3 ±3.18	7.05 ±1.46	1.25 ±0.18	1892.5 ±77.12	499 ±32.07	55.8 ±6.71	76.55 ±4.39	461.45 ±26.17	3.85 ±0.17
S2	1902.5 ±93.11	40.45 ±5.39	29.1 ±4.42	28.75 ±2.76	4 ±0.97	0	1882.5 ±64.89	80.25 ±13.48	45.5 ±2.73	18.4 ±1.68	12.55 ±1.14	2.6 ±0.04
S3	1300 ±62.14	190.5 ±22.51	26 ±4.06	24 ±1.37	5.35 ±0.66	0.6 ±0.08	4767.5 ±267.14	26.95 ±3.72	28.55 ±2.91	36.2 ±3.13	49.35 ±3.66	2.3 ±0.17
S4	7562.5 ±342.21	139 ±17.66	28.2 ±3.73	27.4 ±3.64	5.95 ±1.13	0.9 ±0.1	7650 ±304.31	23.15 ±2.26	6.7 ±1.42	21.15 ±1.17	6.95 ±0.93	2.65 ±0.33
S5	2675 ±172.63	186.5 ±20.19	27.45 ±3.92	24.25 ±1.92	4.9 ±1.04	0.6 ±0.09	7740 ±268.35	21.85 ±2.46	28.1 ±2.1	22.9 ±1.48	5.25 ±0.46	2.3 ±0.21
S6	2570 ±188.11	96.75 ±16.82	30.55 ±2.68	26.15 ±2.07	4.95 ±0.86	2.55 ±0.36	7055 ±224.16	18.5 ±2.13	3.6 ±0.62	19.05 ±1.77	7.9 ±0.79	1.9 ±0.18
S7	4665 ±228.13	173 ±16.01	33.2 ±4.35	30.45 ±2.74	6.5	1 ±0.02	4140	21.15	39.75	46.25	6.9	3.25
S8	6877.5 ±287.95	186 ±27.4	24.35 ±2.1	22.55 ±2.31	5.25 ±0.48	2.35 ±0.12	4690 ±271.14	18.1 ±1.74	22.7 ±1.61	30.8 ±2.61	4.35 ±0.42	2.2 ±0.06
S9	6755 ±274.33	161 ±16.42	28.9 ±2.36	27.4 ±1.96	4.8 ±0.37	1.4 ±0.08	2717.5 ±222.04	12.75 ±1.19	26.4 ±0.82	18.35 ±1.14	3.45 ±0.51	2.65 ±0.09
S10	1032.5 ±76.38	46.65 ±3.13	25.1 ±1.74	25 ±2.08	3.45 ±0.16	1.55 ±0.12	2937.5 ±137.89	6.2 ±0.63	84.5 ±4.13	3.5 ±0.59	2.7 ±0.4	2.2 ±0.04
Average concentration	3852.7 ±189.75	132.03 ±16.68	28.26 ±3.26	26.72 ±2.4	5.22 ±0.79	1.35 ±0.12	4547.25 ±204.11	72.79 ±6.63	34.16 ±2.56	29.31 ±1.99	56.1 ±3.83	2.59 ±0.14

Table 4 – Sediments of the southern Gulf of Tunis. Anion and cation content in mg.L⁻¹ (spring, summer 2016).

Sites	Spring 2016							Summer 2016						
	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
S1	27216.7	2690.03	10	11713.5	57.5	40.08	97.2	21300	2386.3	49.333	11302.1	38.98	43.28	77.76
S2	24731.7	2701.77	30.667	11522.4	55.56	54.50	106.92	28518.3	2306.1	41.733	11150.1	48.73	36.87	87.48
S3	20826.7	2520.20	34	11056.5	55.56	55.04	162	22601.7	2744.9	47.333	11750.5	68.22	48.09	92.34
S4	23430	2306.30	30	10886.9	55.56	51.83	184.68	23666.7	2068.3	48.667	11487.3	29.24	24.04	72.9
S5	22246.7	2388.90	36	11836.3	62.38	57.71	90.72	22010	2610.7	48.667	11497.1	29.24	48.09	77.76
S6	18696.7	2354.50	22.66	10933.7	50.68	69.47	104.32	22720	2312.5	30.667	11848	38.98	75.35	67.06
S7	13845	1469.07	39.33	9013.65	38.99	76.95	52.16	16685	1742	66	9162.77	38.986	44.88	50.54
S8	24140	2738.83	36	11823.6	59.45	75.88	79.05	20590	2579.3	70.66	11955.2	48.733	33.66	72.9
S9	23075	2513.43	36	11746.4	54.58	88.17	73.22	19880	2402.9	42.66	11355.2	58.480	48.09	65.12
S10	24258.3	2323.57	25.33	11789.5	57.50	77.48	96.87	25915	2404.1	38	11672.5	38.986	46.49	58.32
Average concentration	22246.68	2400.66	30	11232.24	54.77	64.71	104.71	22388.67	2355.71	48.37	11318.07	43.85	44.88	72.21

Table 5 – Summary table of indices (H', E, ITI, AMBI, BENTIX) at 10 sites (S1 to S10) in the southern part of the Gulf of Tunis.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Spring 2016										
Specific richness	7	7	3	3	3	4	0	2	0	7
H'	2.4	2.46	1.53	1.55	1.46	1.89	-	0.99	-	2.59
	0	0	0	0	0	0	-	0	-	0
J	0.85	0.87	0.97	0.98	0.92	0.94	-	0.99	-	0.92
	0	0	0	0	0	0	AZ	0	AZ	0
ITI	58.34	58.34	100	77.78	100	66.67	-	33.34	-	100
	+	+	0	0	0	+	AZ	+	AZ	0
AMBI	1.8	1.8	0.6	2.3	0.5	1.2	-	1.2	-	0.4
	+	+	0	0	0	+	AZ	0	AZ	0
BENTIX	3.4	3.4	4.4	3.5	4.7	3.6	-	3.6	-	5
	++	++	0	0	0	+	AZ	+	AZ	0
Results	+	+	0	0	0	+	AZ	+	AZ	0
Summer 2016										
Specific richness	4	4	6	4	4	4	1	3	0	7
H'	1.98	1.96	2.38	1.90	1.96	1.35	0.00	1.41	0	2.40
	0	0	0	0	0	0	-	0	-	0
J	0.99	0.98	0.92	0.95	0.98	0.68	0	0.89	0	0.86
	0	0	0	0	0	0	-	0	-	0
ITI	55.56	55.56	77.78	83.33	66.67	55.56	-	100	-	100
	+	+	0	0	0	0	AZ	0	AZ	0
AMBI	2.6	2.6	0.9	0.8	2.1	2.7	1.5	0.6	-	0.6
	+	+	0	0	+	+	+	0	AZ	0
BENTIX	2.9	2.9	4.4	5	3.4	2.4	2	4.4	-	4.4
	+	+	0	0	+	++	+++	0	AZ	0
Results	+	+	0	0	+	++	+++	0	AZ	0

Biotic parameters

Total abundance of macrofauna, estimated along the southern part of the Gulf of Tunis, was equal to 673 ind/m². Molluscs represented the most abundant phylum with 504 ind/m² (75.40%), then the annelids with 140 ind/m² (21.0%), and arthropods with 27 ind/m² (3.6%). The specific richness relating to each season in each site is given in Table 5.

Shannon index, all seasons combined, ranged between 0 recorded at S7, S9 and 3.5 reported at S10. In summer, H' oscillated between 1.351 at S6 and 2.635 at S10. The spatial variations of this index among seasons were given (Table 5). As for the evenness (J), its maximum, all seasons combined, was 0.97 (S5) while its lowest value (0.85) was noted at S6 (Mouth of the Sebkhah of Rades).

The study of the trophic groups of the benthic communities allowed classifying the species into six groups: surface deposit feeders (Ds), carnivores (C), scavengers (N), suspension feeders (S), herbivores (H), and micro grazers (μ G). The distribution of these different groups in terms of abundance, during the spring,

showed that surface deposit feeders, suspension feeders, scavengers, and carnivores are the most widespread in the majority of the surveyed sites. The other groups ($H = 57.3\%$ and $\mu G = 18.5\%$) were observed only at S10. During the summer, suspension feeders and surface deposit feeders were reported to be the most abundant at the majority of the sites except S7 where the scavengers were dominant. This group was weakly represented at S6 and S8. As for carnivores, they were encountered only at three sites and were predominant at S8 (48.5%). At S10, the herbivores were dominant (60.7%) followed by the micro grazers (24.1%), nevertheless, a slight presence of carnivores (9.6%) and suspension feeders (5.6%) was noted at this site.

The investigation of the spatial variation of ecological groups suggested the existence of four ecological groups (GI, GII, GIII, GIV) along the shores studied. Their spatial distribution according to abundance during the spring showed that GI was represented in all the sites with a maximum representation (69.4%) at S10 (Port Aux princes). It was less represented at the mouth of the Sebkhah of Rades (S6) (25.7%). The GIII was quantitatively dominant at S1 (41.7%) and S2 (45.4%). The GII was present in all the sites with variable proportions whereas the GIV was poorly represented. It was reported only at S1 (18.9%), S2 (10.8%), S4 (24.7%) and S6 (25.7%). This same analysis performed during the summer, showed that GI was present in all the sites except S7. It was particularly dominant at S3 (82.5%), S4 (54.5%), S5 (60%), S8 (59.2%) and S10 (61.7%). GII was only found at five sites S3 (17.7%), S6 (2%), S8 (40.8%), and S10 (38.7%), and was dominant at S7 (100%) while GIII was mainly encountered at S6 (45%). As for GIV, it was noted only at S1 (22%), S5 (22.7%), S4 (20%), S6 (40%) and S2 (16.9%). All the variations of the estimated indices are summarized in Table 5

The application of the nonparametric multidimensional analysis (nMDS) for all the sites except the azoic localities (S7 and S9 in spring and S9 in summer), allowed to separate the sites into two groups, for both seasons, namely the GI represented by S10 and the GII including the remaining sites (Figure 3).

Results provided by the similarity test (ANOSIM: the number of permutations = 252), suggested that the granulometry does not significantly contribute to the organization of the assemblages of the benthic

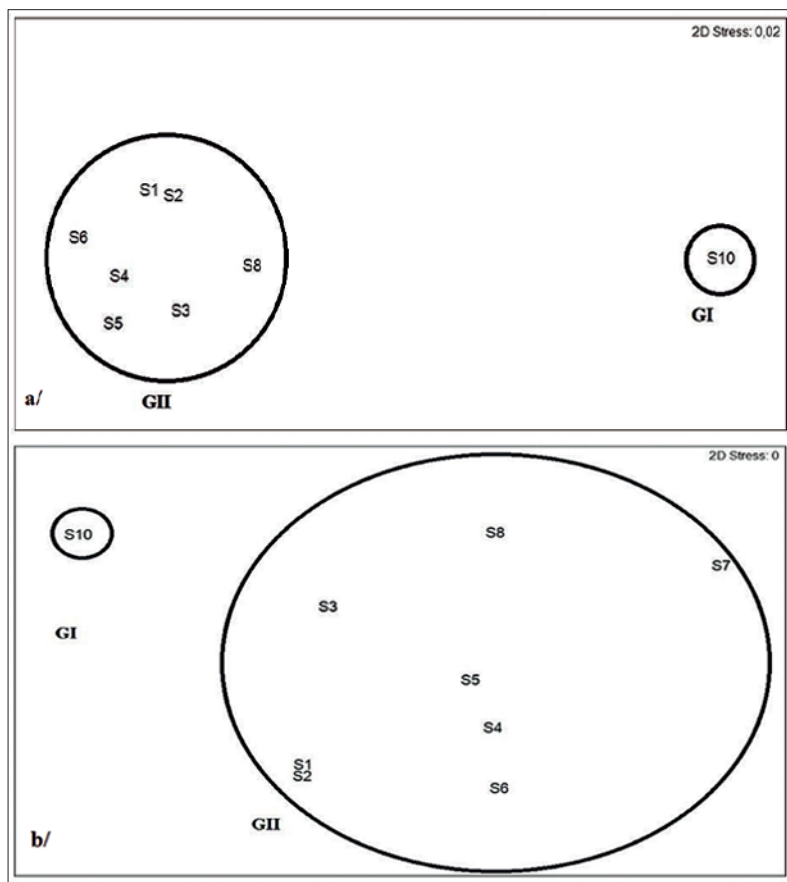


Figure 3 – Non-parametric multidimensional analysis (MDS) of sites in the southern part of the Gulf of Tunis a/ spring 2016, b/ summer 2016.

communities during the spring/summer of 2016 (p -value = 0.79). The value of R was negative. The parameters pH and salinity did not show a significant effect on communities' assemblages during the study period. The R was equal to 0.389 during the spring and to 0.437 in summer confirming the existence of shared abiotic features between the sites although they are separated. Nutrient salts did not reveal a significant influence on the communities' assemblages during the two seasons. However, the R was about 0.389 in the spring, showing site heterogeneity, and about 0.019 in the summer, indicating site homogeneity. As for metal contents, they did not influence the structure of the assemblages of the macrobenthic communities during the entire sampling period (0.314 in spring and 0.42 in summer). However, R -values highlighted a distinction between the sites.

The analysis of dissimilarity (using the Simper Test) between fine sand sites and then between fine mixed with coarse sand sites, revealed a difference of 79.9% for both comparisons. The species contributing the most to this dissimilarity are *Donax trunculus*, *Donax venustus*, *Scolelepis foliosa*, *Donax semistriatus*, *Neverita josephinia*, *Macra stultorum*, *Patella rustica*, *Glycera tridactyla*, *Macra glauca*, *Chamelea gallina*, *Patella caerulea*, *Phorcus turbinatus*, *Bolinus brandaris*. Dissimilarity based on pH and salinity was estimated at 100% between sites. The species of benthic macro-invertebrates contributing the most to this dissimilarity during the spring are *Scolelepis foliosa*, *Donax trunculus*, *Bolinus brandaris*, *Donax venustus*, *Macra stultorum*, *Donax semistriatus*, *Neverita josephinia*, *Eurydice* sp. while the species responsible for dissimilarity in summer were: *Scolelepis foliosa*, *Macra stultorum*, *Neverita josephinia*, *Glycera tridactyla*, *Bolinus brandaris*, *Macra glauca*, *Talitrus saltator*, *Eurydice truncata*, *Eurydice* sp. ; *Patella rustica*, *Phorcus turbinatus*, *Liocarcinus* sp. and *Donax trunculus*.

The same analysis performed between sites based on nutrient salts revealed a difference of 100% during the spring. The species of benthic macro-invertebrates that contributed the most to this dissimilarity were *Macra stultorum*, *Talitrus saltator* and *Macra glauca*. When carried out in summer, this analysis suggested a difference of 66%. The species responsible for this difference were *Polybius corrugatus*, *Donax trunculus*, *Donax venustus*, *Macra stultorum*, *Scolelepis foliosa*, *Patella*

rustica, *Phorcus turbinatus*, *Patella caerulea*, *Glycera tridactyla*, *Abra alba* and *Neverita josephinia*. The dissimilarity between the sites according to metallic contamination of the sediment (normal sediments vs. contaminated sediments), revealed a percentage of 100% in spring and of 94.44% in summer. During the spring, the macro-invertebrates that contributed the most to this distinction were *Patella caerulea*, *Patella rustica*, *Phorcus turbinatus*, *Pirenella conica*, *Cerithium vulgatum*, *Hexaplex trunculus* while the species responsible for this dissimilarity in summer were: *Scolelepis foliosa*, *Neverita josephinia*, *Glycera tridactyla*, *Bolinus brandaris*, *Macra stultorum*, *Eurydice* sp. and *Donax trunculus*.

Discussion

The benthic macro invertebrates constitute good bio indicators often used in aquatic bio-monitoring programs since they are closely linked to the substrate (here mostly sediment) (Koudenoukpo *et al.* 2017, Ngoay-Kossy *et al.* 2018). Thus, a modification of the substrate composition can directly affect the state of benthic communities (Bélanger 2009, Keddari *et al.* 2019).

The results of the granulometry study, suggesting that the sediments were mainly composed of fine sands at the majority of the sites, agree with those of Added *et al.* (2003) who performed a geochemical characterization of the surface sediments in the Gulf of Tunis. The hyperbolic shape of the semi-logarithmic cumulative curves obtained is typical of calm environments (Added *et al.* 2003). The estimation of the total organic matter content revealed that the sediments are in a normal state according to Hily (1984). In addition, the homogeneity of the pH values in spring and summer seems to indicate stability in the marine waters of the Gulf except those of the mouth of Wadi Meliane (Ben Charrada & Moussa 1997). Indeed, the influence of inputs from the wadi upstream could explain the variations in pH at this area (Khabouchi *et al.* 2020). The pH obtained in this work was slightly alkaline, but it is within the range of local seawater pH standards, between 6.5 and 8.5 (Nasr *et al.* 2007). As for salinity, it depends on evaporation and river inputs (Serghini *et al.* 2010). The average salinity is slightly lower than that recorded by Ben

Charrada & Moussa (1997) and by Rifi *et al.* (2012) along the same coasts (Gulf of Tunis). Nutrients are responsible for the growth of phytoplankton, primarily nitrogenous and phosphorous salts (Grogga *et al.* 2017). Their concentrations are variable in time and space and may constitute a limiting factor for primary production (Ben Charrada & Moussa 1997, Grogga *et al.* 2017). The levels of nitrites in aquatic environments are very significant in terms of toxicity given their oxidizing potential (Mathon 2016). Their concentrations should not exceed $1\mu\text{mol/L}$ (Rodier *et al.* 1984). In our study, the nitrite contents showed a slight fluctuation in time, which resulted in a significant decline during summer. This could be explained by the variation in pH, oxygen, and phytoplankton contents (Nasr *et al.* 2007). The highest values (0.2042mg/L corresponding to $4.439\mu\text{mol/L}$ at S7 in spring and 0.06mg/L equal to $1.3\mu\text{mol/L}$ at S5 in summer) surpassed the standard ($1\mu\text{mol/L}$) reported by Rodier *et al.* (1984).

As for nitrates, they constitute the most stable nitrogen form and the most abundant in water (Nasr *et al.* 2007). In general, nitrates are of agricultural origin resulting from the excessive use of chemical fertilizers and can be of industrial or domestic origin (Santsa Nguefack *et al.* 2018). The nitrate concentrations during our study period were lower than the WHO standards that recommend a level below 50mg/L developed for effluent discharges to water environments (WHO 2006). As for orthophosphates, they are present in seawater in very low concentrations if there is no source of pollution. Indeed, the agricultural and food industries and discharges are generally the source of excess phosphorus in the sea (Nasr *et al.* 2007). Their rates recorded during this study were lower than the Tunisian standards of 1989 (0.1mg/L), except for the mouth of the Wadi Meliane which greatly exceeded the standards (average equal to $0.224 \pm 0.04\text{mg/L}$). The enrichment of orthophosphates at S7 may be linked to inputs evacuated from Wadi Meliane (Khabouchi *et al.* 2020). Our results corroborate with those of Ben Lamine *et al.* (2011) who explained the enrichment in orthophosphates by the contributions of this wadi on the meso-zooplankton communities of the southern part of Tunis Bay.

The examination of the major elements showed a slight variation among seasons. Our results agree with those of Forchchammaer (1865). The elements, other than sodium, chlorides,

and sulphates, were present at rather low levels compared to the results of Degens (2012). As for the analysis of seawater composition, the different concentrations of anions and cations agreed with those reported by Sigg *et al.* (2001) having studied the nature of dissolved and suspended substances in natural waters and other aquatic systems, the chemical balances and the physicochemical processes in which these substances are involved. Referring to the Piper diagram, the water in the southern part of the Gulf of Tunis presents hyper chloride-sodium facies in accordance with the standard values of the general composition of seawater (Aminot & K  rouel 2004). Furthermore, our work showed that the metal contents in the sediments fluctuated among sites and among seasons. In addition, the LAWA classification allowed to know the contamination degrees of the sediment (German classification of sediments and aqueous suspension LAWA - developed by Irmer (1997)). Our metal concentrations were lower than those estimated by Zaaboub *et al.* (2014) in different marine sediment fractions of the Gulf of Tunis (Zn: $160\text{--}209\mu\text{g.g}^{-1}$; Ni: $56\text{--}72\mu\text{g.g}^{-1}$; Pb: $19\text{--}25\mu\text{g.g}^{-1}$ and Cu: $48\text{--}62\mu\text{g.g}^{-1}$). Helali *et al.* (2016) revealed metal contents close to the concentrations of the present work (Zn: $90\text{--}130\mu\text{g.g}^{-1}$; Ni: $28\text{--}37\mu\text{g.g}^{-1}$; Pb: $15\text{--}30\mu\text{g.g}^{-1}$; Cu: $19\text{--}24\mu\text{g.g}^{-1}$; Cd $\approx 3\mu\text{g.g}^{-1}$) in the sediment of the western shores of the Gulf of Tunis. As for Yahyaoui *et al.* (2022), they analyzed marine sediments collected from three sites in the Gulf of Tunis: the front part of Wadi Meliane, Rades in the north, and Hammam-Lif in the south. They revealed lower contamination in metals for Cd, Cu, Pb, and Zn ($0.22\text{--}0.55$; $1.55\text{--}12.28$; $4.9\text{--}11.85$ and $35.56\text{--}99.89\mu\text{g.g}^{-1}$ respectively) and slightly higher content in Ni with $30.11\text{--}43.68\mu\text{g.g}^{-1}$.

The inventory of benthic macro invertebrates is an effective tool for diagnosing the state of the environment they colonize due to their close association with the substrate (Bélanger 2009; Koudenoukpo *et al.* 2017). Thus, our study carried out in the southern part of the Gulf of Tunis during the summer and spring revealed the presence of three main phyla, namely: molluscs (75.68%), annelids (10.81%), and arthropods (13.51%). The molluscs are the most represented during the two seasons in the number of species and in species frequencies. The specific richness showed a minor decrease between the two study periods (22 species: 20 in spring 2016 and 17 in summer 2016). In addition, the appearance

of the bivalve *Abra alba*, only during the summer, seems to be attributed to the increase in temperature as well as to the disturbance of the environment during this season (Dauvin *et al.* 1993, Bernard *et al.* 2016). The estimation of the specific richness during this study revealed a relatively low value compared to that reported by Ayari & Afli (2003). This difference could be due to the higher sampling effort (number of sites and prospected depth) of these authors and also by the proximity of our sites to a source of anthropogenic pollution (Mouth of the Wadi Meliane, mouth of the Sebkha of Rades, mouth of Wadi Miizet, Soliman and Borj El Cedrya) (Boulajfene *et al.* 2015, Khabouchi *et al.* 2020). In addition, the slight increase in the abundance we noted during the summer (362.7 ind/m²), compared to that recorded in the spring (313.6 ind/m²) may mainly be caused by the dominance of the bivalve *Donax trunculus* in summer (18.8%). According to Delgado & Silva (2018) and Ibrahim *et al.* (2015), the reproduction of this species occurs during the spring, which coincides with our first sampling period. Indeed, recruitment in this species extends from the end of July until September (Zeichen *et al.* 2002, Deval 2009) leading to its significant abundance during the summer.

Evenness and Shannon indices, close to one, all seasons combined, reflect the distribution of specimens within species and therefore the stability of the ecosystem. The low equitability at the mouth of the Sebkha of Rades during summer is probably due to the dominance of the sedentary polychaete *Scolecopsis foliosa* (66.67%), bioindicator of an organic disturbance in this area (Diawara *et al.* 2008). Furthermore, the analysis of the trophic structure revealed that the benthic fauna (all seasons and sites combined) was dominated by suspension feeders in terms of species richness. Our results are consistent with those of Tlig-Zouari *et al.* (2010) at the mid-coast of the Gulf of Tunis and the Gulf of Hammamet and with those of Tilg-Zouari *et al.* (2011) who worked at three different bays: Bizerte, Tunis and Monastir where they reported the dominance of suspension feeders. The authors explained this dominance by the trophic and spatial competition between the invasive species *Pinctada radiata* and other allochthonous species. However, the quantitative dominance of surface deposit feeders may be attributed to the richness of the sediments in settled organic particles (Khedhri *et al.* 2017, Thiébaud & Broudin 2018).

The examination of ecological groups revealed the dominance of species sensitive to eutrophication (GI) in terms of species richness and abundance in both seasons. Our results agree with those obtained by Ayari & Afli (2003) at the Bay of Tunis. This dominance can be explained by the diversity and abundance of suspension feeders in the Gulf of Tunis. Indeed, these authors explained this dominance by the fact that the community is in a normal state. In addition, the largest percentages representing the GIV at the mouth of the Sebkha of Rades (S6) (25.7% in spring and 40% in summer), would probably be linked to the dominance of opportunistic species indicator of organic pollution such as *Scolecopsis foliosa* (66.67%) at this site (Diawara *et al.* 2008).

The comparison of the biotic indicators (H', E, ITI, AMBI, and BENTIX) allows to classify the 10 sites studied into four groups during both seasons. During summer, the two sites mouth of the Sebkha of Rades and the mouth of Wadi Meliane were gathered together and appeared to be very disturbed. This is probably linked to the unfavorable environmental conditions which favor the presence of pollution bioindicators at these sites. Note that the azoic state of the mouth of Wadi Meliane is simply explained by the deterioration of its water quality. Environmental parameters confirmed this result. Indeed, the nutrient salt contents at this site greatly exceed the standards. This corroborates the result of Ben Lamine *et al.* (2011) who described the water quality in this region as mediocre as it is rich in mineral and organic matter promoting eutrophication. Ben Amor *et al.* (2019) summarized the different sources of pollution affecting Wadi Meliane between food, metallurgical, pharmaceutical industries and a sewage treatment plant. In addition, although physicochemical parameters did not show organic pollution at Bir El Bey (S9), its azoic state is probably due to the strong currents and water movements during the two sampling periods, preventing the installation of organisms.

The nonparametric multidimensional analysis (MDS), with the isolation of S7 (Mouth of the Wadi Meliane) and S9 (Bir El Bey) because of their azoic state related to their high contamination by nitrate, nitrite, orthophosphates, and Cd, separated S10 (Port Aux Princes) from the other sites. This segregation may be attributed to the good environmental conditions existing in this locality. ANOSIM test is known to be more robust when the number of permutations is greater than 100 (Clarke

& Warwick 2001) however, our results are confirmed by the Simper test, which highlighted the species contributing the most to the difference between the sites according to the environmental factors.

Conclusion

The prospected sites showed calm environments, with normal sediments that were mostly composed of fine sands. The homogeneity of the pH, slightly alkaline, across time indicated stability in the marine waters of the Gulf except those of the mouth of Wadi Meliane. The nutrient concentrations during our study period were lower than the WHO standards except for orthophosphates at this same locality. This enrichment was linked to inputs evacuated by Wadi Meliane. Furthermore, the water in the southern part of the Gulf of Tunis presented hyper chloride-sodium facies following the standard values of the general composition of seawater. Concerning the macro invertebrate communities, our study revealed that molluscs were the most represented during the two seasons in the number of species and in abundance. The specific richness showing a temporal fluctuation and the appearance of the bivalve *Abra alba*, only during the summer, seems to be attributed to the increase in temperature as well as to the disturbance of the environment during this season. In addition, the slight increase in the abundance noted during the summer may result in the dominance of the bivalve *Donax trunculus* in the hot period. The azoic state of the mouth of Wadi Meliane could be explained by the deterioration of its water quality by orthophosphate enrichment in relation to nearby industries and sewage treatment plants. As for Bir El Bey locality (S9), its azoic state is probably linked to the strong natural current and water movements regime. Thus, the results obtained here showed the interest of deeper investigations in time and space. It would also be interesting to conduct more in-depth research on the origins of the sources of pollution threatening this part of the littoral. The eco-toxicological study in some abundant species (namely *Donax trunculus*, *Scolecipis foliosa*, etc.) seems to be well adapted to the critical conditions of this environment and would be of great importance to determine the impact of xenobiotics on the health of these species.

Acknowledgments

The authors are grateful to the members of “*Technopôle de Bordj Cedria*” for their welcome and their cooperation. We also acknowledge the suggestions and comments of the reviewers, for their effort to improve the quality of the manuscript.

Financial support: this research received no specific grant from any funding agency, commercial or not-for-profit sectors.

Conflict of interest: the author(s) declare none.

References

- Added, A., Ben Mammou, A., Abdeljaoued, S., Essonni, N. & Fernex, F. (2003). Caractérisation géochimique des sédiments de surface du golfe de Tunis. *Bull. Inst. Natl. Sci. Tech. Mer Salammbô* 30, 135-142.
- Aminot, A. & Kérouel, R. (2004). *Hydrologie des écosystèmes marins : paramètres et analyses*. Quae, Versailles, 1637-1844.
- Ayari, R. & Afli, A. (2003). Bionomie benthique du petit golfe de Tunis. *Bull. Inst. Natl. Sci. Tech. Mer Salammbô* 30, 79-90.
- Ballantine, W.J. (1961). A biologically-defined exposure scale for the comparative description of rocky shores. *Field Studies* 1(3), 1-19.
- Bélanger, D. (2009). *Utilisation de la faune macrobenthique comme bio-indicateur de la qualité de l'environnement marin côtier*. Thèse de doctorat de l'Université de Sherbrooke, Canada.
- Ben Amor, R., Yahyaoui, A., Abidi, M., Chouba, L. & Gueddari, M. (2019). Bioavailability and assessment of metal contamination in surface sediments of Rades-Hamam Lif Coast, around Meliane River (Gulf of Tunis, Tunisia, Mediterranean Sea). *J. Chem.* 11 p.
- Ben Charrada, R. & Moussa, M. (1997). Modélisation hydrodynamique et écologique des eaux côtières du golfe de Tunis. *Houille Blanche* 6, 66-78.
- Ben Lamine, Y., Daly Yahia-Kefi, O. & Daly Yahia Mohamed, N. (2011). Caractérisation physico-chimique de la partie sud-ouest de la baie de Tunis sous l'influence des apports de l'oued Meliane. *Bull. Inst. Natl. Sci. Tech. Mer Salammbô* 38, 123-129.
- Bernard, G., Duchêne, J.C., Romero-Ramirez, A., Lecroart, P., Maire, O., Ciutat, A., Deflandre, B. & Grémare, A. (2016). Experimental assessment of the effects of temperature and food availability on particle mixing by the bivalve *Abra alba* using new image analysis techniques. *PLoS One* 11(4), e0154270
- Borja, A., Franco, J. & Pérez, V. (2000). A marine biotic index to establish the ecological quality of soft-bottom benthos within European estuarine and coastal environments. *Mar. Pollut. Bull.* 40(12), 1100-1114.
- Boulajfene, W., Boukhicha, J., Deidun, A., Berto, D., Romeo, T., Ben Hassine, O.K. & Tlig-Zouari, S. (2015). Biomonitoring of the environmental contamination by organotins in the Gulf of Tunis: occurrence of imposex in *Stramonita haemastoma* (Linnaeus, 1767). *Mar. Freshw. Res.* 66(9), 778-785.

- Boulajfene, W., Stroglyoudi, E., Catsiki V.A., El Mlayah, A. & Tlig-Zouari, S. (2017). Bio-monitoring of metal impact on metallothioneins levels in the gastropod *Phorcus turbinatus* (Born, 1778) in the northeastern and the eastern coasts of Tunisia. *Mar. Pollut. Bull.* 120(1-2), 274-285.
- Boulajfene, W., Stroglyoudi, E., Lasram, M., El Mlayah, A., Catsiki, V.A. & Tlig-Zouari, S. (2019). Biological and biochemical assessment in *Phorcus articulatus* (Lamarck 1822): contamination and seasonal effect. *Environ. Monit. Assess.* 191(9), 1-16.
- Boulajfene, W. & Tlig-Zouari, S. (2016). Shell morphological comparison of two species of *Phorcus* genus (Risso, 1826) along the rocky coasts of Tunisia. *Cah. Biol. Mar.* 57(3), 261-270.
- Bouquegneau, J. M. & Martoja, M. (1982). La teneur en cuivre et son degré de complexation chez quatre gastéropodes marins. Données sur le cadmium et le zinc. *Oceanol. Acta* 5(2), 219-228.
- Boussoufa, D., Ghazali, N., Masmoudi, W. & El Cafsi, M. (2012). Suivi saisonnier de l'activité acétylcholinestérase et de quelques métaux traces chez le bivalve *Donax trunculus* du golfe de Tunis. *J. Soc. Chim. Tunisie* 14, 83-94.
- Boussoufa, D., Masmoudi, W.M., Ghazali, N., Dridi, M.S., Romdhane, M.S. & El Cafsi, M. (2007). Utilisation d'un mollusque bivalve: *Donax trunculus* (Linnaeus, 1758) comme indicateur de la qualité des eaux littorales dans le golfe de Tunis. *Rapp. Comm. Int. Mer Médit.* 38, 239.
- Campbell, A.C., Nicholls, J., & Cuisin, M. (1986). *Guide de la faune et de la flore littorales des mers d'Europe*. Collection « Les guides du naturaliste », Delachaux & Niestlé, Neuchâtel, 322 p.
- Chassé, C. & Glémarec, M. (1976). Principes généraux de la classification des fonds pour la cartographie biosédimentaire. *J. Rech. Océanogr.* 1(3), 1-12.
- Chemekhi, D. (2013). *Diversité des communautés macrobenthiques des côtes nord-ouest du golfe de Tunis*. Mastère, Faculté des sciences de Tunis, Tunisie.
- Clarke, K.R., Somerfield, P.J. & Chapman, M.G. (2006). On resemblance measures for ecological studies, including taxonomic dissimilarities and a zero-adjusted Bray – Curtis coefficient for denuded assemblages. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 330(1), 55-80.
- Clarke, K.R. & Warwick, R.M. (1994). *Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation*. Plymouth Marine Laboratory, Plymouth.
- Clarke, K. R. & Warwick, R.M. (2001). *Change in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation*. 2nd edition, PRIMER-E, Plymouth.
- Dauvin, J.C., Dewarumez, J.M., Elkaim, B., Bernardo, D., Fromentin, J.M. & Ibanez, F. (1993). Cinétique de *Abra alba* (mollusque bivalve) de 1977 à 1991 en Manche-Mer du Nord, relation avec les facteurs climatiques. *Oceanol. Acta* 16(4), 413-422.
- Degens, E.T. (2012). *Perspectives on biogeochemistry*. Springer-Verlag, Berlin, 427 p.
- Delgado, M. & Silva, L. (2018). Timing variations and effects of size on the reproductive output of the wedge clam *Donax trunculus* (L. 1758) in the littoral of Huelva (SW Spain). *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 98(2), 341-350.
- Deval, M.C. (2009). Growth and reproduction of the wedge clam (*Donax trunculus*) in the Sea of Marmara, Turkey. *J. Appl. Ichthyol.* 25(5), 551-558.
- Diawara, M., Zouari-Tlig, S., Rabaoui, L. & Ben Hassine, O.K. (2008). Impact of management on the diversity of macrobenthic communities in Tunis north lagoon: systematics. *Cah. Biol. Mar.* 49(1), 1-16.
- DORIS (2016). DORIS (*Données d'observations pour la reconnaissance et l'identification de la faune et la flore subaquatiques*). Available at: <http://doris.ffessm.fr/> Last accessed 21.11.2024.
- Ennouri, R., Mili, S. & Chouba, L. (2013). La contamination métallique du rouget de vase (*Mullus barbatus*) et de la sardinelle (*Sardinella aurita*) du golfe de Tunis. *Cybiuim.* 37(1-2), 49-58.
- Fauvel, P. (1927). Rapport sur les annélides polychètes errantes. *Trans. Zool. Soc. Lond.* 22(4), 411-439.
- Forchhammer, G. (1865). On the composition of seawater in the different parts of the ocean. *Philos. Trans. R. Soc. Lond.* 155, 203-262.
- Fischer, W., Schneider, M. & Bauchot, M.L. (1987). *Fiches FAO d'identification des espèces pour les besoins de la pêche (rev. 1). Méditerranée et Mer noire. Zone de pêche 37. Vol. 2 : Vertébrés*. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture, Rome.
- Glémarec, M. & Hily, C. (1981). Perturbations apportées à la macrofaune benthique de la baie de Concarneau par les effluents urbains et portuaires. *Acta Oecologica Applicata* 2, 139-150.
- Grall, J. & Coïc, N. (2006). *Synthèse des méthodes d'évaluation de la qualité du benthos en milieu côtier*. Institut universitaire européen de la mer, Université de Bretagne occidentale, Laboratoire des sciences de l'environnement marin, 7-86.
- Grall, J. & Glémarec, M. (1997). Using biotic indices to estimate macrobenthic community perturbations in the Bay of Brest. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 44, 43-53.
- Groga, N., Akedrin, T.N., Komoé, K., Thiegba, K., Akaffou, D.S. & Ouattara, A. (2017). Distribution spatio-saisonnière des cyanobactéries le long du cours d'eau, la Lobo Haut Sassandra (Daloa, Côte d'Ivoire). *Tropicultura* 4, 288-299.
- Helali, M.A., Oueslati, W., Zaaboub, N., Added, A., & Aleya, L. (2016). Bioavailability and assessment of heavy metal pollution in sediment cores off the Mejerda River Delta (Gulf of Tunis): How useful is a multiproxy approach? *Mar. Pollut. Bull.* 105(1), 215-226.
- Hily, C. (1984). *Variabilité de la macrofaune benthique dans les milieux hypertrophiques de la rade de Brest*. Thèse de doctorat de l'Université de Bretagne occidentale, Brest, France.
- Ibrahim, R.M., Mohammad, S.H., Mohamed, S.Z. & Morsyn Z.S. (2015). Aspects on the reproductive cycle of *Donax semistriatus* and *Donax trunculus* (Mollusca: Bivalvia) in Idku, Egypt. *NISCAIR-CSIR. India* 44(03), 287-296.
- Irmer, U. (1997). Bewertung der Ergebnisse aus der Elbeschadstoff-Forschung. *IKSE Workshop*, Geethacht, 36-40.
- Khabouchi, I., Khadhar, S., Chaouachi, R.D., Chekirbene, A., Asia, L. & Doumenq, P. (2020). Study of organic pollution in superficial sediments of Meliane river catchment area: aliphatic and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Environ. Monit. Assess.* 192(5), 1-9.
- Khedhri, I., Afi, A. & Aleya, L. (2017). Structuring factors of the spatio-temporal variability of macrozoobenthos assemblages in a southern Mediterranean lagoon: How useful for bioindication is a multi-biotic indices approach? *Mar. Pollut. Bull.* 114(1), 515-527.

- Keddari, D., Afri-Mehennaoui, F.Z., Sahli, L. & Mehennaoui, S. (2019). Qualité écologique via la faune macro-invertébrée benthique et devenir du niveau de contamination par le Cr et le Pb des sédiments de l'oued Boumerzoug (Constantine, Algérie). *A.S.J.P.* 5(2), 990-998.
- Koudenoukpo, Z.C., Chikou, A., Adandedjan, D., Hazoume, R., Youssao, I., Mensah, G.A. & Laleye, A.P. (2017). Caractérisation physico-chimique d'un système lotique en région tropicale : la rivière Sô au Sud-Bénin, Afrique de l'Ouest. *J. Appl. Biosci.* 113, 11111-11122.
- Lacaze, J.C. (1993). *La dégradation de l'environnement côtier. Conséquences écologiques*. Masson, Paris, Milan, Barcelone, Bonn.
- Luczak, C., Janquin, M.A. & Kupka, A. (1997). Simple standard procedure for the routine determination of organic matter in marine sediment. *Hydrobiologia* 345(1), 87-94.
- Mathon, B. (2016). Photodégradation et oxydation chimique de micropolluants pharmaceutiques et phytosanitaires en traitement complémentaire : performances, mécanismes et modélisation. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, France.
- MNHN-LBIMM (Museum national d'histoire naturelle, Laboratoire de biologie des invertébrés marins et malacologie) (2011). *CLEMAM (Check List of the European Marine Molluscs)*. <https://www.bodc.ac.uk/resources/inventories/edmed/report/4628/> Last accessed 21.11.2024.
- Nasr, F.A., Doma, H.S., Abdel-Halim, H.S. & El-Shafai, S.A. (2007). Chemical industry wastewater treatment. *The Environmentalist* 27(2), 275-286.
- Ngoay-Kossy, J.C., Zébazé Togouet, S.H., Wango, S.P., Bolevane Ouantinam, S.F., Tchakonte, S. & Piscart, C. (2018). Bio-indicateurs des milieux aquatiques lotiques en République centrafricaine : macro-invertébrés benthiques et pression anthropique du cours d'eau Nguitto. *Revue d'écologie* 73(4), 603-616.
- Oueslati, A. (2004). *Littoral et aménagement en Tunisie*. Orbis, Tunis, 534 p.
- Pelloux, P., Dabin, B., Fillmann, G. & Gomez, P. (1971). *Méthodes de détermination des cations échangeables et de la capacité d'échange dans les sols*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer, 117 p.
- Prunus, G. & Pantoustier, G. (1974). Étude écologique des zones littorales rocheuses du golfe de Tunis et leurs peuplements d'isopodes. *Bull. Inst. Océanogr. Pêche Salammô* 3, 1-4.
- Riedl, R. (1983). *Fauna und Flora des Mittelmeeres; ein systematischer Meeresführer für Biologen und Naturfreunde*. Parey, Hamburg, 836 p.
- Rifi, M., Ben Souissi, J., Zekri, S., Jaafoura, M.H. & Le Pennec, G. (2012). Gametogenic cycle and monthly variations of oocyte size in the invasive cockle *Fulvia fragilis* (Bivalvia: Cardiidae) from the Bay of Tunis (northern Tunisia, central Mediterranean). *Cah. Biol. Mar.* 53, 221-230.
- Rivière, A. (1977). *Méthodes granulométriques. Techniques et interprétations*. Masson, Paris, 170 p.
- Rodier, J., Geoffray, C. & Rodi, L. (1984). *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer : chimie, physico-chimie, bactériologie, biologie*. Dunod, Paris, 1 365 p.
- Santsa Nguefack, C.V., Ndjouenkeu, R. & Ngassoum, M.B. (2018). Qualité de l'eau de la localité de Dschang et impact sur la santé des consommateurs. *Afrique Science* 14(3), 96-107.
- Serghini, A., Fekhaoui, M., El Abidi, A., El Blidi, S. & Akkame, R.B. (2010). Caractérisation hydrochimique d'un site Ramsar : le complexe zones humides de Mohammedia (Maroc). *Bulletin de l'Institut scientifique, Rabat, section Sciences de la vie* 32(2), 133-145.
- Sigg L., Behra, P. & Stumm, W. (2001). *Chimie des milieux aquatiques*. Dunod, Paris.
- Simboura N. & Zenetos A. (2002). Benthic indicators to use in ecological quality classification of Mediterranean soft bottom marine ecosystems, including a new biotic index. *Mediterr. Mar. Sci.* 3(2), 77-111.
- Thiébaud, E. & Broudin, C. (2018). *Résultats de la surveillance du Benthos. Région Bretagne. Suivi stationnel des sables sublittoraux pour l'année 2017. Édition 2018*. Contrat de prestations IFREMER-UPMC (4500002775- C17/0895).
- Tlig-Zouari, S., Mami, T. & Maamouri, F. (2009). Structure of benthic macroinvertebrates and dynamics in the northern lagoon of Tunis. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* 89 (7), 1305-1318.
- Tlig-Zouari, S., Rabaoui, L., Cosentino, A., Irathni, I., Ghrairi, H. & Ben Hassine, O.K. (2011). Macrofauna associated with an introduced oyster, *Pinctada radiata*: Spatial scale implications of community differences. *J. Sea Res.* 65(1), 161-169.
- Tlig-Zouari, S., Rabaoui, L., Fguiri, H., Diawara, M. & Ben Hassine, O.K. (2010). Spatial diversity of rocky midlittoral macro-invertebrates associated with the endangered species *Patella ferruginea* (Mollusca: Gastropoda) of Tunisian coastline. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 87(2), 275-283.
- WHO (World Health Organization) (2006). *Guidelines for drinking-water quality, incorporating the first addendum*. 3rd ed. Electronic version for the Web. Geneva, Switzerland, 631 p.
- Yahyaoui, A., Ben Amor, R., Abidi, M., Grieco, G., Gueddari, M., & Chouba, L. (2022). Distribution and assessment of trace metal contamination in the surface sediments of the Meliane River and the Coast of the Gulf of Tunis (Tunisia, Mediterranean Sea). *Environ. Forensics*. 23(1-2), 7-22.
- Zaabi, S. & Afli, A. (2006). Significations écologiques de la variabilité des Polychètes dans le golfe de Tunis. *Bull. Inst. Natl. Sci. Tech. Mer Salammô* 33, 29-36.
- Zaaboub, N., Oueslati, W., Helali, M.A., Abdeljaouad, S., Huertas, F.J. & Lopez Galindo, A. (2014). Trace elements in different marine sediment fractions of the Gulf of Tunis (Central Mediterranean Sea). *Chem. Speciation Bioavailability* 26(1), 1-12.
- Zeichen, M.M., Agnesi, S., Mariani, A., Maccaroni, A. & Ardizzone, G.D. (2002). Biology and population dynamics of *Donax trunculus* L. (Bivalvia: Donacidae) in the South Adriatic coast (Italy). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 54(6), 971-982.

Impact of soil management on invertebrates and soil quality in the eastern suburbs of Algiers (Algeria)

Impact de la gestion des sols sur les invertébrés et la qualité des sols dans la banlieue Est d'Alger (Algérie)

Hakima AMGOUD^{1,*}, Amina Mohamed SAHNOUN¹, Noria SAADOUN²

1. Laboratory of Ecology and Biology of Terrestrial Ecosystems, Faculty of Biological Sciences and Agronomic Sciences, Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou, Algeria.

2. Natural Resources Laboratory, Faculty of Biological Sciences and Agronomic Sciences, Mouloud Mammeri University of Tizi-Ouzou, Algeria.

*Corresponding author: amgoud.hakima@gmail.com

Abstract

The soil provides a set of ecosystem functions, which are increasingly threatened. It is subject to very extensive degradation processes due to unsustainable tillage practices. The aim of this research was to examine the impact of soil tillage systems, on the richness and abundance of invertebrates and on the edaphic properties of a soil on which a durum wheat variety (Chen's) is grown. The agrotechnical practices are represented by three soil managements: Conventional Tillage (CT), Simplified Cultivation Tillage (SCT) and Direct Sowing (DS). This research was led at an experimental station located at the Technical Institute of Large Crops (ITGC), located east of Algiers (Algeria). After extraction of 25 × 25 × 20cm portions of soil, thirteen faunal groups were identified. They were represented by Acari, Collembola, Araneae, Pseudoscorpionida, Coleoptera, Diptera, Hymenoptera, Diplura, Protura, Nematoda, Gastropoda, Myriapoda and Oligochaeta. In total, 6135 specimens were counted. Collembola and Acari were the most represented. The density of edaphic invertebrates depends on the action of plowing and Collembola best express this effect,

because their density decreased from more than 1000 individuals/m² under direct sowing to less than 200 individuals/m² in the deeply plowed soil. Conservative cropping techniques also improve soil quality, with higher total nitrogen levels estimated at 0.3%, significantly higher and more important porosity in the soil when compared to tilled soils.

Résumé

Le sol assure un ensemble de fonctions écosystémiques qui sont de plus en plus menacées. Il est soumis à des processus de dégradation intense à cause des pratiques agricoles non durables. Le but de cette recherche était d'examiner l'impact des systèmes de travail du sol, sur la richesse et l'abondance des invertébrés et sur les propriétés édaphiques d'un sol cultivé en blé dur variété (Chen's). Les pratiques agricoles testées sont représentées par trois systèmes de gestion du sol: le travail du sol conventionnel (CT), le travail du sol simplifié (SCT) et le semis direct (DS). Le siège de cette recherche est une

Keywords: Conventional tillage, direct sowing, mites, simplified cultivation tillage, soil fauna, soil properties, springtails.

Mots-clés: Travail du sol conventionnel, semis direct, acariens, travail du sol simplifié, faune du sol, propriétés du sol, collemboles

station expérimentale se trouvant au niveau de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC), située à l'est d'Alger (Algérie). Après extraction de portions de $25 \times 25 \times 20$ cm de sol, treize groupes faunistiques sont identifiés. Ils sont représentés par les acariens, les collemboles, les araignées, les pseudoscorpions, les coléoptères, les diptères, les hyménoptères, les diploures, les protozoaires, les nématodes, les gastéropodes, les myriapodes et les oligochètes. Au total, 6135 spécimens sont dénombrés. Les collemboles et les acariens sont les mieux représentés. La densité des invertébrés édaphiques est tributaire de l'action du labour et les collemboles expriment le mieux cet effet, car leur densité passe de plus de 1000 individus/m² sous semis direct à moins de 200 individus/m² en sol profondément labouré. Les techniques culturales conservatrices améliorent aussi la qualité des sols, le sol non labouré présente des teneurs en azote total évaluées à 0,3 %, significativement plus élevées et une porosité plus importante comparativement aux sols labourés.

Introduction

Soil is a complex system that is home to a multitude of living organisms. It represents one of the most important reservoirs of biodiversity (Cluzeau *et al.* 2009). Among these species, soil animals, including invertebrates, play a critical role in soil health and functioning (Kicaj 2023). Edaphic invertebrates participate in the maintenance of soil fertility, by stimulating the mineralization of organic matter, the regulation of chemical element cycles, maintaining soil structure and protection against pests; as a result, they contribute to increasing productivity in agricultural systems (Lavelle *et al.* 2006; Jeffery *et al.* 2010; Kicaj 2023). They are key determinants of self-organization in soils, a process whereby interactions among biotic and abiotic components are created (Lavelle *et al.* 2016). Invertebrates are classified on the basis of size. The macrofauna (diameter > 2mm) includes groups, such as ants, beetles, spiders, worms and myriapods. The mesofauna includes smaller invertebrates (< 2mm), such as mites and springtails. The representatives of the microfauna (< 0.2mm) are hygrophilous species, living in the pores of the soil matrix (El Alami Idrissi 2013; Lavelle *et al.* 2016). Their occurrence and abundance in agro-ecosystems are threatened by a range of factors, including tillage practices (Fiera *et al.* 2020).

Tillage carried out by the passage of agricultural machinery directly affects soil

invertebrates, by injuring them, killing them or exposing them to the risk of predation; and indirectly through the modification of habitat and the location of food resources (Kladivko 2001; Jeffery *et al.* 2010). The turning of the soil also causes the modification of its state through the action on its structure (fragmentation and compaction) and on the location of organic matter and mineral elements (Bouthier *et al.* 2014). In many agroecosystems, several research showed the impact of soil tillage on some invertebrates, such as earthworms and springtails. They have been used as bioindicators for sustainable land use and soil quality (Peres *et al.* 2008; Alvarez *et al.* 2001; Briones & Schmidt 2017). The mesofauna participating in litter decomposition has also been shown to be sensitive to tillage practices (Hättenschwiler *et al.* 2005).

The concept of sustainable agriculture is an approach aimed at reversing the process of soil degradation by their preservation and best use of natural resources through the sustainable management of soil water and biological activity (Derpsch 2001). Conservation agriculture is designed as an alternative to these conventional systems to improve the physical, chemical and biological qualities of soils. The latter is based on the elimination of tillage (deep turning the soil), protection by permanent plant cover and adoption of crops adapted rotation thus involving direct sowing and simplified cultivation tillage (Derpsch 2001; Abdellaoui *et al.* 2011). The use of appropriate cultivation techniques is therefore essential. Its main asset will be the preservation of soil fauna which, on the one hand, gives us reliable and relevant measurements on all physical and chemical conditions of the soil (Garrigues 1994) and on the other hand, constitutes a key element in the development of sustainable agriculture (Menta *et al.* 2017).

In Algeria, despite the large area occupied by cereals, production remains very low and irregular. The choice of the *Triticum durum* species, which is part of the ITGC (Technical Institute of Large Crops) program, is linked to its better yields and its greater resistance to edapho-climatic changes. The objective of our investigation is to compare different treatments of soil management on the soil preservation capacity, through the richness and abundance of invertebrates and on the physicochemical properties of soils under durum wheat cultivation, in Oued Smar (Algiers).

Methods

Study site

This study was carried out in 2017, at the experimental station of the Technical Institute of Large Crops (ITGC). The ITGC station is an experimental farm for cereals and fodder. This station is located in Oued Smar, a municipality located in the eastern suburbs of Algiers (Algeria) (36°42'N, 30°84'E), at an altitude of 24m above sea level. Oued Smar is under the influence of the Mediterranean climate, hot and dry in summer and mild and humid in winter. According to the Emberger Climagram, it belongs to the subhumid bioclimatic level with mild winter. Its annual rainfall varies between 600 and 800mm (Hamadache *et al.* 2002). During the year of the study, the climatic conditions, which characterized the site indicated average temperatures exceeding 18°C and a total precipitation of 665.5mm.

Experimental design

Our research on soil properties was carried out on cereal plots cultivated with durum wheat (*Triticum durum*), variety *Chen's*, with conventional tillage cereal cultivation as a precedent. To carry out the test, we adopted the complete randomized block design with three repetitions. Each block was made up of three elementary plots, each 25m long and 6m wide (Figure 1). For each plot, three soil managements were applied once before seeding: conventional tillage (CT) is a very deep tillage with soil reversal which exceeds 30cm. The first tillage is done with a moldboard plow then the passage of other tillage tools. Simplified cultivation tillage (SCT) is a pseudo-tillage without turning soil, over an average depth between 10 and 20cm. Direct sowing (DS) with a specific seeder, is used to sow seeds in evenly spaced rows, at an adjustable depth at the same time as the other soil managements (Figure 2). For all tillage techniques, anti-dicotyledonous weeding was carried out at the tillering stage. However, for direct sowing plots, a total weedkiller (glyphosate) was applied before sowing (Table 1).

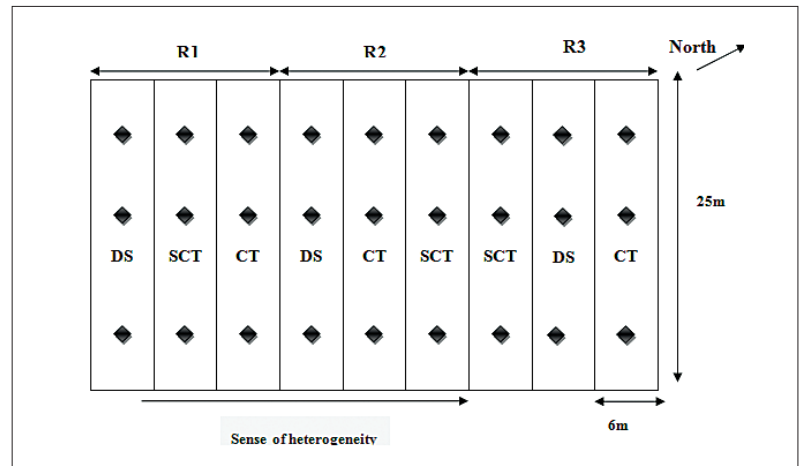


Figure 1 – Experimental device adopted, consisting of 3 replicated blocks (R).
CT = Conventional Tillage, SCT = Simplified Cultivation Tillage,
DS = Direct Sowing. Black diamonds indicate elementary plots (25 × 6m)
where soil managements were applied.



Figure 2 – Soil management practiced on field experiments.
CT = Conventional Tillage, SCT = Simplified Cultivation Tillage,
DS = Direct Sowing.

Table 1 – Detailed information of soil management experiments.
CT = Conventional Tillage, SCT = Simplified Cultivation Tillage,
DS = Direct Sowing.
(1 quintal (Qtx) = 100 kilograms (Kg) = ca. 220 pounds (Lbs)).

Soil management	Tillage systems		
	CT	SCT	SD
Crop rotation	cereal	cereal	cereal
Agricultural machinery	moldboard plow + cover crop (disc plow) + rotary harrow + roller	tine cultivator + rotary harrow + roller.	No
Seeding rate	120 Kg/ha	120 Kg/ha	120 Kg/ha
Phosphate fertilization (MAP)	2 Qtx/ha	2 Qtx/ha	2 Qtx/ha
Nitrogen fertilization (Urea46%)	2 Qtx/ha	2 Qtx/ha	2 Qtx/ha
Herbicides	1	1	2

In order to determine the edaphic properties, a sample of soil was taken in March from each of the plots, within a depth range of 0-20cm. The physical and chemical characteristics of the soil were measured using standard soil analysis methods (Jackson 1967). Porosity was determined from the apparent density and the real density of the soil [porosity = (1-apparent density)/real density]. The apparent density was obtained by means of a metal cylinder, of a known volume, which was inserted into the ground. The cylinder filled with soil was weighed before and after drying at 105°C for 48 hours. Penetrometric resistance of the soil (PR) was determined by the penetrometer whose operating mode consists of driving a standardized cone into the ground and measuring the pressure to be applied in Mega Pascal. pH was determined by the potentiometric method using a pH meter using the ratio 1/5. Organic Carbon (OC) content was evaluated according to the Anne method, which consists of hot oxidation of the organic carbon of a soil sample with potassium bichromate, in an acid medium and a return titration by Mohr salt (Anne 1945). Total nitrogen (N) was measured by the method of Kjeldahl (1883), which is based on the mineralization of the soil in sulfuric acid at high temperature. The ammoniacal nitrogen formed is displaced by the soda and distilled; it is then collected with a solution of boric acid then titrated with sulfuric acid at 1/50.

Invertebrate sampling was carried out in March and November of the year considered, in accordance with the standard TSBF (Tropical Soil Biodiversity and Fertility) method (Anderson & Ingram 1993). A quadrat of 25 × 25cm × 20cm is used to extract the soil (Coineau 1974) at three points/plot, at least 5m apart from each other. In the laboratory, the harvest of invertebrates is carried out using the Berlèse-Tullgren technique (Pesson 1971). After extraction, the invertebrates are preserved in 70° alcohol, according to the protocol of Aubert *et al.* (2005), for subsequent identification on the basis of external morphological criteria described by Bourbonnais (2007). Due to the great taxonomic diversity of the faunal groups encountered, we considered only the classes and orders of these invertebrates.

Factorial Design and statistical analysis

Analyses of variance (ANOVA) were carried out in order to highlight significant differences between different tillage systems using the Stat Box 6.40 software, at the threshold ($p < 0.05$). A complementary multiple mean comparison test (Newman-Keuls) was performed. The factors studied included soil management used (parameter A) and the sampling periods (parameter B), each defined according to different levels: (1, 2 and 3) for the TC, TCS and SD factor, and (1 and 2) for March and November, respectively, on the measured responses, including: Collembola (individuals/m²), Oligochaeta (individuals/m²) and Myriapoda (individuals/m²).

In the factorial design, the equations can be used to draw the 2D contour and 3D curves and forecast the experimental values of the responses to the effect variables using a factorial equation with a two-factor interaction. Equation below represents the data fitting using a combined function or incorporating an interaction. Mathematical modeling was performed in detail using Design Expert (v.13) software.

$$Y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i X_i + \sum_j^k \beta_j X_j + \sum_{ij}^k \beta_{ij} X_i X_j + \epsilon$$

Where Y represents the response studied, β_0 is a constant term, β_i , β_{ii} and β_{ij} are respectively the coefficients for the linear, quadratic terms and their interactions. The number of factors is represented by k, while the random error is represented by ϵ . These representations provide a clearer and more precise visualization of the experimental results. In the 2D contour plots and 3D response surface plots, color coding helps identify variations in response intensity based on interactions between input variables. Generally, a value of + 1 corresponds to a high level of a factor, while a value of -1 indicates a low level by default, relative to the reference point corresponding to the zero level (0). Using this equation facilitates the assessment of the relative importance of variables by comparing the factor coefficients, denoted A (soil management) and B (sampling period).

Results and discussion

Effect of tillage systems on soil quality

Table 2 shows that soil parameters can be affected by tillage in different ways. The highest porosity is obtained in direct sowing and the lowest in simplified cultivation tillage (SCT); its value is intermediate in the case of conventional tillage (CT). It seems that not turning the soil over preserves the substrate initial structure and therefore better water circulation. Similar results are found by He *et al.* (2009): they noted better porosity in unworked plots because periodic tillage destroys the continuity of macropores and the stability of macroaggregates. However, Amara *et al.* (2014) and Feddal *et al.* (2016) mentioned low porosity in direct sowing during the first years of the trial, but which recovered over the years following the formation of macropores of biological origin.

Concerning the penetrometric resistance, although significant effects were observed between the three techniques used, the Newman & Keuls test at the 5% threshold did not highlight this variation. Consequently, despite the fact that the porosity was better in direct sowing, this had no influence on the penetration resistance of the roots. On the contrary, the results obtained by Khursheed *et al.* (2019) revealed that tillage reduces the values of root penetration resistance. According to Huwe (2003), tillage directly modifies the structural properties of soils, such as the stability of aggregates and the connectivity of pores or indirectly by modifying the conditions of aeration, temperature and penetrability of the soil by the roots.

The pH of the soils at the Oued Smar experimental station is in the range of 7.90 to 8.02

(Table 2). According to the interpretation standards proposed by Jackson (1967) and El Oumlouki (2014), these soils are moderately basic. Cultivated soils are subject to different fertilization practices, which could explain their alkalinity compared to forest soils (Ferrahi & Djema, 2004). The data from this research do not reveal significant variations in pH depending on the tillage systems used; however, slightly higher values are obtained within tilled soils. Bedano *et al.* (2016) consider that pH variations are linked much more to the type of soil than to the method of soil management.

Measurements of the carbon in the experimental plots indicated very low values and consequently substrates poor in organic matter. We also observed that the tillage method has no impact on the carbon contents of these plots, which explains the non-significant differences obtained (Table 2). Our results are in agreement with the observations of Angar *et al.* (2011), which reveal that the improvement in the level of organic matter is only observed when conservation tillage (direct seeding) is applied in the long term. He *et al.* (2009) suggested that the improvement in soil properties is more pronounced in long-term experiments than in those conducted in the short term. On the other hand, cultural practices showed a favorable effect on total nitrogen levels (Table 2). They are higher in direct sowing compared to soils subjected to conventional and simplified tillage. The variation obtained is very highly significant ($p < 0.001$). According to studies carried out by Drijber *et al.* (2000) and Ibekwe *et al.* (2002), tillage affects certain microbial groups, such as nitrifying bacteria or mycorrhizal fungi, which affect nitrogen release. According to other research, conventional systems low nitrogen content is due to their impact on nutrient availability (Bedano *et al.* 2016).

Table 2 – Variation in physical and chemical properties of the soil depending on tillage systems.
CT = Conventional Tillage, SCT = Simplified Cultivation Tillage, DS = Direct Sowing.
SEM= Standard error of the mean. Numbers followed by different indices (a, b, c)
are different ($p < 0.05$).

Soil properties	CT $\pm$ SEM	SCT $\pm$ SEM	SD $\pm$ SEM
Porosity (%)	49.60 $\pm$ 0.001 ^b	48.41 $\pm$ 0.001 ^a	59.36 $\pm$ 0.002 ^c
PR - Penetrometric Resistance (MP)	0.55 $\pm$ 0.173 ^a	1.13 $\pm$ 0.057 ^a	0.93 $\pm$ 0.185 ^a
pH	7.99 $\pm$ 0.069 ^a	8.02 $\pm$ 0.104 ^a	7.90 $\pm$ 0.173 ^a
Organic Carbon (%)	1.09 $\pm$ 0.069 ^a	1.18 $\pm$ 0.127 ^a	1.17 $\pm$ 0.185 ^a
Total Nitrogen (%)	0.26 $\pm$ 0.011 ^a	0.25 $\pm$ 0.005 ^a	0.30 $\pm$ 0.005 ^b

Soil invertebrates

The collection of soil invertebrates allowed us to identify 13 faunal groups, belonging to three phyla, Arthropods, Molluscs and Annelids. In total, we recorded 6 135 individuals over two months of sampling, 3 610 individuals in November and 2 525 in March. For these two periods, a dominance of microarthropods is noted. During the month of March, springtails (*Collembola*) are strongly represented, with a frequency exceeding 52%, followed by mites (*Acari*) with more than 35%; then follow *Diptera*, *Coleoptera* and *Diploura* with 6.85%, 1.85% and 1.35% respectively. Other invertebrates are less represented (Figure 3A). In November, mites are most numerous, with a frequency exceeding 43%. Springtails are in second place, with around 38%, followed by myriapods, with 3.27%. The other groups listed are less frequent (Figure 3B). We also noted the presence of proturan group (0.11%) and oligochaetes, represented particularly by earthworms, with 0.58%. Petersen (2002) has shown that springtails are the most abundant arthropods in soils. Moreover, Coleman *et al.* (2004), reported that Mediterranean soils are often inhabited by these groups.

Furthermore, oligochaetes are not abundant and completely absent in March. This is probably due to climatic conditions, in particular rainfall, which constitutes an essential element for the survival of earthworms. Indeed, during the year of the study (2017), we recorded more than 128mm of

precipitation in November 2017 compared to only 54mm in March of the same year. Lavelle *et al.* (2022) revealed that temperate zone with high-rainfall were associated with high densities of all macrofauna groups, along with earthworm densities. These results can also be explained by the agricultural practices adopted before and during the trial installation, in particular tillage and the application of herbicides. For Pelosi *et al.* (2009) and Bedano *et al.* (2016), the high sensitivity of this group to cultural practices in cultivated systems results in the reduction of their density.

Influence of edaphic factors on invertebrate density

The analysis of the density of invertebrates in relation to the edaphic factors studied did not, in the majority of cases, reveal significant correlations, except for the five groups of invertebrates represented below (Table 3). By analyzing the correlations between faunal groups and soil properties (Table 3), it turns out that springtails, ants and gastropods are negatively linked to soil pH. Ayuke *et al.* (2009) also noted the fragility of hymenoptera in the face of increasing environmental pH. Ponge (1999) supports the hypothesis of the influence of pH and related factors on the distribution of several mesofauna groups in different soil and vegetation types. He adds that certain groups of macrofauna have similar tendencies with respect to pH variations.

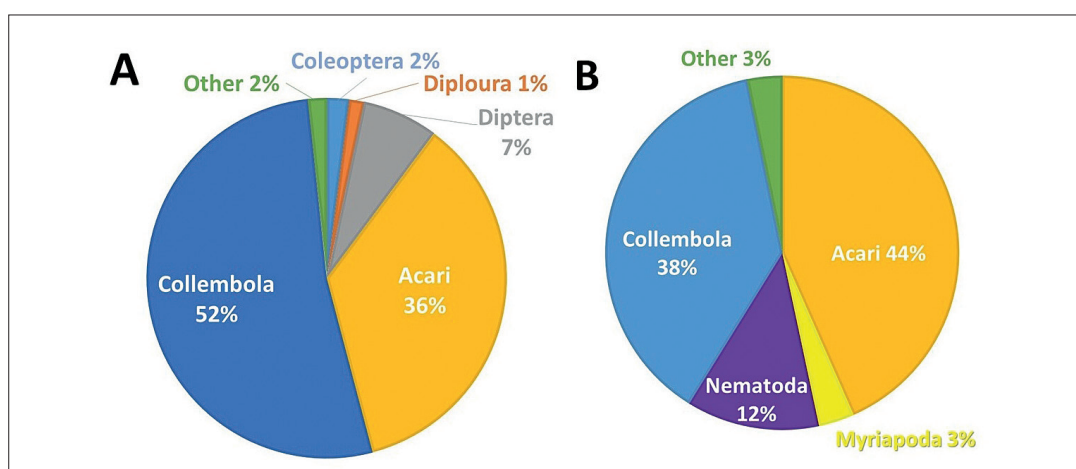


Figure 3 – Relative frequencies (%) of the faunal groups inventoried.

A. In March, the category "other" includes: Araneae, Gastropoda, Hymenoptera, Myriapoda, Nematoda, Pseudoscorpionida.

B. In November, the category "other" includes: Araneae, Coleoptera, Diplura, Diptera, Gastropoda, Hymenoptera, Oligochaeta, Protura, Pseudoscorpionida.

Table 3 – Correlation matrix between soil properties and invertebrate density (Pearson's test, $P \leq 0.05$).

Invertebrates	pH	Carbon	Nitrogen	Porosity
Collembola	-0.81	-	-	-
Pseudoscorpionida	-	0.82	-	-
Hymenoptera	-0.86	-	-	-
Nematoda	-	0.85	-	-
Gastropoda	-0.87	-	0.87	0.88

Table 4 – Variations in density (number of individuals/m²) of certain invertebrates depending on time and soil tillage systems. CT = Conventional Tillage, SCT = Simplified Cultivation Tillage, DS = Direct Sowing. SEM= Standard error of the mean. Numbers followed by different indices (a, b, c) are different ($p < 0.05$).

Tillage technics →		CT		SCT		DS	
		Density ± SEM		Density ± SEM		Density ± SEM	
Sampling period	F, p	March	November	March	November	March	November
Collembola	6.92, 0.003	180.00 ±54.67 ^a	261.33 ±57.45 ^a	788.00 ±86.39 ^{ab}	480.98 ±106.66 ^a	797.33 ±287.54 ^{ab}	1221.33 ±185.18 ^b
Oligochaeta	3.23, 0.040	0.00±0.00 ^a	6.67±6.67 ^a	0.00±0.00 ^a	1.40±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a	21.33±9.63 ^a
Myriapoda	4.16, 0.020	0.00±0.00 ^a	14.67±7.06 ^a	26.67 ±24.72 ^a	19.58±6.12 ^a	6.67±3.53 ^a	82.66 ±28.91 ^a

Moreover, the group of gastropods shows a positive correlation with regard to total nitrogen and soil porosity (Table 3). A positive correlation is reported between nitrogen and soil porosity. The increase in nitrogen contents would be proportional to the size of the pores. A porous soil would promote the storage of this element, which leads to better development of the plant, and consequently the expansion of gastropods. Several studies have reported that any changes in porosity and pore size distribution would hinder the ability of soils to provide water and nutrients necessary for plant growth (Lipiec & Stepniewski 1995; Wang *et al.* 2020). As for pseudoscorpions and nematodes, they are positively correlated with organic carbon (C). This confirms their affinity for organic matter, which constitutes the basis of their diet.

Impact of tillage on the dynamics of soil invertebrates

A close relationship is observed between the abundance of certain faunal groups and the tillage techniques applied. According to the analysis of variance (ANOVA), significant differences are observed for springtails, oligochaetes and myriapods (Table 4). The springtails seem very affected by the action

of tillage; their density decreases sharply at the level of soils where tillage is deepest. In November, 1 221.33 Ind./m² were recorded under direct sowing (SD) compared to only 261.33 Ind./m² with conventional tillage (CT). In March, we recorded nearly 800 Ind./m² in unplowed soils (DS) and unconventionally tilled soils (SCT) while the springtail population was reduced to less than 200 individuals/m² within deeply tilled plots (CT) (Table 5). The sensitivity of this group to operations carried out in conventional agriculture is raised in several works including those of Bedano *et al.* (2006); Ayuke *et al.* (2019) and Kraft *et al.* (2021). Ayuke *et al.* (2019) have attributed the reduction in numbers of this group to physical and mechanical disturbances during the passage of agricultural machines. The drop in the density of springtails is inherent to the reduction of their main food source, consisting of rhizospheric fungi (Young & Ritz, 2000).

In addition to the fluctuations observed depending on the tillage systems applied, the sampling period, with its climatic components, also had repercussions on the wildlife population. The density of springtails are much greater in November compared to March for the majority of technics used. Indeed, the beginning of spring of the study year (2017)

experienced a water deficit (21.7mm in February and 57.8mm in March), which was probably the cause of the massive population decline. Conversely, the November period, coinciding with the return of precipitation (148.9mm) and the regeneration of humidity, contributed to the improvement of the living conditions of springtails and therefore to their proliferation. Winter *et al.* (1990) demonstrated the effect of drought on the fecundity and mortality of springtails. Likewise, Kraft *et al.* (2021) recorded a negative correlation between temperature and the abundance of springtails; they consider them to be bioindicators of soil quality through their rapid expression in environmental changes.

Unlike on springtails, tillage had no perceptible negative effect on the density of earthworms. This could on the one hand be explained by the more or less deep temporary burial of these species for protection. For Pelosi *et al.* (2009), endowed earthworms, which live at depth, do not seem to be affected by tillage; on the contrary, these oligochaetes would be favored by the burial of crop residues generated by tillage. In addition, it is possible that the sampling period, which extended over a single year was not sufficient to detect the impact of tillage on this group. We also mention the absence of earthworms in March, on tilled and no-till plots (Table 4), the precipitation deficit associated with the rise in temperatures recorded at this time of the year, certainly encouraged the worms to burrow towards deeper layers, in order to escape the turning and drying of the soil.

For myriapods, cultural practices did not have very marked effects on the density of their populations, the variation is therefore not significant; this leads us to believe in a possible adaptation of this group, to modifications in soil structure, as a result of their high mobility in different layer soil. Gerlach *et al.* 2013, suggest that the mobility of this group varies with family, with some able to recolonize disturbed areas rapidly, whereas others are sensitive to local conditions. However, despite the temporal variations recorded, the density of these macro-invertebrates is greater with tillage frequency. In contrast, Bedano *et al.* (2006) showed that soil compaction may influence the occurrence of symphyla (Myriapoda) in agroecosystems. They have mainly been used as indicators of the effects of management (Halaj *et al.* 2009).

Modeling by Factorial Design

The coded equations below allow us to predict the response based on the different levels of each variable. For the responses studied, namely Collembola, Oligochaeta, and Myriapoda.

$$\text{Collembola (individuals/m}^2\text{)} = + 621.5 + 394.33 \times A + 33.05 \times B + 85.67 \times AB$$

$$\text{Oligochaeta (individuals/m}^2\text{)} = + 4.90 + 3.67 \times A + 4.90 \times B + 3.67 \times AB$$

$$\text{Myriapoda (individuals/m}^2\text{)} = + 25.04 + 18.66 \times A + 13.93 \times B + 15.33 \times AB$$

The resulting model perturbation diagram (Figure 4) highlights the variations of factor A (soil management) and factor B (sampling period). The maximum value of Collembola (Figure. 4a), is observed to the right of the reference point (level + 1), with a contribution of 81.54% for parameter A and 0.86% for parameter B. An increase in Oligochaetes (Figure. 4b), is observed towards the right (level + 1), with a contribution of 15.04% for factor A and 40.31% for parameter B, while an increase in Oligochaeta (Figure 4c) is observed towards the right (level + 1), with a contribution of 31.50% for parameter A and 26.31% for parameter B.

The distribution of actual *versus* predicted values is illustrated in Figure 4. For Collembola, the predicted values are relatively close to the actual values, with a coefficient of determination $R^2 = 86.25\%$, indicating a strong correlation between the two. In contrast, for Oligochaeta, the coefficient of determination is lower ($R^2 = 70.38\%$), reflecting a greater scattering of points and a less accurate prediction. For Myriapoda, the coefficient of determination $R^2 = 79.05\%$ demonstrates a good correlation, although some discrepancies persist. Thus, the model used exhibits good predictive power, albeit with variations across the groups studied.

The 3D and 2D contour plots illustrate the impact of soil management used and the sampling period on invertebrate, particularly for Collembola, Oligochaeta, and Myriapoda, as shown in Figure 5. Red areas indicate the highest response values, while blue areas correspond to the lowest values.

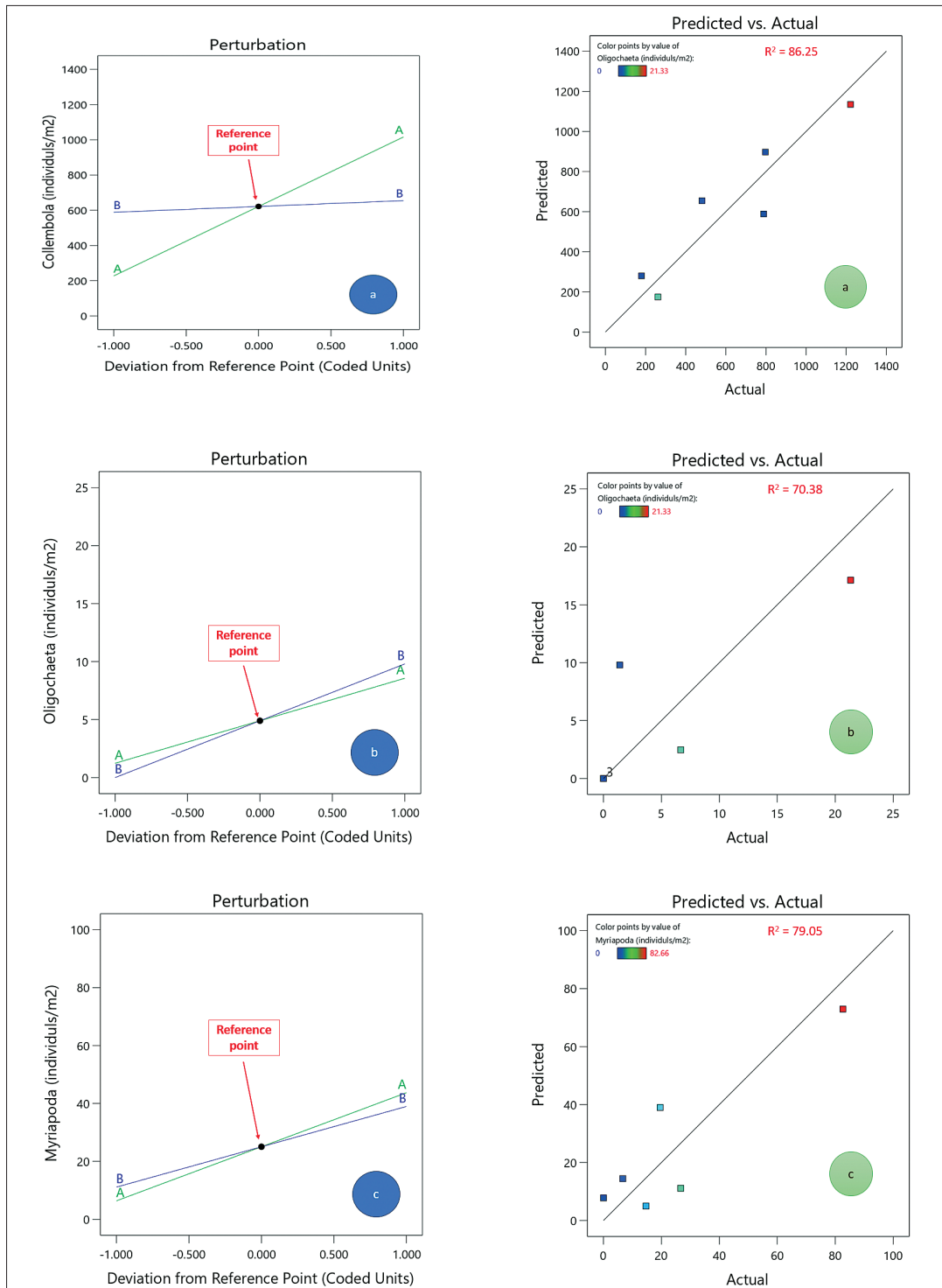


Figure 4 – Perturbation model diagram and distribution of actual versus predicted values for the three groups: Collembola, Oligochaeta, and Myriapoda.

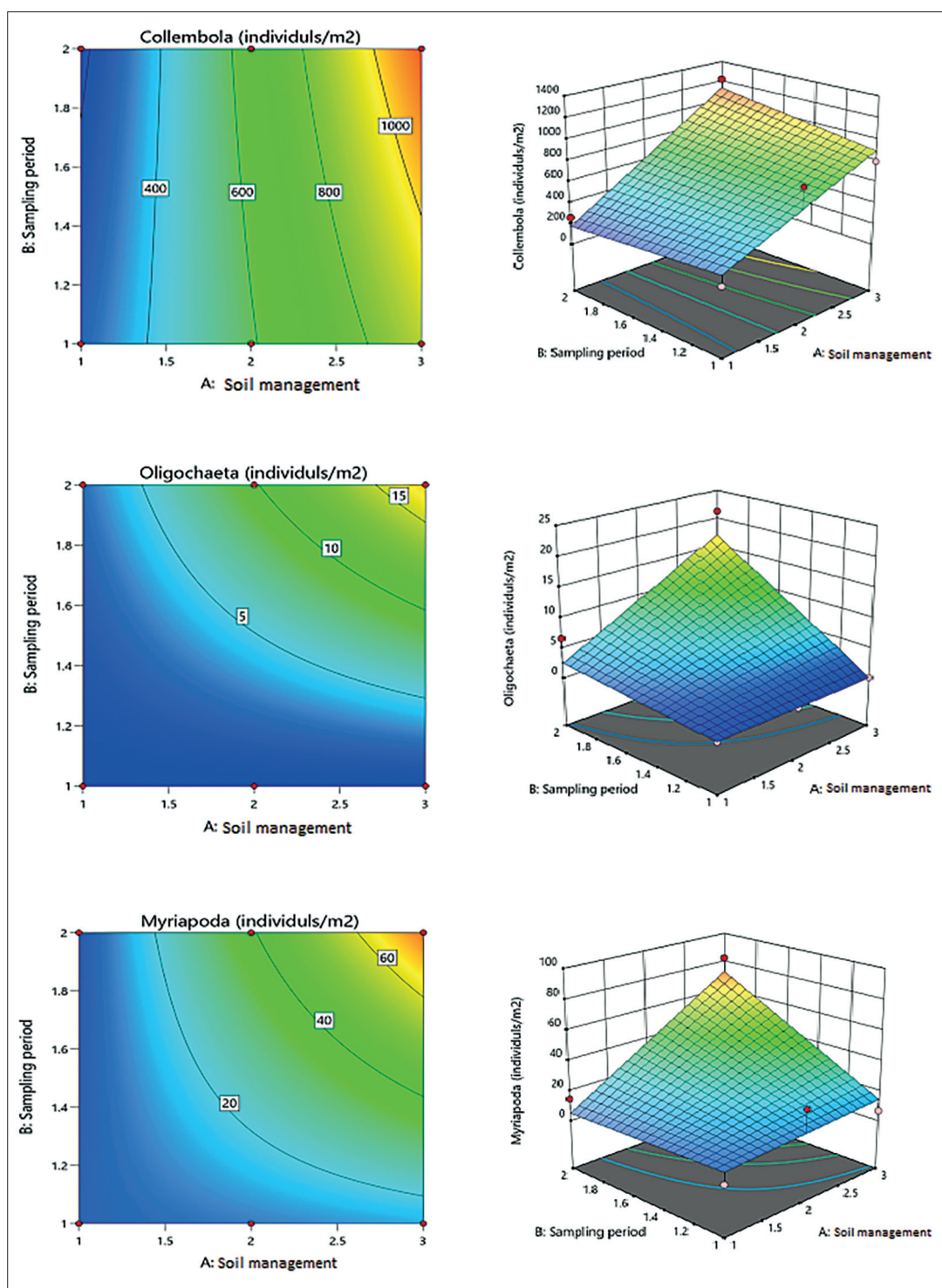


Figure 5 – Impact of soil management and sampling period on Collembola, Oligochaeta, and Myriapoda. The factors studied are soil managements (parameter A) and the sampling periods (parameter B), each defined according to different levels: (1, 2 and 3) for the TC, TCS and SD factor, and (1 and 2) for March and November, respectively.

Conclusion

The evaluation of soil management allowed us to present certain encouraging trends of direct sowing in sub-humid Mediterranean conditions. According to the results, the impact of soil management extends some soil properties. Porosity and nitrogen contents are significantly greater in direct sowing. This is in favor of certain organisms, particularly gastropods. Lower tillage management and conservation agriculture show better abundance than conventional tillage for some invertebrates such as springtails. It is also important to consider the effect of climatic conditions (temperature and rainfall) and temporal variations of the organisms that inhabit the soil.

Acknowledgements

The authors are grateful to all the staff of the experimental farm of the Technical Institute of Large Crops (ITGC) for their contribution and assistance for this work. In tribute to Pr. Malika Boudiaf-Nait Kaci who died during the finalization of this research. We thank Dr. Fahima Mechiah for help to revising the paper. We also thank Dr. Yazid Chetbani for his invaluable assistance with statistical analyses.

Références

- Abdellaoui, Z., Teskrat, H., Belhadj, A. & Zaghouane, O. (2011). Étude comparative de l'effet du travail conventionnel, semis direct et travail minimum sur le comportement d'une culture de blé dur dans la zone subhumide. In: Bouzerzour, H., Irekti, H. & Vadon, B. (eds), *4th Mediterranean meeting direct sowing*. CIHEAM Publisher, Option Méditerranéennes, Series A (96), Sétif (Algeria), 71-87.
- Alvarez, T., Frampton, G.K. & Goulson, D. (2001). Epigeic Collembola in winter wheat under organic, integrated and conventional farm management regimes. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 83, 95-110.
- Amara, M., Feddal, M.A. & Hamani, A. (2014). Analyse du comportement du sol sous l'action de trois techniques de mise en place d'un blé dur (*Triticum durum*). Effet sur le développement des racines et conséquences sur le rendement. *Nature & Technology* 12, 130-141.
- Anderson, J.M. & Ingram, J.S.I. (eds) (1993). *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. CAB International, Wallingford, UK.
- Anne, P. (1945). Sur le dosage rapide du carbone organique dans les sols. *Ann. Agron.* 2, 161-172.
- Angar, H., Ben Haj Salah, H. & Ben Hammouda, M. (2011). Semis direct et semis conventionnel en Tunisie: les résultats agronomiques de 10 ans de comparaison. In: Bouzerzour, H., Irekti, H., Vadon, B. (eds), *4th Mediterranean meeting direct sowing*. CIHEAM Publisher, Option Méditerranéennes, Series A (96), Sétif (Algeria), 53-59.
- Aubert, M., Hedde, M., Decaëns, T., Margerie, P., Alard, D. & Bureau, F. (2005). Facteurs contrôlant la variabilité spatiale de la macrofaune du sol dans une hêtraie pure et une hêtraie-charmaie. *Comptes Rendus Biologies* 328, 57-74.
- Ayuke, F.O., Kihara, J., Ayaga, G. & Micheni, A.N. (2019). Conservation agriculture enhances soil fauna richness and abundance in low input systems: Examples from Kenya. *Frontiers in Environmental Science* 7, 1-17.
- Ayuke, F.O., Karanja, N.K., Muya, E.M., Musombi, B.K., Mungatu, J. & Nyamasyo, G.H.N. (2009). Macrofauna diversity and abundance across different land use systems in Embu, Kenya. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 11, 371-384.
- Bedano, J.C., Cantú, M.P. & Doucet, M.E. (2006). Soil springtails (Hexapoda: Collembola), symphylans and pauropods (Arthropoda: Myriapoda) under different management systems in agroecosystems of the subhumid Pampa (Argentina). *European Journal of Soil Biology* 42 (2), 107-119.
- Bedano, J.C., Cantú, M.P., Doucet, M.E. & Wall, G. (2016). Effect of good agricultural practices under no-till on litter and soil invertebrates in areas with different soil types. *Soil and Tillage Research* 158, 100-109.
- Bourbonnais, G. (2007). *Directive pour la collection d'insectes et d'arthropodes*. Département de biologie et de TBE, Cégep de Sainte-Foy, Canada.
- Bouthier, A., Pelosi, C., Villenave, C., Peres, G., Hedde, M., Ranjard, L., Vian J.F., Peigne J., Cortet J., Bispo, A. & Piron, D. (2014). Impact du travail du sol sur son fonctionnement biologique. In: Labreuche J., Laurent F. & Roger-Estrade J. (eds), *Faut-il travailler le sol? Acquis et innovation pour une agriculture durable*. Quae, ARVALIS, Paris, 85-108.
- Briones, M.J.I. & Schmidt, O. (2017). Conventional tillage decreases the abundance and biomass of earthworms and alters their community structure in a global meta-analysis. *Global Change Biology* 23(10), 4396-4419.
- Cluzeau, D., Peres G., Guernion, M., Chaussod, R., Cortet, J., Fargette, M., Martin-Laurent, F., Mateille, T., Pernin, C., Ponge, J.F., Ruiz-Camacho, N., Villenave, C., Rougé, L., Mercier, V., Bellido, A., Cannavacciuolo, M., Piron, D., Arrouays, D., Boulonne, L., Jolivet, C., Lavelle, P., Velasquez, E., Plantard, O., Walter, C., Foucaud-Lemercier, B., Tico, S., Giteau, J.L. & Bispo, A. (2009). Intégration de la biodiversité des sols dans les réseaux de surveillance de la qualité des sols: exemple du programme pilote à l'échelle régionale, le RMQS BioDiv. *Étude et gestion des sols* 16, 187-202.

- Coineau, Y. (1974). Introduction à l'étude des microarthropodes du sol. Document pour enseignement pratique de l'écologie. Document for practical teaching of ecology and its annexes. Doin.
- Coleman, D.C., Crossley, D.A & Hendrix, P.F. (2004). *Fundamentals of Soil Ecology*. Elsevier Academic Press, USA.
- Derpsch, R. (2001). Conservation tillage, no tillage and related technologies. In: *Keynote First Congress on conservation Agriculture, 1-5 October 2001*, Madrid (SP), 161-170.
- Drijber, R.A., Doran, J.W., Parkhurst, A.M. & Lyon, D.J. (2000). Changes in soil microbial community structure with tillage under long-term wheat-fallow management. *Soil Biology & Biochemistry* 32(10), 1419-1430.
- El Alami Idrissi, N. (2013). La faune du sol. Reconnaissance et biologie des principaux groupes. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét.* 3, 60-66.
- El Oumlouki, K., Moussadek, R., Zouahri, A., Dakak, H., Chati, M. & El Amrani, M. (2014). Étude de la qualité physico-chimiques des eaux et des sols de la région Souss Massa (cas de périmètre Issen), Maroc. *J. Mater. Environ. Sci.* 5(2), 2365-2374.
- Feddal, M.A., Amara, M., Echcherk, I.S., Boudhar, L. & Bentahar, D. (2016). Tillage effects on soil properties and plant development in a clay soil in Algeria. *International Journal of Scientific & Engineering Research* 7(10), 1445-1457.
- Ferrahi, M.O. & Djema, A. (2004). Identification et répartition écologique de la pédofaune dans la forêt de Yakouren (Wilaya de Tizi-Ouzou). *Annals of the National Agronomic Institute* 25, 44-57.
- Fiera, C., Ulrich, W., Popescu, D., Bunea, C.I., Manu, M., Nae, I., Stan, M., Marko, B., Urak, I., Giurginca, A., Penke, N., Winter, S., Kratschmer, S., Buchholz, J., Querner, P. & Zaller, J.G. (2020). Effects of vineyard inter-row management on the diversity and abundance of plants and surface-dwelling invertebrates in Central Romania. *Journal of Insect Conservation* 24(1), 175-185.
- Garrigues, P. (1994). Biological indicators of environmental contamination. *Analysis magazine* 22(1), 10-11.
- Gerlach, J., Samways, M. & Pryke, J. (2013). Terrestrial invertebrates as bioindicators: An overview of available taxonomic groups. *Journal of Insect Conservation* 17(4), 831-850.
- Halaj, J., Halpern, C.B. & Yi, H. (2009). Effects of green-tree retention on abundance and guild composition of corticolous arthropods. *Forest Ecology and Management* 258(5), 850-859.
- Hamadache, A., Makhlof, M. & Harkati, N. (2002). Effets de la date et de l'outil de travail du sol sur le comportement des brome (*Bromus* sp.) et le rendement du blé dur (*Triticum durum* Desf.) dans la région de Sétif. *Céréaliculture* 37, 24-29.
- Hättenschwiler, S., Tiunov, A. & Scheu, S. (2005). Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Ann. Rev. Ecol. Evo and Syst.* 36, 191-218.
- He, J., Kuhn, N.J., Zhang, X.M., Zhang, X.R. & Li, H.W. (2009). Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China. *Soil Use and Management* 25, 201-209.
- Huwe, B. (2003). The role of soil tillage for soil structure. In: El Titi A. (ed.), *Soil Tillage in Agroecosystems*. CRC Press LLC., Boca Raton, 27-50.
- Ibekwe, A.M., Kennedy, A.C., Frohne, P.S., Papiernik, S.K., Yang, C.H. & Crowley, D.E. (2002). Microbial diversity along a transect of agronomic zones. *FEMS Microbiology Ecology* 39(3), 183-191.
- Jackson, M.L. (1967). *Soil chemical analysis*. Prentice-Hall of India Private Limited, New Delhi.
- Jeffery, S., Gardi, C., Jones, A., Montanarella, L., Marmo, L., Miko, L., Ritz, K. & Peres, G. (2010). *Atlas européen de la biodiversité du sol*. Publications Office of the European Union, Luxembourg.
- Khursheed, S., Simmons, C., Wani, S.A., Tahir, A., Raina, S.K. & Najar, G.R. (2019). Conservation tillage: impacts on soil physical conditions – an overview. *Advances in Plants Agriculture Research* 9(2), 342-346.
- Kicaj, H. (2023). Ecology of soil animals (Diplopoda class, Myriapoda group). *Scientific Horizons* 26(5), 37-45.
- Kjeldahl, J. (1883). Neue methode zur bestimmung des stickstoffs in organischen körpern [A new method for nitrogen determination in organic materials]. *Fresenius, Zeitschrift f. anal. Chemie* 22, 366-382.
- Kladivko, E. J. (2001). Tillage systems and soil ecology. *Soil & tillage research* 61(1-2), 61-76.
- Kraft, E., Oliveira Filho, L.C.I., Carneiro, M.C., Klauberger-Filho, O. & Maluche-Baretta, C.R.D. (2021). Edaphic fauna affects soybean productivity under no-till system. *Scientia Agricola*, 78(2), 1-11.
- Lavelle, P., Decaëns, T., Aubert, M., Barot, S., Blouin, M., Bureau, F., Margerie, P., Mora, P. & Rossi, J.P. (2006). Soil invertebrates and ecosystem services. *European Journal of Soil Biology* 42, 1-13.
- Lavelle, P., Mathieu, J., Spain, A., Brown, G., Fragoso, C., Lapied, E., De Aquino, A., Barois, I., Barrios, E., Barros, M.E., Bedano, J.C., Blanchart, E., Caulfield, M., Chagueza, Y., Dai, J., Decaëns, T., Dominguez, A., Dominguez, Y., Feijoo, A., Folgarait, P., Fonte, S., Gorosito, N., Huerta, E., Jimenez, J.J., Kelly, C., Loranger, G., Marchão, R., Marichal, R., Praxedes, C., Rodriguez, L., Rousseau, G., Rousseau, L., Sanabria, C., Suarez, J.C., Tondoh, J.E.T., De Valença, A., Vanek, S.J., Vasquez, J., Velasquez, E., Webster, E. & Zhang, C., (2022). A world wide assessment of soil macroinvertebrate communities. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 31(7), 1261-1276.
- Lavelle, P., Spain, A., Blouin, M., Brown, G., Decaëns, T., Grimaldi, M., Jiménez, J.J., McKey, D., Mathieu, J., Velasquez, E., & Zangerlé, A. (2016). Ecosystem engineers in a self-organized soil: A review of concepts and future research questions. *Soil Science* 181(3-4), 91-109.
- Lipiec, J & Stepniewski, W.E. (1995). Effect of soil compaction and tillage systems on uptake and losses of nutrients. *Soil Tillage and Research* 35, 37-52.
- Menta, C., Bonati, B., Staffilani, F. & Conti, F.D. (2017). Agriculture management and soil fauna monitoring: The case of Emilia-Romagna region (Italy). *Agriculture Research and Technology* 4(5), 2471-2474.
- Pelosi, C., Bertrand, M., & Roger-Estrade, J. (2009). Earthworm community in conventional, organic and direct seeding with living mulch cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 287-295.
- Peres, G., Piron, D., Bellido, A., Goater, C. & Cluzeau, D. (2008). Earthworms used as indicators of agricultural managements. *Fresenius Environ. Bull.* 17, 1181-1189.

- Pesson, P. (1971). *La vie dans les sols. Aspect nouveau, études expérimentales*. Gauthiers-Villars, Paris.
- Petersen, H. (2002). General aspects of collembolan ecology at the turn of the millennium Proceedings of the Xth international Colloquium on Apterygota. *Pedobiologia* 46(3-4), 246-260.
- Ponge, J.F. (1999). Interaction between soil fauna and their environment. In: Rastin N. & Bauhus J. (eds), *Going underground: Ecological studies in forest soils*. Research Signpost, Thiruvananthapuram: 45-76.
- Wang, L., Wang, H., Zhengchao Tian, Z., Lu, Y., Gao, W. & Ren, T. (2020). Structural changes of compacted soil layers in northeast China due to freezing-thawing processes. *Sustainability* 12, 1-13.
- Winter, J P., Voroney, R P. & Ainsworth, D A. (1990). Soil microarthropods in long-term no-tillage and conventional tillage corn production. *Canadian Journal of Soil Science* 70, 641-653.
- Young, I.M. & Ritz, K. (2000). Tillage, habitat space and function of soil microbes. *Soil and Tillage Research* 53, 201-213.

Annexe

Correlation matrix between invertebrate groups
(Pearson's test, $P \leq 0.05$)

Invertebrates	Collembola	Nematoda	Diptera	Hymenoptera	Myriapoda	Oligochaeta
Acari	0.82	-	-	-	0.84	-
Protura	-	0.93	-0.84	-	-	-
Myriapoda	0.81	-	-	0.9	1	0.92
Oligochaeta	-	-	-	0.94	0.92	1
Pseudoscorpionida	-	0.9	-	-	-	-
Gastropoda	-	-	-	0.84	-	0.86

Résumés de thèses

Morgane MAUDUIT

2023

Capture et caractérisation chimique des exométabolites de deux éponges de Méditerranée: Aplysina cavernicola (Vacelet, 1959) et Agelas oroides (Schmidt, 1864)

Capture and chemical characterization of exometabolites from two Mediterranean sponges: *Aplysina cavernicola* (Vacelet, 1959) and *Agelas oroides* (Schmidt, 1864)

Thèse de doctorat, Aix Marseille Université, soutenue le 15 décembre 2023.

Jury – Nathalie TAPISSIER-BONTEMPS (Maîtresse de conférences, Université de Perpignan Via Domitia), Mehdi BENIDDIR (Professeur, Université Paris-Saclay), rapporteurs; Ali AL-MOURABIT (Directeur de recherches, CNRS ICSN), examinateur; Catherine LEBLANC (Directrice de recherches, CNRS Station biologique de Roscoff), examinatrice et présidente du jury; Thierry PÉREZ (Directeur de recherches, CNRS IMBE), directeur de thèse; Charlotte SIMMLER (Chargée de recherches, CNRS IMBE), codirectrice de thèse.

Mots-clés: exométabolites, éponges, *Aplysina cavernicola*, *Agelas oroides*, extraction sur phase solide, analyses métabolomiques par spectrométrie de masse.

Keywords: exometabolites, sponges, *Aplysina cavernicola*, *Agelas oroides*, solid phase extraction, mass spectrometry-based metabolomics.

Les éponges sont des invertébrés sessiles peuplant divers environnements aquatiques benthiques. Elles sont connues pour produire des métabolites spécialisés structuellement originaux, étudiés par les chimistes des substances naturelles pour leurs propriétés biologiques. Au travers de leurs activités métaboliques et de nutrition par filtration, les éponges libèrent des particules et des molécules dans leur environnement, incluant possiblement leurs métabolites spécialisés. Ces exométabolites (EMs) pourraient ainsi constituer un réservoir de nouvelles molécules accessibles dans l'eau au voisinage de l'éponge. Les méthodes de recherche développées au cours de ma thèse visaient à concentrer ces EMs dilués à l'état de traces dans l'eau de mer et à les caractériser chimiquement dans l'objectif ultime de proposer des méthodes durables d'accès à la chimiodiversité marine.

Ces travaux se concentrent sur deux éponges de Méditerranée: *Aplysina cavernicola* (Vacelet, 1959) et *Agelas oroides* (Schmidt, 1864). Ces espèces produisent des métabolites spécialisés de type bromotyrosines spiroisoxazolines et bromo-pyrroles, respectivement. Des méthodes basées sur un principe d'adsorption sur phase solide ont été développées pour concentrer les EMs en aquarium avec des résines polymériques et *in situ* à l'aide de l'instrument I-SMEL, en utilisant des disques SPE. Pour caractériser la composition chimique des EMs, des acquisitions de profils métabolomiques par spectrométrie de masse ont été combinées à des analyses de déréplication spectrales.

Les résultats obtenus en aquarium et *in situ* ont permis de caractériser une partie de la diversité des EMs d'*A. cavernicola*, définissant ainsi l'empreinte chimique de cette espèce sur son environnement marin. Cette empreinte est composée de sept métabolites bromés parmi lesquels certains étaient connus (par exemple: aérothionine), et d'autres sont soit nouveaux et décrits (aplysine), soit rapportés pour la première fois pour cette espèce (puréalidine L). Comparativement, les EMs spécialisés d'*A. oroides* sont peu diversifiés. L'oroidine est l'alcaloïde bromé majoritaire concentré à la surface de l'éponge. Il n'est pas toujours détecté parmi les EMs récoltés dans l'eau de mer autour de l'éponge. Une étude de stabilité de l'oroidine diluée dans l'eau de mer artificielle a permis de démontrer la transformation rapide de cette molécule aboutissant à la production d'autres alcaloïdes bromés cyclisés, parmi lesquels la longamide B methyl ester, un EMs de l'éponge confirmé par les expériences en aquarium et *in situ* avec I-SMEL.

Ces travaux établissent un socle de nouvelles connaissances techniques et analytiques pour accéder et caractériser les EMs marins et ainsi potentiellement bouleverser la chimie des produits naturels marins et l'écologie chimique marine. En effet, ils mettent en lumière le potentiel de découverte de ce nouvel espace chimique diffusé dans l'océan et résultant au moins partiellement de la réactivité des molécules exsudées dans l'eau de mer. Les connaissances recueillies permettront de poursuivre des études systématiques de la diversité des EMs d'organismes benthiques, pour la découverte plus éco-responsable de métabolites marins, mais aussi pour l'étude de leurs fonctions au sein des écosystèmes.

Sponges (Porifera) are benthic sessile invertebrates occupying diverse aquatic habitats. These animals are known to produce structurally original specialized metabolites,

investigated by natural product chemists for their biological properties. Through their filter-feeding and metabolic activities, sponges release into their surroundings particles and molecules, possibly including their specialized metabolites. These so-called exometabolites (EMs) may constitute a source of new molecules, accessible in the seawater at the vicinity of the organism. The research methods developed during my PhD aimed to concentrate these EMs found in trace amounts in seawater and to chemically characterize them. The overarching goal is to propose sustainable methods for accessing marine chemical diversity.

This work focuses on two Mediterranean sponge species: *Aplysina cavernicola* (Vacelet, 1959) and *Agelas oroides* (Schmidt, 1864). These species biosynthesize brominated alkaloids, respectively bromotyrosine spiroisoxazolines and bromo-pyrroles. Two methods were developed to concentrate sponge's EMs: one involves solid-phase adsorption using polymeric resins in aquarium, and the other utilizes the I-SMEL instrument deployed *in situ* with solid-phase extraction (SPE) disks. Mass spectrometry-based metabolomics combined with a dereplication process were used to characterize the chemical composition of EMs. Data collected both from aquarium and *in situ* experiments led to the characterization of the chemical diversity of *A. cavernicola*'s EMs, which represent the chemical fingerprint of this species in its surrounding marine environment. This specific fingerprint comprises seven specialized brominated metabolites: some were already known (e.g. aerothionin) others were either newly characterized (aplysine 1) or reported for the first time in this species (purealidin L). Seawater extracts collected near *A. oroides* were comparatively less diverse in specialized EMs. This sponge is known to mainly produce oroidin, a bromo-pyrrole alkaloid. This metabolite was found to be highly concentrated at the sponge surface. Nevertheless, this molecule was only sporadically detected as EM. When diluted in seawater, oroidin was found to degrade rapidly, forming new cyclized brominated alkaloids. Some of these degradation products, such as longamide B methyl ester, were confirmed as *A. oroides*'s EMs after both the in-aquaria and *in-situ* experiments with I-SMEL.

The results obtained during my PhD establish a foundation of both technical and analytical knowledge to access and characterize marine EMs and to potentially overturn the fields of marine natural products research and marine chemical ecology. The results also showcased the formation of a new chemical space diffused in the marine environment, at least partially resulting from the inherent reactivity of some released molecules in seawater. This project opens the door to future studies on marine chemical diversity through the characterization of EMs produced by benthic organisms, with the ultimate goals to discover new molecules and understand their functions in marine ecosystems.

Marie GRENIER

2023

Systématique intégrative des éponges de bain (Demospongiae, Dictyoceratida, Spongiidae) et évaluation de leurs propriétés neuropharmacologiques

Integrative taxonomy of Bath Sponges (Demospongiae, Dictyoceratida, Spongiidae) and Evaluation of their Neuropharmacological properties

Thèse de doctorat, CIFRE (IMBE CNRS UMR 7263; Neuralia SAS), soutenue le 20 décembre 2023.

Jury – Michelle KLAUTAU (Professeure, Universidade Federal de Rio de Janeiro), rapporteuse; Javier CRISTOBO (Directeur de recherches, Consejo Superior de Investigaciones Científicas), rapporteur; Gérald CULIOLI (Professeur, Université d'Avignon), président du Jury; Thierry PÉREZ (Directeur de recherches, Centre national de la recherche scientifique), directeur de thèse; Noëlle CALLIZOT (Directrice scientifique, Neuralia SAS), co-directrice de thèse; Pierre CHEVALDONNÉ (Directeur de recherches, Centre national de la recherche scientifique), examinateur; Charlotte SIMMLER (Chargée de recherche, Centre national de la recherche scientifique), membre invité.

Mots-clés: Porifera, taxonomie, squelette, spongine, génétique, métabolomique, neuroprotection, Alzheimer, éco-responsable.

Keywords: Porifera, taxonomy, skeleton, spongin, genetics, metabolomics, neuroprotection, Alzheimer, sustainable development.

Les éponges de bain (famille Spongiidae) incluent aujourd'hui 150 espèces, parmi lesquelles certaines sont exploitées par la pêche pour leur squelette. L'organisation de ce squelette, fait exclusivement de fibres de spongine, leur confère des propriétés d'élasticité, de résistance et d'absorption variables selon les espèces. Ces éponges sont aussi connues pour produire beaucoup de métabolites spécialisés, en majorité de nature terpénique. De nombreuses études ont été conduites pour montrer le potentiel pharmacologique de ces éponges. Dans le domaine particulier des pathologies neurodégénératives comme la maladie d'Alzheimer, les propriétés des Spongiidae restent peu étudiées malgré leurs potentiels.

L'objectif général de ce travail a été d'étudier le potentiel neuropharmacologique de différentes Spongiidae précisément identifiées. Une approche de taxonomie intégrative a combiné analyses morphologiques du squelette, analyses génétiques et analyses métabolomiques. Ces dernières ont été

corrélées aux mesures des activités biologiques et utilisées pour évaluer l'efficacité de méthodes originales de double valorisation de spécimens pêchés. Au total, 160 spécimens de Spongiidae ont été échantillonnés en Méditerranée, dans le détroit de Gibraltar, en Atlantique du Nord-Est, dans les Caraïbes, le golfe du Mexique et dans l'océan Indien.

Les analyses taxonomiques ont permis de mettre en évidence un complexe d'espèces autour de *Spongia officinalis*, l'espèce type du genre *Spongia* et référence absolue de la famille. Il est également apparu que ni *Spongia* ni *Hippospongia* n'étaient monophylétiques. Une éponge nouvelle pour la science a été décrite, *Spongia maitasuna* sp. nov., et plusieurs autres éponges, précédemment assignées à *S. officinalis*, sont encore à décrire. La résolution de ce complexe pourrait amener à doubler la diversité des Spongiidae de Méditerranée et d'Atlantique du Nord-Est. Les Caraïbes ont offert des cas taxonomiques aussi complexes, ce qui devrait conduire *a minima* à la résurrection de noms d'espèce aujourd'hui invalides. Dans l'océan Indien, toutes les éponges échantillonnées sont nouvelles.

Au total, 24 extraits de différentes Spongiidae ont fait l'objet de tests neuropharmacologiques sur des modèles cellulaires de neurones corticaux stressés, mimant la maladie d'Alzheimer. Parmi eux, 9 extraits, dont ceux de la nouvelle espèce, ont présenté une activité neuroprotectrice, en améliorant la survie des neurones et de leur réseau neuritique après un stress induit par un agent toxique: le glutamate. Des hypothèses sur l'identité des molécules potentiellement porteuses de la neuroprotection ont été formulées grâce à des analyses biochimométriques. Il s'agit de « spongian » diterpènes, une famille structurale largement distribuée chez les Spongiidae.

Victimes de maladies et de mortalités massives à répétition, ces éponges sont particulièrement menacées par le changement climatique. Dans ce contexte, il était important de proposer des solutions durables de valorisation de leur chimiodiversité. Une première solution serait d'exploiter le « lait » des éponges, éliminé par les pêcheurs après la récolte pour ne garder que le squelette. La deuxième solution réside dans l'utilisation d'I-SMEL, un instrument portable permettant la capture par adsorption sur phase solide des métabolites exsudés par l'éponge dans l'eau environnante. Ces deux méthodes ont permis de récupérer une partie des terpènes connus chez *S. officinalis*, ce qui représente des preuves de concepts qui pourraient rapidement trouver des applications dans de nombreux champs de recherche. La diversité des résultats obtenus par ce travail interdisciplinaire offre de nombreuses perspectives, un chantier colossal pour revoir intégralement la systématique de ces éponges, afin de tracer la distribution des diterpènes et de tester leurs activités neuroprotectrices, notamment pour lutter contre la maladie d'Alzheimer.

Today, bath sponges (family Spongiidae) include 150 species, some of them are exploited by fishermen for their skeletons. The skeletal organization, exclusively made of spongin fibres, gives them elasticity, resistance and absorp-

tion properties that vary among species. These sponges are also known to produce many specialized metabolites, most of them being terpenoids. Numerous studies were carried out to demonstrate the pharmacological potential of these sponges. In the most specific field of neurodegenerative pathologies such as Alzheimer's disease, the properties of Spongiidae remain less investigated despite their potentials.

The general aim of this thesis was to investigate the neuropharmacological potential of a number of accurately identified Spongiidae. To achieve this goal, an integrative taxonomic approach combined morphological analyses of skeletons, genetic and metabolomic analyses. The latter were correlated with the biological activities, and used to evaluate the efficiencies of novel methods of dual valorization of harvested specimens. A total of 160 Spongiidae specimens were sampled in the Mediterranean Sea, the Strait of Gibraltar, the Northeast Atlantic, the Caribbean, the Gulf of Mexico and the Indian Ocean.

Taxonomic analyses revealed a species complex around *Spongia officinalis*, the type species of the genus *Spongia* and the absolute reference of the family. It also emerged that neither *Spongia* nor *Hippospongia* were monophyletic. A sponge new to science has been described, *Spongia maitasuna* sp. nov., and several others previously assigned to *S. officinalis* remain to be described. Solving this complex could double the diversity of Mediterranean and Northeast Atlantic Spongiidae. The Caribbean has offered similarly complex taxonomic cases, which should lead at the very least to the resurrection of currently invalid species names. From the Indian Ocean, all sampled sponges have to be described.

A total of 24 extracts from different Spongiidae were subjected to in vitro neuropharmacological assays on primary cultures of cortical neurons associated to Alzheimer's disease. Among them, 9 extracts, including those of the new species, showed neuroprotective activity, increasing survival of neurons and protecting their neuritic network. Biochemical analyses were conducted to identify potential molecules supporting for the neuroprotective effects. Spongian diterpenes were found, a structural family widely distributed in Spongiidae. Victims of repeated disease and mass mortality events, these sponges are particularly threatened by climate change. In this context, sustainable solutions for exploiting their chemodiversity had to be provided. A first solution could be to exploit the sponge «milk», *i.e.* all the cells removed by fishermen after harvesting, leaving only the skeleton. A second solution lies in the deployment of I-SMEL, an handheld instrument that captures by solid phase adsorption metabolites exuded by the sponge in its surrounding water. These two methods allowed us to find some of the terpenes known from *S. officinalis*, providing evidences for concepts that could rapidly find applications in many fields of research.

The diversity of the results obtained from this interdisciplinary work opens up a wide range of perspectives, including a colossal project to completely overturn the systematics of these sponges, in order to trace the distribution of diterpenes and further evaluate their neuroprotective activities, particularly in the fight against Alzheimer's disease.

Lucas PETIT dit Grézériat

2024

Amélioration de la fertilité des sols viticoles par apports massifs de matière organique et inoculation de vers de terre

Improvement of vineyard soil fertility through massive organic matter inputs and earthworm inoculation

Thèse de doctorat, Avignon Université, soutenue le 22 octobre 2024.

Jury – Cornélia RUMPEL (Directrice de recherches, UMR IEES, CNRS), rapporteure; Manuel BLOUIN (Professeur, UMR Agroécologie, Institut Agro Dijon), rapporteur; Raphaël GROS (Professeur, Aix-Marseille Université, IMBE), président, rapporteur; Jean-Yves CORNU (Chargé de recherche HDR, UMR ISPA, INRAE), examinateur; Magali RAULT (Maître de conférences HDR, Avignon Université, IMBE), directrice de thèse; Céline PELOSI (Directrice de recherches, UMR EMMAH, INRAE), co-directrice de thèse.

Mots-clés: vers de terre, matière organique, fertilité, vigne, inoculation, restauration.

Keywords: earthworm, organic matter, fertility, vineyard, inoculation, restoration.

La dégradation des sols est une problématique environnementale majeure, de plus en plus préoccupante, qui pousse la communauté scientifique à s'interroger sur les possibilités de restauration de ces écosystèmes. Les sols viticoles sont concernés par ce phénomène, notamment en raison de faibles taux de matière organique (MO), d'une contamination par le cuivre et d'une biodiversité souvent appauvrie. Parmi cette biodiversité, on constate des abondances généralement faibles d'organismes ingénieurs des sols comme les vers de terre, ce qui traduit une fertilité biologique potentiellement réduite.

Ce travail de thèse étudie le potentiel d'application d'une méthode d'ingénierie écologique basée sur l'inoculation de vers de terre et l'apport de MO pour améliorer la fertilité des sols viticoles en région méditerranéenne. En particulier, l'objectif était de répondre à quatre questions : 1) La méthode d'inoculation de vers de terre est-elle efficace pour permettre aux espèces de s'établir en plein champ ? 2) Quelles sont les fonctions clés du sol affectées par l'application de cette méthode ? 3) Comment les interactions inter-espèces affectent-elles les traits d'histoire de vie des vers de terre en présence de MO ? 4) Quels sont les effets des vers de terre sur les activités enzymatiques et respiratoires microbiennes du sol en fonction des apports de MO ?

Dans le premier chapitre, nous avons réalisé une étude bibliographique quantitative (méta-analyse) afin d'évaluer les paramètres optimaux pour favoriser la réussite d'une inoculation de vers de terre. Les résultats de cette méta-analyse ont démontré l'intérêt d'inoculer une densité minimale de 150 individus par m², de préférence de plusieurs espèces, avec des effets positifs observables après deux ans.

Dans le second chapitre, différentes espèces de vers de terre (*Aporrectodea nocturna*, *Aporrectodea caliginosa*, *Allobophora chlorotica* et *Lumbricus terrestris*) ont été inoculées en novembre 2021 sur différentes parcelles viticoles en fonction d'apports de MO ou du mode de gestion de l'inter-rang (enherbement ou travail du sol). Après deux ans, *A. nocturna* est l'espèce qui semble s'établir le mieux sur le site expérimental de Valabre (Gardanne, 13). De plus, c'est dans la modalité MVA, MO non compostée utilisée sous forme de paillage (200 t ha⁻¹), que les communautés de vers de terre sont les plus importantes. Les inoculations de vers de terre ont augmenté la quantité de cuivre et de potassium biodisponibles pour la plante, ainsi que le carbone labile. En outre, l'apport de MVA a également augmenté la quantité de magnésium biodisponible, ainsi que l'azote et le carbone organique total du sol. Concernant l'effet du travail du sol, évalué sur deux autres parcelles, les inoculations ont augmenté les densités de vers de terre à court terme sur les deux sites suivis (un an maximum), notamment dans les inter-rangs enherbés.

Dans le troisième chapitre, des interactions positives entre *A. nocturna* et *A. caliginosa* sur la reproduction de *A. caliginosa* ont été identifiées, soulignant l'importance du choix des espèces pour l'application de ce type de méthode. De plus, dans le quatrième chapitre, les activités respiratoires du sol ont généralement été augmentées en présence de vers de terre. Avec apport de MVA, la présence de l'espèce *A. nocturna* a également permis d'augmenter les activités enzymatiques liées notamment au cycle du carbone.

Ce travail de thèse apporte donc des éléments de réponse fondamentaux et appliqués sur la mise en œuvre et les conséquences fonctionnelles de la méthode d'ingénierie des sols proposée. De premiers effets sur le fonctionnement des sols ont pu être identifiés, permettant aux viticulteurs d'évaluer si une telle méthode peut répondre à leurs besoins sur la parcelle.

Soil degradation is a major and increasingly concerning environmental issue, that leads the scientific community to explore the possibilities of restoring these ecosystems. Vineyard soils are particularly affected by this phenomenon, primarily due to low levels of organic matter (OM), copper contamination, and often depleted biodiversity. Among this biodiversity, there are generally low abundances of soil engineer organisms like earthworms, indicating a potentially reduced biological fertility.

This PhD thesis investigates the potential of the application of an ecological engineering method based on the inoculation of earthworms and the addition of OM to improve the fertility of vineyard soils in the Mediterranean region. Specifically, the objective was to address four questions: 1) Is the earthworm inoculation method effective in allowing species to establish in the field? 2) What key soil functions are impacted by the application of this method? 3) How do interspecies interactions affect the life history traits of earthworms in the presence of OM? 4) What are the effects of earthworms on soil microbial enzymatic and respiratory activities according to OM inputs?

In the first chapter, we conducted a quantitative literature review (meta-analysis) to assess the optimal parameters for promoting the success of earthworm inoculation. The results of this meta-analysis demonstrated the importance of inoculating a minimum density of 150 individuals per square meter, preferably of multiple species, with positive effects visible after two years.

In the second chapter, different earthworm species (*Aporrectodea nocturna*, *Aporrectodea caliginosa*, *Allolobophora chlorotica*, and *Lumbricus terrestris*) were inoculated in November 2021 at various vineyard sites, depending on OM inputs or inter-row management practices (grass cover or soil tillage). After two years, *A. nocturna* appears to be the species that establishes itself best at the Valabre experimental site (Gardanne, 13). Moreover, it is in the ROM treatment, where non-composted OM was used as mulch (200 t ha⁻¹), that earthworm communities are most abundant. Earthworm inoculations increased the amount of copper and potassium available to plants, as well as labile carbon. In addition, the ROM treatment also increased the amount of bioavailable magnesium, as well as total nitrogen and organic carbon in the soil. Regarding the effect of soil tillage, evaluated on two other sites, inoculations increased earthworm densities in the short term on both monitored sites (up to one year), particularly in grass-covered inter-rows.

In the third chapter, positive interactions between *A. nocturna* and *A. caliginosa* were identified on the reproduction of *A. caliginosa*, highlighting the importance of species selection for the application of this method. Furthermore, in the fourth chapter, soil respiratory activities were generally enhanced in the presence of earthworms. With the addition of ROM, the presence of *A. nocturna* also increased enzymatic activities related to the carbon cycle.

Therefore, this PhD thesis provides both fundamental and applied insights into the implementation and functional consequences of the proposed soil engineering method. Initial effects on soil functioning have been identified, allowing winegrowers to assess whether such a method can meet their needs in the field.

Petr KUZNETSOV

2024

Anatomie et ultrastructure des femelles de Bonellia viridis (Annelida: Thalassematidae: Bonelliinae)

Anatomy and ultrastructure of females of *Bonellia viridis* (Annelida: Thalassematidae: Bonelliinae)

Thèse de doctorat, Aix Marseille Université, soutenue publiquement le 22 novembre 2024.

Jury – Thierry PÉREZ (Directeur de recherches CNRS, IMBE), président, examinateur; Anne ANDERSON (Maître de conférences, Sorbonne Université), examinatrice; Sylvie GAUDRON (Maître de conférences, Sorbonne Université), examinatrice; Andrey OSTROVSKY (Professeur, Université d'État de Saint-Petersbourg), rapporteur; Andreas SCHMIDT-RHAESA (Professeur, Museum der Natur Hamburg), rapporteur; Alexander ERESKOVSKY (Directeur de recherche CNRS, IMBE), directeur de thèse; Elena TEMEREVA (Professeur, Université d'État de Moscou), co-directrice de thèse; Alexander TZETLIN (Professeur, Université d'État de Moscou), examinateur.

Mots-clés: Annelida, morphologie, structure fine, Thalassematidae, ultrastructure.

Keywords: Annelida, morphology, fine structure, Thalassematidae, ultrastructure.

Les échiuriens (Thalassematidae) constituent un groupe spécial des annélides non segmentés qui mènent une vie secrète, cachant leur corps dans des terriers. *Bonellia viridis* Rolando, 1822 est un organisme qui effectue de l'ingénierie environnementale. L'étude de la morphologie est l'un des principaux moyens de faire la lumière sur la physiologie et l'écologie de ces vers. Cette thèse vise à étudier la morphologie, l'anatomie microscopique et les détails de l'organisation ultrafine des systèmes organiques chez les femelles de *B. viridis* et leur analyse pour mieux comprendre l'évolution, la physiologie et la reproduction de ces annélides.

Cette étude visait principalement : 1) à décrire la colocalisation et l'organisation histologique générale de tous les systèmes d'organes, la structure fine des organes des femelles de *B. viridis*, 2) à mener une analyse comparative des données obtenues et 3) à identifier des modèles communs dans la structure des systèmes d'organes des échiuridés en général et de *B. viridis* en particulier. Ceux-ci ont été réalisés en utilisant microCT, microscopie électronique (MEB et MET) et histologiques. Des autopsies et des reconstructions 3D d'une série de coupes ont été utilisées pour déterminer la colocalisation des organes et leur anatomie microscopique.

Les principales caractéristiques de l'organisation des échiurides sont associées à la perte de métamères pendant l'évolution et à un type particulier de nutrition, dont l'efficacité permet aux échiurides de coloniser relativement librement les eaux oligotrophes de l'océan mondial. Les détails structuraux révélés des femelles de *B. viridis*, qui les distinguent des autres échiurides, sont principalement associés à la présence de grands lobes terminaux et de structures supplémentaires associées, ainsi qu'aux caractéristiques de la biologie de la reproduction : vitellogenèse accélérée et présence d'un androcée, tapissé d'épithélium glandulaire, qui attire et nourrit les mâles.

Echiuran worms (Thalassematidae) are a special group of non-segmented annelids that lead a secretive lifestyle, hiding their bodies in burrows. *Bonellia viridis* Rolando, 1822 is an organism that performs environmental engineering. Studying morphology is one of the main ways to shed light on the physiology and ecology of these mysterious worms. This thesis is aimed at studying the morphology, microscopic anatomy and details of the ultrathin organization of organ systems in *B. viridis* females and their analysis in the light of the evolutionary, physiological and reproductive characteristics of the group.

This study mainly aimed 1) to describe the colocalization and general histological organization of all organ systems, the fine structure of the organs of *B. viridis* females, 2) to conduct a comparative analysis of the data obtained and 3) to identify common patterns and features in the structure of the organ systems of echiurids in general and *B. viridis* in particular. This was achieved by using a set of morphological methods such as microCT, SEM, TEM, histological techniques. Autopsies and three-dimensional reconstructions of a series of sections were used to determine the colocalization of various organs and their microscopic anatomy.

The main features of the organization of echiurids are associated with the loss of metameria and a special type of nutrition, the effectiveness of which allows echiurids to colonize oligotrophic waters of the world ocean. The revealed structural details of *B. viridis* females, which distinguish them from other echiurids, are primarily associated with the presence of large terminal proboscis lobes and associated additional functional structures, as well as with the features of reproductive biology: accelerated vitellogenesis and the presence of a large androcium, which is lined with glandular epithelium and provides attraction and nutrition for dwarf males.

Lise VIOLLAT

2024

La démographie animale en mouvement. Explorer le lien entre les déplacements individuels et la variabilité des paramètres démographiques

Animal demography in movement: Exploring the link between individual movements and variability in demographic parameters

Thèse de doctorat, École pratique des hautes études, soutenue le 26 novembre 2024.

Jury – Pierre-Yves HENRY (Professeur, MNHN – Président), rapporteur; Marlène GAMELON (Chargé de recherche, CNRS LBBE), rapporteure; Marion VALEIX (Chargé de recherche, CNRS CEFÉ), examinatrice; Joan REAL ORTI (Professeur, Universitat de Barcelona), examinateur; Aurélien BESNARD (Directeur d'étude, EPHE CEFÉ), directeur de thèse; Alexandre MILLON (Maître de conférences, CNRS IMBE), co-directeur de thèse; Cécile PONCHON (CEN PACA), membre invité; Alain RAVAYROL (Association la Salsepaille), membre invité.

Mots-clés: dynamique des populations, écologie du déplacement, comportement, hétérogénéité individuelle, territorialité, bio-télémetrie.

Keywords: population dynamics, movement ecology, behaviour, individual heterogeneity, territoriality, biotelemetry.

Les paramètres démographiques des individus sont directement influencés par les conditions de l'environnement, telles que la météo ou la qualité des habitats, et par les événements auxquels ils sont confrontés au cours de leur vie. L'effet de ces pressions externes sur la survie et les performances reproductrices des individus varie en fonction de leurs caractéristiques individuelles, comme l'âge, le sexe, l'expérience, le statut reproducteur ou la qualité intrinsèque. Le déplacement est un comportement clé des vertébrés, qui leur permet d'accéder aux ressources nécessaires à leur survie et à celle de leur progéniture, ainsi que de s'adapter aux variations des conditions environnementales. Ce comportement peut avoir des conséquences directes sur la survie et le succès reproducteur des individus en raison de la balance entre les bénéfices qu'il fournit et le coût énergétique qu'il occasionne. Les relations entre les comportements de déplacement et les paramètres démographiques, tels que le succès reproducteur, demeurent cependant mal connues, l'étude de la démographie et du déplacement ayant longtemps reposé sur des approches techniques à des échelles temporelles

différentes. Grâce aux progrès réalisés en matière de biotélémétrie, nous avons désormais accès aux déplacements d'un grand nombre d'individus sur le long terme, ce qui permet l'étude des relations entre déplacement et démographie. L'objectif de cette thèse est ainsi d'explorer ces relations chez un rapace longévif et territorial, l'aigle de Bonelli (*Aquila fasciata*), pour lequel nous disposons à la fois de données démographiques à long terme et de déplacements détaillés des mêmes individus.

En premier lieu, nous avons vérifié que l'équipement de balises GPS n'avait pas d'impact sur la survie et le succès reproducteur des aigles de Bonelli territoriaux. Nos résultats n'ont pas montré d'effets délétères de l'équipement avec des balises GPS sur les adultes qui auraient pu affecter la dynamique de la population et contre-indiquer l'utilisation du GPS chez cette espèce ou biaiser les estimations des paramètres démographiques étudiés par la suite.

Nous nous sommes ensuite intéressés à la manière dont la qualité des territoires et leur composition en habitats pouvaient avoir un impact sur le succès reproducteur des aigles de Bonelli et dont la sélection d'habitats par les individus pouvait médier ces effets. Nous avons ensuite exploré les relations entre déplacement et succès reproducteur, en étudiant indirectement la balance énergétique entre les deux, et étudié si ces relations étaient affectées indirectement par les conditions météorologiques locales et par l'expérience des individus. Enfin, nous avons étudié les variations des déplacements au cours de la saison de reproduction en fonction du statut reproducteur des individus. Nous n'avons identifié que peu de liens, directs ou indirects, entre les comportements de déplacement des individus et leurs performances reproductrices. Ce rapace semble faire preuve d'une importante plasticité comportementale face aux conditions hétérogènes de son environnement, notamment en modifiant ses stratégies de déplacement. Cette plasticité pourrait être facilitée par la capacité des individus à pratiquer un mode de vol ainsi qu'un mode de chasse peu coûteux en énergie. Nos résultats mettent aussi en évidence le rôle de l'expérience dans cette plasticité : avec l'expérience, les individus deviennent efficaces dans la recherche de proies et adaptent leurs stratégies de déplacement aux conditions météorologiques afin de minimiser les coûts énergétiques des déplacements, favorisant ainsi leur succès reproducteur.

Nous ouvrons ainsi plusieurs pistes pour enrichir notre compréhension des relations entre déplacements et démographie chez les vertébrés. Cependant, quantifier ces relations n'est pas une tâche aisée, notamment chez des espèces longévives, territoriales et utilisant des modes de déplacement peu coûteux comme l'aigle de Bonelli.

The demographic parameters of individuals are directly influenced by environmental conditions, such as weather or habitat quality, and by the events that individuals experience during their life history. The effect of these extrinsic factors on the survival and breeding performance of

individuals varies considerably according to individual characteristics such as age, sex, experience, reproductive status or intrinsic quality. Movement is a key behaviour in vertebrates, allowing individuals to access the resources necessary for their own survival and their offspring's survival and to adapt to changing environmental conditions. Movement can have a direct impact on the survival and reproductive success of individuals through the balance between the benefits it provides and the energy costs it entails. However, the relationship between movement behaviour and demographic parameters such as breeding success remains poorly understood as the study of demography and movement has long been based on technical approaches at different time scales. Thanks to advances in biotelemetry, we now have access to the movements of large numbers of individuals over the long term, making it possible to study the relationship between movement and demography. The aim of this paper is to explore these relationships in a long-lived territorial raptor, the Bonelli's eagle, *Aquila fasciata*, for which we have both long-term demographic data and detailed movements of the same individuals.

First, we verified that GPS tagging had no effect on the survival and reproductive success of territorial Bonelli's eagles. Our results showed no detrimental effects of tagging adults that might have affected population dynamics, contraindicated the use of GPS in this species, or biased estimates of demographic parameters studied later.

We then investigated how the quality of territories and their habitat composition might affect the breeding success of Bonelli's eagles, and whether habitat selection by individuals might mediate these effects. We then explored the relationships between movement and breeding success by indirectly examining the energy balance between the two, and whether these relationships were indirectly influenced by local weather conditions and individual experience. Finally, we studied the variation in movement during the breeding season as a function of the reproductive status of individuals. We found few direct or indirect relationships between the movements of individuals and their breeding success. This raptor seems to show behavioural plasticity in response to heterogeneous environmental conditions, in particular by modifying its movement strategies. This plasticity may be facilitated by the ability of individuals to adopt energy-efficient modes of flight and hunting. Our results also highlight the role of experience in this plasticity: with experience, individuals become more efficient at searching for prey and adjusting their movement strategies to weather conditions in order to minimise the energy cost of travel, thereby maximising their breeding success.

We have thus opened up a number of avenues for improving our understanding of the relationship between movement and demography in vertebrates, while at the same time highlighting the fact that quantifying this relationship is no easy task, particularly in long-lived, territorial species such as Bonelli's eagles that use low energy cost modes of movement

Clémentine MUTILLOD

2024

*Restaurer ou ré-ensauvager ?
Approches conceptuelles,
taxonomiques et fonctionnelles
de l'influence d'herbivores
domestiques ou « sauvages »
sur les pelouses sèches du Causse
Méjean (Massif Central, France)*

**Restore or rewild? Conceptual,
taxonomic and functional
approaches to the influence
of domestic or 'wild' herbivores
on the dry grasslands of the Causse
Méjean (Massif Central, France)**

Thèse de doctorat, Avignon Université, soutenue publiquement le 4 décembre 2024.

Jury – Nathalie PETTORELLI (Professeure, Institute of Zoology London), rapporteure; Bertrand SCHATZ (Directeur de recherches CNRS, CEFE Montpellier), rapporteur; Marie-Lise BENOT (Maître de conférences, INRAE Bordeaux), examinatrice; Frédéric JOLY (Chargé de recherches, INRAE Saint-Genès-Champagnelle), examinateur; Thierry DUTOIT (Directeur de recherches CNRS, UMR IMBE, IUT Avignon), directeur de thèse; Élise BUISSON (Maître de conférences HDR, UMR IMBE, IUT Avignon), co-directrice de thèse; Laurent TATIN (Docteur, chercheur indépendant, associé à l'IMBE), co-encadrant de thèse; Sébastien CARTON DE GRAMMONT (Responsable du centre d'élevage, TAKH), membre invité.

Mots-clés: ré-ensauvagement, restauration écologique, conservation, grands herbivores, biodiversité, écologie des communautés, écologie fonctionnelle, entomologie, coléoptères coprophages, fonction de dégradation, pelouses semi-naturelles, Causse Méjean, France.

Keywords: rewilding, ecological restoration, biological conservation, large herbivores, biodiversity, community ecology, functional ecology, entomology, dung beetles, function of degradation, semi-natural grasslands, Causse Méjean, France.

L'urgence de restaurer les écosystèmes face au déclin de la biodiversité et des fonctions écologiques associées a propulsé le ré-ensauvagement sur le devant de la scène scientifique et médiatique. Deux constats ont découlé des recherches récentes, i) la confusion qui existe entre restauration écologique et ré-ensauvagement et ii) un intérêt croissant pour le ré-ensauvagement trophique *via* la réintroduction (voire l'introduction dans le cas de taxons de substitution) d'espèces clés de voûte ou ingénieurs de l'écosystème, telles que les grands herbivores. Ces derniers génèrent un intérêt

particulier de par leurs effets directs et indirects sur les écosystèmes *via* la consommation des plantes, leurs excréments et le piétinement. De plus, leurs populations sauvages ont souffert d'extinctions majeures relatives aux changements climatiques et à la chasse par les humains, produisant des effets cascades et des pertes de fonctions dans les écosystèmes. Cependant, encore peu d'études évaluent les effets de leur retour dans les écosystèmes, sur leur biodiversité et leurs fonctions, et encore moins en comparaison d'actions plus classiques de conservation et de restauration avec l'utilisation d'animaux domestiques (et gérés comme tels).

Le premier chapitre de cette thèse vise à clarifier les objectifs et les approches de la restauration écologique et du ré-ensauvagement. Une synthèse de la littérature scientifique a été réalisée, en retraçant leurs origines, en comparant leurs définitions et leurs principes les plus récents, en étudiant leurs points communs et leurs différences dans les approches et les méthodes utilisées pour rétablir les écosystèmes dégradés. Cette synthèse met en lumière la complémentarité spatio-temporelle de ces deux approches et souligne l'intérêt pour les scientifiques et les gestionnaires d'une prise en compte des résultats et des retours d'expériences de ces deux stratégies.

Les recherches effectuées lors des trois autres chapitres visent à apporter des éléments de réponses quant aux effets de l'introduction de grands herbivores gérés « comme sauvages » sur un socio-écosystème herbacé. Il y a une trentaine d'années, sur le Causse Méjean (France), des chevaux de Przewalski (*Equus ferus przewalskii*) ont été introduits en semi-liberté à des fins de conservation de l'espèce, alors éteinte à l'état sauvage. Cette introduction a permis aujourd'hui de comparer ce système de gestion avec les systèmes d'élevages extensifs ovins (*Ovis aries*) séculaires sur le territoire ou de chevaux domestiques (*Equus ferus caballus*) implantés plus récemment. Trois sous-questions de recherche ont été posées : quels sont les effets de différents herbivores et de leurs gestions associées (domestique ou « comme sauvage ») sur les communautés végétales herbacées 1) *via* une approche taxonomique et 2) *via* une approche fonctionnelle ? 3) Quels sont les effets sur les assemblages et les groupes fonctionnels des coléoptères coprophages, ainsi que leurs rôles dans la dégradation de la matière organique fécale ? Nos résultats montrent que l'introduction de chevaux (domestiques ou gérés « comme sauvages ») permet de conserver les pools d'espèces composant les communautés végétales et les assemblages de coléoptères coprophages. Cependant, des différences taxonomiques et fonctionnelles plus fines apparaissent. La fonction de dégradation reste notamment plus rapide dans les systèmes d'élevages ovins. Ces distinctions seraient liées, d'une part, aux différences physiologiques des animaux (ovin *vs* équin) et, d'autre part, au type de gestion (domestique *vs* « comme sauvage »). En effet, la gestion « comme sauvage » accorde une place différente à l'espace rendu disponible et aux comportements des animaux. Ces résultats démontrent l'importance d'avoir une approche multi-compartiments afin d'évaluer plus globalement ce type de projet, ainsi que de poursuivre ces recherches dans le futur pour distinguer la part des effets de l'aspect social des herbivores gérés « comme sauvage » sur l'écosystème. Mieux appréhender les spéci-

ficités apportées par le type d'herbivore ainsi que le type de gestion permettra alors d'affiner les décisions pour la conservation et/ou la restauration d'habitats ouverts et semi-ouverts.

The urgent need to restore ecosystems to tackle the decline of biodiversity and its associated ecological functions, has brought rewilding to the forefront of the scientific and media scenes. Two findings have emerged from recent scientific research, i) the confusion that exists between ecological restoration and rewilding and ii) a growing interest for trophic rewilding *via* the reintroduction (or introduction in the case of taxon replacement) of key stone species or ecosystem engineers, such as large herbivores. Large herbivores are especially interesting because they have important direct and indirect effects on ecosystems – through the consumption of plants, the production of excrements and trampling. Moreover, wild populations have suffered major extinctions due to climate change and human hunting, resulting in cascading effects and loss of functions in ecosystems. Nevertheless, there are still few studies about the effects of their return on ecosystem biodiversity and functions, and even fewer in comparison with more classic ways of conservation and restoration using domestic animals.

The first chapter aims to clarify the objectives and approaches of ecological restoration and rewilding. A synthesis of the scientific literature was carried out, retracing their origins, comparing their definitions and their most recent principles, and studying the similarities and differences of their approaches and methods used to restore degraded ecosystems. This synthesis highlights the spatio-temporal complementarity of these two approaches. It also underlines the interest for scientists, managers and stakeholders to take into account the results and feedback from these two strategies.

The research carried out in the other three chapters aimed to provide scientific evidences of the effects of the introduction of large herbivores managed 'as wild' on herbaceous socio-ecosystem. About thirty years ago, Przewalski horses (*Equus ferus przewalskii*) were introduced in semi-freedom on the Causse Méjean (France) for the conservation of the species itself, which was then extinct in the wild. This introduction now allows us to compare this management system with the centuries-old sheep (*Ovis aries*) breeding systems in the area or the more recent domestic horse (*Equus ferus caballus*) breeding systems, both extensive. We aimed to answer three research sub-questions: what are the effects of different herbivores and their associated management (domestic or 'as wild') on herbaceous plant communities 1) *via* a taxonomic approach and 2) *via* a functional approach? 3) What are the effects on assemblages and functional groups of dung beetles, as well as their roles in the degradation of fecal organic matter? Our results show that the introduction of horses (domestic or managed 'as wild') helps to conserve the species pools composing the plant communities and the assemblages of dung beetles. However, finer taxonomic and functional differences are observed. Notably, the function of dung organic matter degradation remains faster in sheep systems. These

distinctions can be linked to the physiological differences of the animals (sheep vs equid) but also to the type of management (domestic vs 'as wild'). Indeed, the management 'as wild' provides more attention to the spaces made available and the behaviors of the animals. These results demonstrate the importance of having a multi-component approach in order to evaluate more generally this type of project, as well as to continue research to better understand the distinctions arising from the social aspect of herbivores managed 'as wild' and their effects on ecosystems. Better understanding the specificities brought by the type of herbivore as well as the type of management will allow refining the decisions for the conservation and/or restoration of open and semi-open habitats.

Romane BLAYA

2024

Réponse de la structure et de la dynamique temporelle des communautés de fourmis aux caractéristiques spatiales et aux habitats sur les petites îles méditerranéennes

Response of structure and temporal dynamics of ant communities to spatial characteristics and habitats on small Mediterranean islands

Thèse de doctorat, Avignon Université, soutenue le 16 décembre 2024.

Jury – Anna TRAVESET (Directrice de recherches, Instituto Mediterraneo De Estudios Avanzados), rapporteure; Xim CERDÀ (Directeur de recherches, Estación Biológica de Doñana), rapporteur; Ana SANTOS (Chargée de recherche, Universidad Autónoma de Madrid), examinatrice; Jelena BUJAN (Chargée de recherche, Ruđer Bošković Institute), examinatrice; Jean-Philippe LESSARD (Professeur, Université de Concordia), examinateur; Élise BUISSON (Maître de conférences HDR, IMBE, Avignon Université), directrice de thèse; Philippe PONEL (Directeur de recherches, IMBE Aix-Marseille Université), co-directeur de thèse; Olivier BLIGHT (Maître de conférences, IMBE, Avignon Université), co-encadrant de thèse.

Mots-clés: fourmis, biogéographie, petites îles, diversité d'habitats, restauration écologique, SIE.

Keywords: ants, biogeography, small islands, habitat diversity, ecological restoration, SIE.

L'objectif de cette thèse est d'évaluer les effets des caractéristiques spatiales des îles sur la structure des communautés de fourmis et leur dynamique temporelle,

avec un intérêt particulier pour les effets de l'habitat et de ses changements. Les îles suscitent un grand intérêt pour la recherche en raison de leurs enjeux de conservation, mais, considérées comme les laboratoires de la nature, elles sont aussi utilisées pour l'avancement de théories fondamentales. La Théorie de l'équilibre de biogéographie insulaire (TEBI) a offert un cadre de recherche en biogéographie insulaire et en écologie pour comprendre la structure et la dynamique des communautés, considérées comme les résultats d'événements stochastiques de colonisation et d'extinction, en lien avec la taille et l'isolement des îles. Cependant, les petites îles sont considérées comme une anomalie de la TEBI de par leur absence de relation aire-espèce : c'est l'effet petites îles (*Small Island Effect* ou SIE). En effet, elles seraient en proie à des événements stochastiques d'extinction plus fréquents, mais aussi intrinsèquement moins diversifiées, notamment en matière d'habitats. Bien que la TEBI ait été largement étudiée, comprendre les effets des caractéristiques spatiales et écologiques des îles sur la structure et la dynamique des communautés reste un défi.

En utilisant 207 petites îles méditerranéennes de moins de dix km², nos résultats montrent que la superficie des îles est un prédicteur clé de la richesse en espèces de fourmis. Cependant, en utilisant un sous-ensemble de 36 petites îles corses, nous constatons qu'elle n'affecte pas le turnover temporel. L'impact de l'isolement est moins évident, surtout lorsqu'il est mesuré par la distance au continent, car les îles étudiées sont peu isolées et font souvent partie de chapelets d'îles. Ainsi, la proportion de masse terrestre autour d'une île semble être un meilleur prédicteur de sa richesse en espèces. Comme un faible isolement réduit la α -diversité, les dynamiques de colonisation et d'extinction maintiendraient un pool d'espèces limité expliquant pourquoi le turnover n'y répond pas. L'étude de la relation aire-espèce des fourmis montre l'existence d'un seuil de taille des îles en dessous duquel la richesse en espèces augmente très lentement avec la taille, ce qui corrobore le SIE. Étant donné que la richesse en espèces et le turnover répondent respectivement positivement à la proportion d'habitat et négativement à la diversité de l'habitat, cela confirme l'importance de considérer des facteurs autres que spatiaux pour les petites îles. En accord avec l'hypothèse de l'hétérogénéité de l'habitat, l'importance des habitats peut s'expliquer par l'augmentation des ressources et des sites de nidification. La réponse positive des fourmis au changement d'habitat et à la diversification de la végétation après l'éradication de la griffe de sorcière sur une seule île met également en lumière l'importance des habitats. Il semble que les communautés de fourmis soient relativement plus stables sur des sites bien diversifiés avec une végétation non perturbée. Néanmoins, même si la dynamique des communautés de fourmis est faible, nous observons que, même sur des îles relativement bien préservées, la composition tend à s'homogénéiser dans le temps, avec l'expansion d'espèces généralistes, ce qui pourrait être attribué aux changements climatiques.

La diversité de fourmis sur les îles semble être le produit de la combinaison de multiples facteurs, tels que la superficie, l'isolement et la disponibilité de l'habitat. La réponse rapide

et claire des fourmis au changement d'habitat souligne l'importance de ce facteur sur les petites îles, mais aussi l'importance des fourmis en tant qu'espèces indicatrices.

The objective of this PhD thesis is to assess the effects of island spatial characteristics on ant community structure and its temporal dynamics, with a particular focus on the effects of habitat and habitat change. If islands draw high research interest due to conservation concerns, they are also valued as nature's laboratories, ideal for the advancement of fundamental theories. The Equilibrium Theory of Island Biogeography (ETIB) has indeed offered a great framework in island biogeography and ecology to understand community structure and dynamics as results of stochastic events of colonization and extinction in relation to size and isolation of islands. However, small islands are considered as an anomaly of the ETIB and the Island's Species-Area Relationship (ISAR), which is called the Small Island Effect (SIE). Indeed, they may be more prone to stochastic events of extinction and they may be inherently less diversified, including in habitats. Despite the fact that the ETIB has been extensively studied, understanding the effects of spatial and ecological characteristics on community structure and dynamics is still at stake.

Using 207 small Mediterranean islands of less than ten km², our results show that island area is a key determinant of ant species richness. However, while using a subset of 36 small Corsican islands, we find that it does not affect temporal turnover. The impact of isolation is less evident, especially when measured by distance to the mainland, as the studied islands are poorly isolated and often part of island chains. Thus, the proportion of landmass around the focal islands seems to be a better predictor of species richness. As low isolation reduces beta diversity it may explain why turnover is unaffected, as colonization and extinction dynamics maintain a limited pool of species. The study of ant ISAR shows evidence of an island size threshold below which the increase in species richness is particularly low, corroborating with the SIE. As species richness and turnover respond respectively positively to habitat proportion and negatively to habitat diversity, it confirms the importance to consider other deterministic factors than area on small islands. In line with the habitat heterogeneity hypothesis, the importance of habitats can be explained by increased resources and nesting sites. Ant positive response to habitat change and vegetation diversification after iceplant removal on a single island further highlights the importance of habitats. It seems that ant communities are relatively more stable on sites that are well-diversified with non-disturbed vegetation. Nevertheless, if ant community dynamics has a low bio-dynamism, we also observe that, even on relatively well-preserved islands, composition tend to homogenize, with generalist species expanding their range, which may be attributed to climate change.

Eventually, species richness is a product of the combination of multiple factors, such as area, isolation and habitat availability. The quick and clear response of ants to habitat change emphasizes the importance of habitats on small islands, but also the importance of ants as indicator species.

Marie DERRIEN

2024

Médiation chimique dans les grottes sous-marines. Vers une meilleure compréhension du fonctionnement des écosystèmes dans l'océan

Chemical mediation in underwater caves: Towards a better understanding of ecosystems functioning in Ocean

Thèse de doctorat, Aix Marseille Université, soutenue le 20 décembre 2024.

Jury – Olivier THOMAS (Professeur, NUIG), président, examinateur ; Anne-Geneviève BAGNÈRES (Directrice de recherches, CNRS CEFÉ), rapportrice ; Maggy NUGUES (Maîtresse de conférences HDR, EPHE CRILOBE), rapportrice ; Thierry PÉREZ (Directeur de recherches, CNRS IMBE), directeur de thèse ; Pierre CHEVALDONNÉ (Directeur de recherches, CNRS IMBE), co-directeur de thèse ; Charlotte SIMMLER (Chargée de recherche, CNRS IMBE), membre invitée.

Mots-clés: paysage chimique, biodiversité, grottes sous-marines, éponges, mysidacés, médiation chimique, communauté, métabolomique.

Keywords: chemical seascape, biodiversity, underwater caves, sponges, Mysids, chemical mediation, community, metabolomics.

La médiation chimique est l'un des langages de la nature. Les organismes détectent et s'échangent des molécules présentes dans leur environnement pour chercher de la nourriture, des partenaires sexuels ou un habitat. Ce mode de communication contribue à la distribution de la biodiversité et au fonctionnement des écosystèmes. Tandis que les fonctions des médiateurs chimiques sont bien connues en milieu terrestre, il existe un manque de connaissances dans le milieu marin.

Les grottes sous-marines ont été choisies comme écosystème modèle car elles abritent des communautés très stables et permettent de s'affranchir de nombreuses sources de variation. L'objectif était de mieux comprendre le rôle fonctionnel des espèces composant les communautés benthiques et leur implication dans les interactions chimiques. Dans quatre grottes ateliers, on a combiné caractérisation de la biodiversité benthique et du paysage chimique de l'écosystème cavernicole à des expériences menées en laboratoire simulant des interactions biotiques potentiellement médiées par des signaux chimiques.

Ces travaux ont apporté une vision détaillée de deux types de communautés cavernicoles, les grottes semi-obscurées (GSO) et les grottes obscures (GO). Des patrons de biodiversité communs aux milieux cavernicoles ont été confirmés, mais

ce travail a aussi révélé la singularité de chaque site étudié. La communauté GSO abrite toujours une plus forte biodiversité que la communauté GO, les éponges dominant ces assemblages. De nombreuses espèces sont retrouvées de grotte en grotte, mais leur occurrence varie énormément dans une communauté. Enfin, ces travaux ont révélé une forte diminution du nombre d'espèces pour chaque grotte en seulement cinq ans, des changements de biodiversité liés à l'augmentation de la fréquence des vagues de chaleur marines.

L'instrument I-SMEL a été développé pour capter *in situ* les paysages chimiques à proximité des GSO et des GO, et évaluer la contribution des organismes benthiques. Le traitement des données métabolomiques a ensuite révélé que l'eau de chaque communauté se distinguait par la présence de classes chimiques différentes : en GSO, les alcaloïdes et les terpènes et en GO, les acides gras et les polycétides. En GSO, ces composés pourraient dériver des métabolites spécialisés des espèces d'éponges dominant la communauté. En GO, ces molécules proviendraient plutôt du métabolisme bactérien ou bien correspondraient à des composés réfractaires à la biodégradation s'accumulant dans les parties les plus confinées des grottes. Par conséquent, les quatre grottes naturelles se distinguent plus par leur paysage chimique en GSO qu'en GO.

Les mysidacés de grotte (*Hemimysis margalefi*) sont des crustacés qui réalisent des migrations circadiennes entre l'intérieur et l'extérieur des grottes. L'influence de différents paysages chimiques de grottes sur le comportement de reconnaissance de l'habitat par les mysidacés a été étudiée. Les résultats ont démontré que chaque population reconnaissait l'eau de sa grotte, mettant alors en évidence un comportement de *homing*, probablement basé sur la détection de signaux spécifiques à chaque grotte. Dans la mesure où une population donnée de mysidacés ne choisit pas le paysage chimique spécifique d'une grotte étrangère, on peut imaginer comment des changements de biodiversité benthique en GSO peuvent avoir des conséquences sur le fonctionnement de l'écosystème.

Les résultats de ces recherches devraient ainsi permettre de proposer rapidement un nouveau modèle de fonctionnement des grottes sous-marines, prenant en compte le rôle de la médiation chimique dans les interactions biotiques. Ces travaux ouvrent la porte à d'autres démonstrations du rôle fonctionnel de la médiation chimique dans l'océan. Ces études demeurent cruciales pour mieux comprendre le fonctionnement des écosystèmes, particulièrement dans un contexte où la biodiversité est fortement affectée par les changements environnementaux en cours.

Chemical mediation is one of the Nature's languages. Organisms detect and exchange molecules present in their environment in order to find food, sexual partners or habitat. This mode of communication significantly contributes to the distribution of biodiversity and to the ecosystem functioning. While the functions of chemical mediators are relatively well known in terrestrial environments, there is a real lack of knowledge in the marine environment.

Underwater caves were chosen as model ecosystem because they are home to rather stable communities of organisms, and thus allow to avoid numerous sources of variation. The general objective was to better understand the functional role of species shaping the benthic communities and their involvement in chemical interactions. Four caves were selected as study sites for the thesis. This work combined the characterization of benthic biodiversity and of chemical seascapes of the water in these cave ecosystems, with laboratory experiments simulating biotic interactions putatively mediated by chemical signals.

These studies provided a detailed view of two types of cave communities: Semi-Dark caves (SD) and Dark caves (D). Their compositions were compared between four sites offering different environmental situations. While common biodiversity patterns in cave environments were confirmed, this work also revealed the uniqueness of each studied site. In each cave, the SD community harbors greater biodiversity than the D community, where sponges dominate the assemblages. Although many species are found in common in the different caves, their occurrence can vary greatly between communities. This research also demonstrated that sponge assemblages in SD showed a significant reduction in the number of species in a time frame of only five years. These changes in biodiversity are possibly linked to the increasing frequency of marine heatwaves over the last decade.

To record the chemical seascapes near SD and D communities and to assess the contribution of benthic organisms to this composition, the *in-situ* capture instrument I-SMEL was developed. The processing of metabolomic data, obtained through mass spectrometry, revealed that the seawater from each community was distinguished by the presence of different chemical classes: in SD, alkaloids and terpenes, and in D, fatty acids and polyketides. In SD, these compounds

may derive from specialized metabolites of sponge species dominating the community. In D, these molecules are likely to come from bacterial metabolism or may correspond to compounds resistant to biodegradation, accumulating in the most confined parts of the caves. Consequently, the four natural caves are more distinct in their chemical seascape in SD than in D.

Cave-dweller mysids (*Hemimysis margalefi*) are crustaceans performing circadian migrations between the inside and outside of the caves. The influence of different cave chemical seascapes on their behavior of habitat recognition was studied. The results demonstrated that each population recognized the seawater from its own cave, highlighting a homing behavior likely based on the detection of chemical signals specific to each cave. Considering that a given population of mysids does not recognize the specific chemical seascape of another cave, we can imagine how changes in the benthic biodiversity in SD could have consequences for the ecosystem functioning.

The results of this research should allow to propose a new model of underwater cave functioning, which considers the role of chemical mediation in biotic interactions. This work opens the door to further demonstrations of the functional role of chemical mediation in the ocean. Such studies remain crucial for better understanding ecosystem functioning, especially in a context where biodiversity is heavily impacted by ongoing environmental changes.

Réalisation, fabrication :

Transfaire / *naturalia*
PUBLICATIONS

04250 Turriers

www.transfaire.com

www.naturalia-publications.com

Achévé d'imprimer : juin 2025