

Inventaire de la faune aquatique souterraine et qualité des milieux en Nouvelle-Aquitaine

NIOLLET Sylvie



**Stage effectué du 6 mars au 18 août 2023 à
la SEPANSO Aquitaine, 1 rue Tauzia 33800 Bordeaux
sous la direction scientifique de MM. F. Lefebvre et T. Alezine**

"Le présent rapport constitue un exercice pédagogique qui ne peut en aucun cas engager la responsabilité de l'Entreprise ou du Laboratoire d'accueil"

Résumé

En parallèle des collectes de terrain menées dans le cadre de l'inventaire de la faune aquatique souterraine en Nouvelle-Aquitaine, une étude préliminaire des données déjà acquises sur l'ancienne région Poitou-Charentes a été entreprise. Cela a permis d'approfondir nos connaissances sur la distribution de la stygofaune, en se concentrant sur le groupe des crustacés *Niphargus*, le seul taxon macroscopiquement bien visible et identifiable lors des collectes.

Concernant les paramètres géologiques (âge des formations et type d'aquifères), l'étude n'a pas pu totalement analyser leur influence sur la fréquence d'occurrence des *Niphargus*, en raison de la prédominance des sites datant du Secondaire dans cette région. De même, en raison du nombre limité de sites représentatifs des différents types d'aquifères, l'évaluation de la distribution des *Niphargus* dans ces milieux a été restreinte. Toutefois, ces constatations suggèrent a minima que les *Niphargus* sont largement distribués dans les aquifères karstiques du Secondaire, représentatifs de la région, mais qu'ils peuvent également se rencontrer dans d'autres types de milieux (aquifères fissurés et alluviaux).

En revanche, la présence des *Niphargus* se révèle être un potentiel bon indicateur (biomarqueur) de la diversité globale en stygofaune des sites, influençant les effectifs et la distribution des autres taxons. L'étude montre également que la présence des *Niphargus* n'est pas corrélée aux variables considérées, à l'exception de l'« accès à l'eau », ce qui se traduit en termes d'habitat par une fréquence d'occurrence plus importante en cavités naturelles, et dans les cours d'eau souterrains. En ce qui concerne la physico-chimie des eaux, les fréquences d'occurrence des *Niphargus* ne diffèrent significativement que pour les deux classes extrêmes de qualité des eaux. Selon cette étude, les *Niphargus* ne peuvent pas être considérés comme de bons bio-indicateurs pour évaluer la qualité des eaux souterraines.

Abstract

In parallel of the field data collected in the framework of the inventory of the underground aquatic fauna in Nouvelle-Aquitaine, a study of data already collected from the former Poitou-Charentes Region was undertaken. This has allowed us to deepen our knowledge of the distribution of the stygofauna, focusing on the crustacean group *Niphargus*, the only macroscopically clearly visible and identifiable taxon during collections

Concerning the geological parameters (age of the formations and type of aquifers), the study was unable to fully analyze its influence on the frequency of occurrence of *Niphargus*, due to the predominance of sites dating from the Secondary period in this region. Similarly, due to the limited number of representative sites for different aquifer types, the analysis of the distribution of *Niphargus* across these environments was limited. However, these findings suggest at least that *Niphargus* are widely distributed in the Secondary karstic aquifers representative of the region, but that they can also be found in other types of environments (fissured and alluvial aquifers).

On the other hand, the presence of *Niphargus* appears to be a reliable indicator (biomarqueur) of the whole stygofaunal diversity, influencing both the numbers and the distribution of other taxa. The study also shows that the presence of *Niphargus* is not correlated with the variables considered, with the exception of « access to water », which is reflected in terms of habitat by a greater frequency of occurrence in natural cavities and in underground waterways. With regard to the physico-chemistry of water, the frequencies of occurrence of *Niphargus* differ significantly only for the two extreme classes of water quality. According to this study, *Niphargus* cannot be considered good bioindicators for assessing groundwater quality.

Mots clés : *Niphargus*, stygofaune, région Poitou-Charentes, biodiversité, eaux souterraines, bio-indication, géologie, aquifères.

Sources photos page de couverture : de haut en bas et de droite à gauche puis centre :

Lavoir de Pujo-le-Plan (40), (Photo F. Lefebvre) ; Grotte de la Bidouze, Saint-Just-Ibarre (64) (Photo S. Niollet) ; Sources des eaux chaudes de Laminiaiko, Camou Cihigue (64) (Photo S. Niollet) ; Vasque de la source de Berdoulet, Hontanx (40) (Photo S. Niollet) ; *Niphargus* (Photo J.-F. Cart / SEPANSO).

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier le directeur de la SEPANSO Aquitaine, Xavier Chevillot, pour son accueil au sein de la structure et surtout pour ses conseils.

Je remercie également les deux chargés de mission du programme Stygofaune. François Lefebvre, avec lequel j'ai prospecté les sites pour les collectes stygofaune sur un nouveau terrain de jeu pour moi. Un clin d'œil particulier à Liborio, un véritable spéléologue en herbe !

J'adresse aussi mes remerciements à Thierry Alezine, pour la phase préparatoire des collectes de terrain et la phase finale de mise en page. Merci à tous les deux pour votre aide et vos relectures. Depuis cette immersion dans le monde souterrain, une source, un lavoir, un puits, un piézomètre, une grotte ou tout simplement un trou détourne invariablement mon regard.

Je tiens à remercier l'équipe de chercheurs de l'Université de Lyon, Florian Malard et Christophe Douady, pour leur partage de connaissances lors d'une semaine d'exploration du milieu hyporhéique dans les Pyrénées-Atlantiques.

Je remercie l'ensemble des personnes rencontrées au sein de la structure ou des partenaires notamment l'équipe de Mario Lepage de l'INRAe. Mais aussi sur le terrain l'ensemble des personnes qui nous ont permis et facilité la prospection des sites notamment le personnel des communes et des conseils départementaux.

Je tiens à remercier également tous les spéléologues et spéléologues plongeurs, des personnes passionnées et passionnantes avec lesquelles les escapades ont parfois été acrobatiques, glissantes voire périlleuses mais très enrichissantes.

Je remercie notamment l'équipe des spéléologues landais, Joël, Pascale et Daniel, le bienveillant. Sans oublier, les spéléologues, Jacques, au Pays Basque pour ses anecdotes souterraines et Kitou au Béarn pour sa gentillesse et le partage de ses connaissances du monde végétal lors des randonnées d'approches de sites.

Je saisis également cette occasion pour remercier mon institution, l'INRAe, d'avoir financé cette formation, ainsi que ma tutrice institutionnelle, Maya Gonzalez, et mon directeur, Alain Mollier.

Un grand remerciement à tous les génies qui m'ont soutenu pendant ce projet, notamment un camarade de classe, et surtout à ceux qui, malgré l'éloignement, m'ont lancé un gilet de sauvetage statistique. Les *Pinus* à la rescousse des *Niphargus*, qui l'eût cru !

Enfin, je n'oublie pas ma famille, que j'ai délaissée, qui a survécu à mes absences prolongées. Votre patience est une preuve que je suis le fruit d'une génétique incroyable.

Tables des matières

Résumé

Remerciements

1	Introduction	1
2	Matériels et Méthodes	3
2.1	Contexte de l'étude	3
2.2	Contexte hydrologique de la Nouvelle-Aquitaine	4
2.3	Contexte géologique de la Nouvelle Aquitaine	4
2.4	Contexte hydrogéologique de la Nouvelle-Aquitaine	5
2.5	Stratégie d'échantillonnage	8
2.6	Sélection des habitats.....	9
2.7	Sites prospectés.....	10
2.8	Méthodes de prospection des habitats.....	10
2.9	Effort d'échantillonnage	12
2.10	Collecte et les mesures de terrain	12
2.10.1	Mesures physico-chimiques	12
2.10.2	Collecte	12
2.10.3	Enregistrement des données terrain	13
2.11	Tri et détermination	13
3	Résultats	14
3.1	Contexte.....	14
3.2	La distribution des <i>Niphargus</i> diffère-t-elle entre les ères géologiques ?	16
3.3	La distribution des <i>Niphargus</i> diffère-t-elle selon les aquifères ?.....	17
3.4	Les <i>Niphargus</i> sont-ils de bons bio-indicateurs de la biodiversité de la stygofaune des sites ?	17
3.5	Les <i>Niphargus</i> peuvent-ils être de bons bio-indicateurs pour évaluer la qualité des eaux souterraines ?	21
4	Discussion	26
5	Bibliographie	28
6	Annexes	30

Liste des figures

Figure 1 : Logos des différents financeurs.....	3
Figure 2 : Principaux bassins versants de Nouvelle-Aquitaine	4
Figure 3 : Carte géologique de la Nouvelle-Aquitaine (BRGM)	5

Figure 4 : Schéma des eaux souterraines représentant les différents gisements (T. Alezine, d'après BRGM M. Villey)	6
Figure 5 : Aquifères et hydrogéologie de l'ex-région Poitou-Charentes (IGN-ORE).....	7
Figure 6 : Illustrations des collectes - A : Piézomètre (St Laurent, 47), (Photo de S. Niollet); B : Résurgence de l'Arbéroie (Isturits, 64), (Photo de F. Lefebvre); C : Milieu hyporhéique du Gave d'Ossau (Gère Bélesten, 64), (Photo de S. Niollet); D : Puits de l'église (Laparade, 47), (Photo de S. Niollet); E : Entrée de la grotte Menjot (Lahosse, 40), (Photo de F. Lefebvre); F : Entrée de la galerie du ruisseau souterrain d'Audin, (St Martin de Seignanx, 40), (Photo de F. Lefebvre).	8
Figure 7 : Illustrations des collectes- A & B : Grotte de la Bidouze (St Just Ibarre, 64), (Photo S. Niollet); C & F : Mine des trois Rois, (Banca, 64), (Photo de S. Niollet) ; D : Lavoir (Asasp Arros, 64), (Photo de S. Niollet); E : Milieu hyporhéique du Gave d'Ossau (Gère Bélesten, 64), (Photo de S. Niollet).	9
Figure 8 : Illustrations des collectes A : Prélèvements par spéléo plongeurs aux Ardoisières de Travassac (Donzenac, 19), (Photo S. Niollet); B : Prélèvements par spéléo plongeurs Ancienne carrière de Cognac-sur-l'Isle (24), ; C & D : Grotte des eaux chaudes, (Laruns 64); (Photos M.-C. Delmas & S. Niollet).....	10
Figure 9 : Illustrations du matériel et des collectes - A Forage Digue de Barcelone, Aire sur Adour, 40, (Photo S. Niollet); B Piège filtrant en sortie du captage de Socory, Ascain , 64, (Photo F. Lefebvre); C : Recherche à vue sur bois à la Grotte de la Verna, St Engrâce, 64, (Photo S. Niollet); D : Bou Rouch montée avec tuyau collecteur, piézomètre de Courrèges, Grenade sur Adour, 40, (Photo F. Lefebvre); E : Bou Rouch montée tube acier pour collecte en milieu hyporhéique, (Photo S. Niollet); F : Collecte à vue au filet à main, lavoir de Pujo-le-Plan, 40, (Photo S. Niollet).	11
Figure 10 : Coupelles avec échantillons pour détermination (Photos S. Niollet).....	13
Figure 11 : Cartographie des sites prospectés durant le stage	14
Figure 12 : Cartographie des sites analysés de l'ex-région Poitou-Charentes	15
Figure 13 : Répartition des sites avec ou sans Niphargus selon les ères géologiques	16
Figure 14 : Distribution des Niphargus selon les ères géologiques.....	16
Figure 15 : Répartition des sites collectés selon les aquifères	17
Figure 16 : Distribution des Niphargus selon les aquifères	17
Figure 17 : Répartition du nombre de sites au sein de trois classes d'indice de Shannon.....	19
Figure 18 : Distribution des Niphargus selon trois classes d'indice de Shannon	19
Figure 19 : Répartition des taxons selon la présence de Niphargus	20
Figure 20 : Distribution des taxons selon la présence de Niphargus	20
Figure 21 : Qualité de prédiction de la distribution selon la présence de Niphargus	20
Figure 22 : Composantes de la variabilité de l'ACP	21
Figure 23 : Représentation du premier plan factoriel de l'ACP pour les variables et les sites avec ou sans Niphargus	21
Figure 24 : Représentation des p-values en fonction de la présence des Niphargus	22
Figure 25 : Représentation du test de Tukey de l'accès à l'eau en fonction de la représentation des sites ..	23
Figure 26 : Représentation du nombre de sites selon la note qualité eau obtenue	23
Figure 27 : Représentation, du nombre de sites selon trois classes de la qualité de l'eau	24
Figure 28 : Distribution des sites avec Niphargus selon trois classes de qualité d'eau.....	24

Figure 29 : Représentation du nombre de sites selon trois nouvelles classes de la qualité de l'eau	25
Figure 30 : Proportion de sites avec Niphargus selon trois nouvelles classes de la qualité de l'eau	25

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des paramètres physico-chimiques mesurés	12
Tableau 2 : Experts taxonomiques et leur structure de rattachement selon leur domaine de compétence .	13
Tableau 3 : Caractéristiques de la biodiversité stygobie de l'ancienne région Poitou-Charentes	18

1 Introduction

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie dans tous les écosystèmes (Bosca, 2002). Elle peut être rare à certains endroits, comme dans les régions arides ou semi-arides ou d'une qualité médiocre à d'autres endroits de la planète. Les eaux souterraines représentent environ 97% des eaux douces liquides du globe (hors eaux gelées) (L'Volich, 1974 in Gibert *et al.*, 1994 ; UNESCO, 2022).

Cet énorme réservoir d'eau douce est une ressource naturelle dont la valeur socio-économique est considérable pour les besoins humains tels que les activités industrielles, agricoles, domestiques (Danielopol *et al.*, 2003 ; Gibert *et al.*, 2004). Quant à la valeur biologique des eaux souterraines, elle est peu connue du fait de la méconnaissance de ces habitats. Délaissés pour cause d'endroits inhospitaliers, difficile d'accès et sombres, ces milieux sont souvent considérés comme quasi azoïque. Pour le grand public, comme pour bon nombre des acteurs de l'eau, les masses d'eau souterraines sont considérées comme des ressources à exploiter et non comme des habitats potentiels.

Plusieurs facteurs caractérisent les eaux souterraines et leurs habitats. La température du milieu souterrain ne varie en général que de quelques dixièmes de degrés au cours de l'année (Ginet et Decu, 1977 ; Gibert *et al.*, 1994) tout comme le pH, ce qui montre une grande stabilité journalière et saisonnière (Gonser, 2001). L'obscurité permanente est une autre caractéristique de l'environnement souterrain. Écologiquement, l'absence de photosynthèse induit une pauvreté en oxygène, ce qui réduit drastiquement la production primaire. Cette pauvreté en ressources nutritives et en oxygène caractérise les eaux souterraines. Ces milieux cryptiques dépendent donc d'un apport énergétique extérieur, ce qui les définit comme des milieux allochtones. Les apports de matière organique (détritiques) proviennent principalement de la surface, grâce à la perméabilité des roches. Mais les flores fongique et bactérienne qui composent le biofilm souterrain représentent une source alternative de nutriment pour les organismes souterrains (Malard et Hervant, 1999).

Malgré des conditions très difficiles, les milieux sont peuplés d'une faune riche et diversifiée qui a su s'adapter à la vie souterraine, la stygofaune¹ ou faune stygobie (Juberthie et Decu, 1994, 1998, et 2001). De nombreuses études sur cet écosystème ont montré que tous les types de biotopes souterrains ont été colonisés, depuis les zones équatoriales jusqu'aux zones subarctiques, des îles volcaniques aux continents et des zones littorales aux zones de hautes montagnes. La stygofaune est présente aussi bien dans les eaux douces que saumâtres ou marines (Botosaneanu, 1986, Juberthie et Decu, 1994, 1998 et 2001).

Les organismes vivants adaptés à la vie dans l'obscurité sont dits troglomorphes (de *troglo*, cavités). Ce mode de vie s'accompagne de régressions de certaines fonctions anatomiques et morphologiques importantes, certaines capacités sensorielles et mécanismes biologiques devenant inutiles en raison de l'absence de lumière dans ces habitats ou biotopes plongés dans le noir. Les milieux souterrains offrant d'infimes espaces ont réduit morphologiquement les individus à être de petites tailles et de forme allongée. Ils sont généralement aveugles avec des yeux réduits ou absents et sont dépigmentés, ils nous apparaissent blancs. Par contre, leurs organes chémorécepteurs sont souvent très développés afin de s'orienter vers les sources de nourriture potentielles. Physiologiquement, les organismes souterrains ont un métabolisme respiratoire et une activité ralentie en périodes de jeûne, mais ceci leur confère une plus grande longévité par rapport aux organismes de surface (Gibert *et al.*, 1994).

La connaissance faunistique souterraine de ces habitats aquatiques souterrains reste encore fragmentaire. Au niveau mondial, 7000 espèces et sous espèces stygobies ont été recensées (Botosaneanu, 1986) dont 3000 en Europe (Sket, 1999) et environ 400 en France (Ferreira *et al.*, 2007). La stygofaune présente une grande disparité de formes et diversité d'espèces (Juberthie et Decu, 1994, 1998, 2001). Elle

¹ Stygofaune : Ensemble de la faune des eaux souterraines. L'origine de ce terme provient de Styx, rivière qui traverse les enfers dans la mythologie grecque.

est composée de tous les grands groupes d'invertébrés : crustacés, mollusques, arachnides, annélides etc., à l'exception des insectes.

La faune aquatique est dominée par les crustacées (65% des espèces), (Ferreira *et al.*, 2007). Les Niphargus, surnommés les crevettes des cavernes sont bien connus des spéléologues. Ces crustacés amphipodes peuvent être bien visibles à l'œil nu, leur taille adulte pouvant aller jusqu'à 20-30 mm selon les espèces. Une quarantaine d'espèces sont actuellement répertoriées en France (<https://inpn.mnhn.fr/espece/listeEspeces/Niphargus>). Ce sont des prédateurs des eaux souterraines, au sommet des chaînes alimentaires. Dans la course aux armements prédateur-proie, les Niphargus se sont munis de gnathopodes, pattes articulées sur l'avant du corps qu'ils utilisent pour immobiliser et manipuler leur nourriture (Premate *et al.*, 2021a).

Plusieurs hypothèses pourraient expliquer la diversité des espèces rencontrées dans les habitats souterrains (Sket, 1999). Tout d'abord, les prédateurs sont moins abondants que dans les habitats de surface. De plus, l'isolement dû à la fragmentation des aquifères² est un grand facteur de spéciation, ce qui expliquerait le fort taux d'endémisme. Les milieux souterrains sont, en effet, considérés comme étant le type de milieu ayant le plus d'espèces endémiques (Gibert *et al.*, 2009). Maintenir leur intégrité écologique et leur diversité biologique nécessite des protections spécifiques (Notenboom *et al.*, 1994). Le risque d'extinction des espèces est probablement élevé face à l'augmentation des multiples pressions humaines (Malard *et al.*, 1996 ; Gibert et Deharveng, 2002 ; Danielopol *et al.*, 2003). Cependant, l'état actuel incomplet des connaissances sur la biodiversité des eaux souterraines et l'absence de stratégies de conservation solides, limitent fortement la mise en œuvre de politiques de protection (Bouchet, 1990 ; Holsinger, 1993 ; Gibert, 2001).

La compréhension du fonctionnement des espèces au sein de leurs habitats est une condition préalable à la protection des espèces mais aussi la conservation de toutes les fonctions qu'ils remplissent dans un habitat donné. Dans une nature, toujours plus menacée, où les écosystèmes tributaires de l'eau douce sont soumis à la pression des activités humaines, la connaissance de l'écologie fonctionnelle est nécessaire (Fiser *et al.*, 2023).

Outre l'intérêt d'inventorier la stygofaune, la qualité des eaux souterraines doit être une priorité au jour des crises de biodiversité. Au contact des différents terrains traversés, les eaux souterraines peuvent se charger d'un certain nombre d'éléments provenant d'activités humaines ou d'origine géologique. En capacité de changer la qualité des eaux de la nappe cela engendrerait un changement des caractéristiques de l'écosystème, voire de le déséquilibrer.

Actuellement, seules les caractéristiques physico-chimiques de l'eau sont les critères retenus pour évaluer la qualité des eaux souterraines (par exemple, EU-GWD, 2006 ; Moura *et al.*, 2011 ; Wendland *et al.*, 2005, 2008). Mais nombreux sont ceux qui prônent le développement d'indicateurs biologiques et écologiques pour évaluer la qualité des eaux souterraines dans un contexte écosystémique (Danielopol *et al.*, 2004, 2006a, 2008 ; EPA, 2003 ; Griebler *et al.*, 2010 ; Stein *et al.*, 2010 ; Korb et Hose, 2011).

Dans cette optique, l'association SEPANSO Aquitaine réalise aujourd'hui le programme "Inventaire de la faune aquatique souterraine et qualité des milieux en Nouvelle Aquitaine".

Le jeu de données provenant des collectes effectuées dans l'ancienne région Poitou-Charentes vise à approfondir la compréhension de la stygofaune et plus précisément des Niphargus pour répondre à plusieurs hypothèses :

1. La distribution des *Niphargus* diffère-t-elle en fonction de l'âge géologique des habitats ?
2. La distribution des *Niphargus* diffère-t-elle selon les aquifères ?
3. Les *Niphargus* peuvent-ils être de bons bio-indicateurs pour évaluer la biodiversité de la stygofaune sur les sites ?
4. *Niphargus* peuvent-ils être de bons bio-indicateurs pour évaluer la qualité des eaux souterraines ?

² Aquifère : formation géologique constituée de roches perméables comportant de façon temporaire ou permanente de l'eau mobilisable (Castany, 1982).

2 Matériels et Méthodes

2.1 Contexte de l'étude

Ce stage s'inscrit dans le cadre du programme stygofaune de la région Nouvelle Aquitaine. Ce programme a commencé par une première étude avant la fusion des régions. En 2013, Poitou-Charentes Nature, sous l'égide de la DREAL³ Poitou-Charentes, a initié un programme en Poitou-Charentes pour étudier l'écologie et la répartition de la Gallaselle, un petit crustacé endémique de la faune aquatique souterraine de cette région, afin d'envisager un plan de sauvegarde. Le financement de cette étude a été apporté par la région Poitou-Charentes et la DREAL Poitou-Charentes, l'Agence de l'eau Adour Garonne et la Fondation Lisea Biodiversité.

Durant cette étude, l'ensemble de la faune des eaux souterraines a été inventoriée sur 129 sites. Cette étude a révélé une grande biodiversité jusque-là ignorée. En effet, une trentaine de taxons ont été identifiés sur quatre départements dont certains à des endroits non répertoriés.

Au vu de l'importance de ces résultats de l'étude et pour couvrir l'ensemble du territoire de la nouvelle région créée en 2016, la région Nouvelle-Aquitaine, l'étude poursuit l'inventaire de la faune des eaux souterraines aux deux ex-régions, Limousin et Aquitaine soit huit départements supplémentaires. La SEPANSO⁴ Aquitaine, avec le soutien de France Nature Environnement⁵ Nouvelle Aquitaine assure la mise en œuvre du programme, avec pour objectifs de :

- dresser un inventaire scientifique de la faune aquatique souterraine ;
- mettre en relation la présence et l'abondance de la faune stygobie et les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines, dans un objectif à terme de bio indication.

Le programme stygofaune fait l'objet des financements de l'Europe, d'un financement du Conseil Régional de Nouvelle Aquitaine, du Conseil Départemental de la Gironde, de la DREAL Nouvelle Aquitaine, de l'Agence de l'Eau Adour Garonne et de la Fondation Léa Nature 1% pour la Planète.



Figure 1 : Logos des différents financeurs

³ DREAL : Direction Régionale de L'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

⁴ SEPANSO : Société pour l'étude, la protection et l'aménagement de la nature dans le Sud-Ouest.

⁵ FNE France Nature Environnement : Fédération française des associations de protection de la nature et de l'environnement.

2.2 Contexte hydrologique de la Nouvelle-Aquitaine

Concernant le contexte hydrologique, le territoire de la région Nouvelle-Aquitaine est partagé entre **deux grands bassins hydrographiques**, le bassin Adour-Garonne (71 % du territoire) et le bassin Loire-Bretagne (29 % du territoire) qui se subdivisent en sept principaux bassins versants.

Bassin versant

Adour-Garonne :

- Charente
- Fleuves côtiers
- Dordogne
- Garonne
- Adour

Bassin versant

Loire-Bretagne :

- Sèvre Niortaise
- Loire

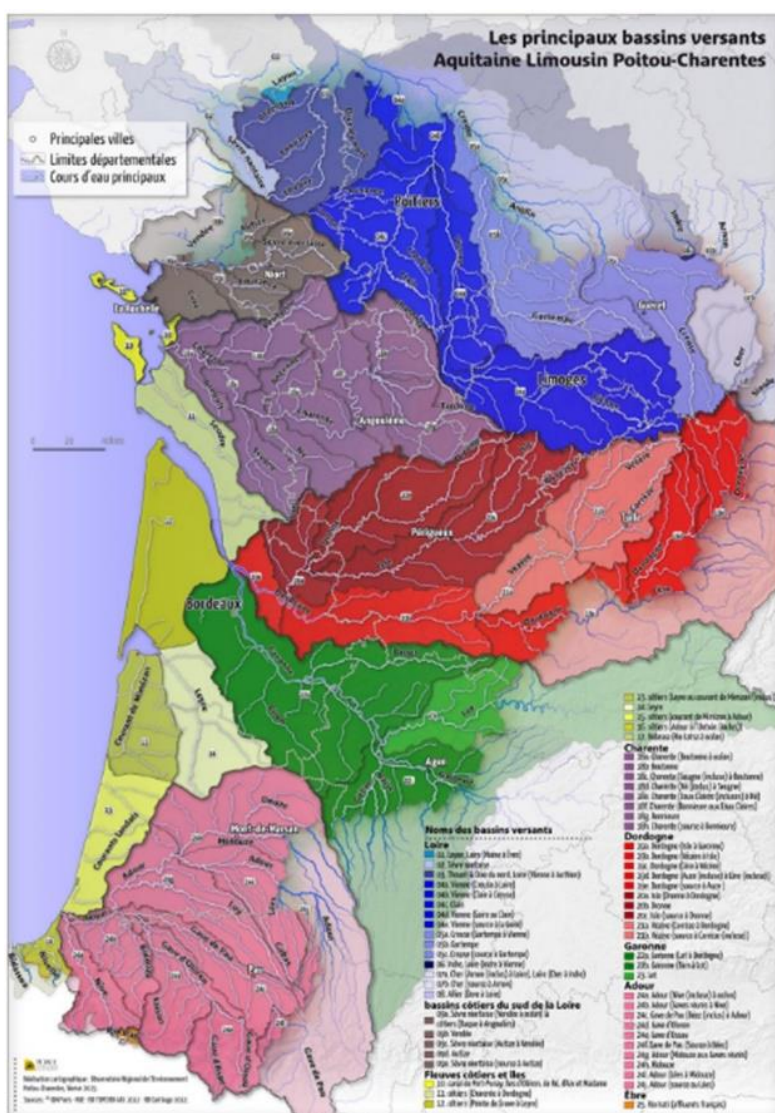


Figure 2 : Principaux bassins versants de Nouvelle-Aquitaine

2.3 Contexte géologique de la Nouvelle Aquitaine

La diversité géologique des terrains et des reliefs de la région engendre une variété de paysages et de terrains témoins d'une histoire remontant à des millions d'années. Plus vaste région de France métropolitaine, la région Nouvelle Aquitaine présente une grande diversité géologique sur une superficie de 84 100 km², représentant 15% du territoire national.

La plus grande partie de la région Nouvelle-Aquitaine (ex-régions Poitou-Charentes et Aquitaine) appartient au Bassin Aquitain et au Bassin Parisien, tandis que les parties restantes correspondent aux bordures du Massif Armoricaïn et du Massif Central et aux Pyrénées.

Trois grandes entités structurent la géologie régionale :

- le **socle du Massif Armoricain et du Massif Central**, massifs anciens formés durant le Paléozoïque (ère primaire).

- les **bassins sédimentaires aquitain** (au Sud de l'ex-Poitou-Charentes et en ex-Aquitaine) **et parisien**, de part et d'autre du Seuil du Poitou (au Nord de l'ex-Poitou-Charentes) qui sont principalement constitués de terrains témoignant de comblements successifs (alternance de dépôts marins et continentaux) du Mésozoïque au Cénozoïque (ères secondaire à quaternaire). Ces bassins sont ainsi faits d'un empilement de couches perméables (sables, grès et calcaires, ...) alternant avec des couches imperméables (argiles et marnes).

- la **chaîne des Pyrénées** qui délimite le sud du Bassin Aquitain dont la surrection a débuté durant l'Eocène moyen (40 Ma). Cet événement a provoqué des plissements de terrains paléozoïques à cénozoïques (ères primaire à quaternaire).

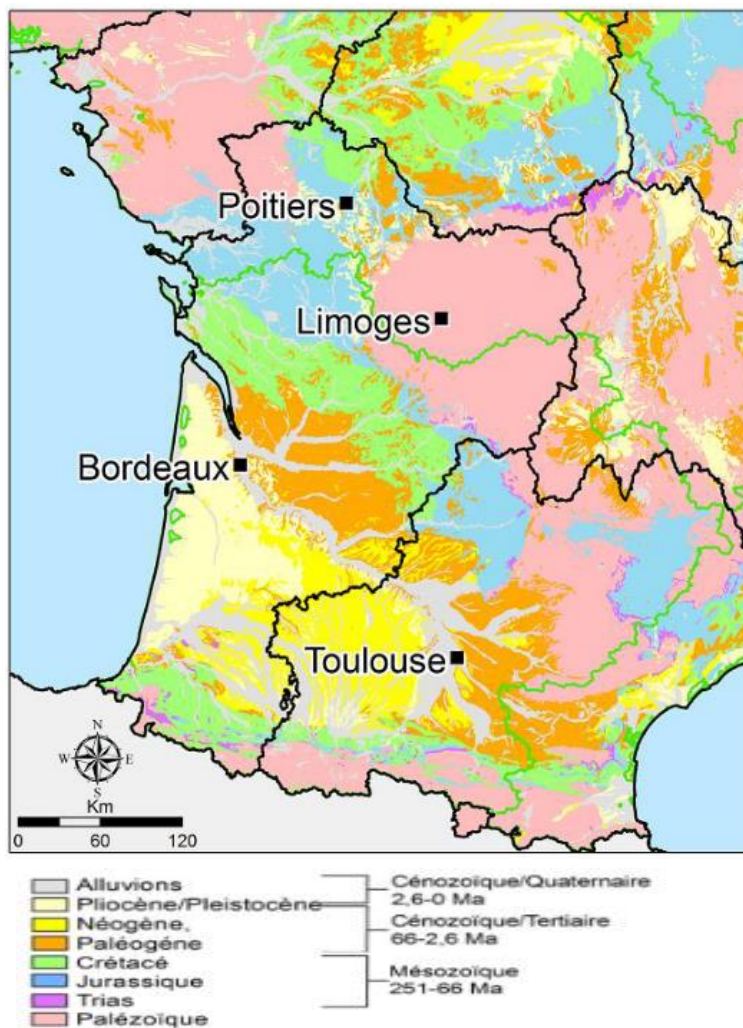


Figure 3 : Carte géologique de la Nouvelle-Aquitaine (BRGM)

2.4 Contexte hydrogéologique de la Nouvelle-Aquitaine

Concernant les eaux souterraines, les contextes géologiques variés présents en région Nouvelle-Aquitaine conditionnent la répartition géographique (en surface et en profondeur), la disponibilité et la vulnérabilité de ces ressources sur le territoire.

La diversité des roches réservoirs, ou aquifères, combinée à celle des climats et du relief, entraîne une grande variété de nappes d'eau souterraine, à la fois en taille, en profondeur et en comportement.

Les nappes d'eau souterraine sont de l'eau contenue dans les pores ou les fissures des roches réservoirs saturées par les eaux de pluie qui se sont infiltrées.

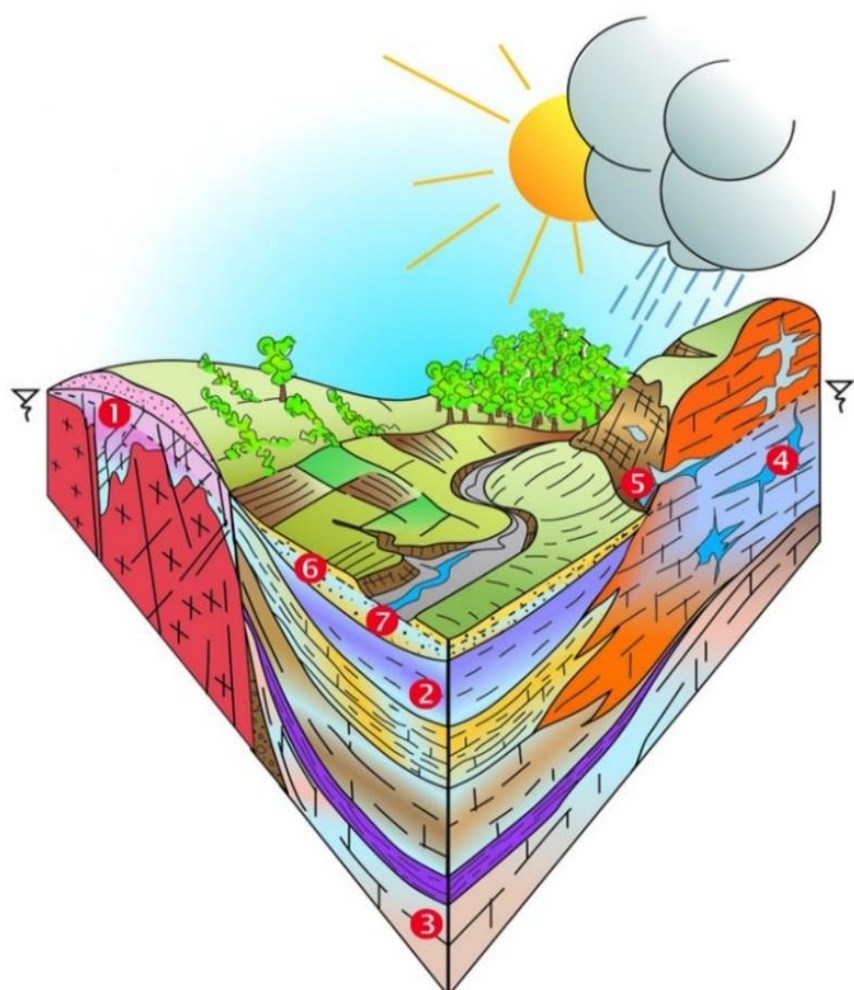
Les nappes libres communiquent avec la surface du sol et sont généralement peu profondes. Les nappes phréatiques appartiennent à cette catégorie. Les nappes captives sont comprises entre deux couches géologiques imperméables qui confinent l'eau sous pression. Elles sont souvent profondes de quelques centaines de mètres voire plus.

En Nouvelle-Aquitaine, il est possible de distinguer **trois grandes familles d'aquifères** :

① Les aquifères de roches cristallines (granite, gneiss, ...) : ils stockent l'eau dans les fissures et les sables issus de l'altération du granite (arènes). Ils abritent de petites nappes et sont présents en Poitou-Charentes (bordure du Massif Armoricaire), en Limousin (Massif Central) et dans les Pyrénées.

②③④⑤ Les aquifères de roches sédimentaires : composés de roches sédimentaires (calcaire, sable, grès, craie), ils caractérisent les dépôts en couches (bassins sédimentaires parisien et aquitain), mais se retrouvent aussi dans les Pyrénées.

⑥ Les aquifères alluviaux : ils sont constitués de matériaux déposés par les cours d'eau dans leurs vallées (sables et graviers, intercalés dans des limons fins). Ces nappes sont en relation avec les eaux de surface servent souvent de relais aux grandes nappes libres qui s'écoulent vers les points bas que sont les vallées.



- | | | | |
|----------|-----------------------------------|----------|-------------------------|
| ① | Nappe de socle | ⑤ | Source karstique |
| ② | Nappe sédimentaire libre | ⑥ | Nappe alluviale |
| ③ | Nappe sédimentaire captive | ⑦ | Zone hyporhéique |
| ④ | Karst | | |

Figure 4 : Schéma des eaux souterraines représentant les différents gisements (T. Alezine, d'après BRGM-M. Villey)

Aquifères de socle

Les roches cristallines (granite et gneiss principalement) qui constituent le sous-sol des massifs anciens (93 % du territoire de l'ex-région du Limousin) ont des propriétés hydrodynamiques héritées des processus d'altération et de la tectonique.

En domaine de socle, le type d'aquifère rencontré correspond à un « complexe multicouche » (altérites meubles en surface et horizon fissuré en profondeur).

Aquifères sédimentaires du Bassin Parisien et du Bassin Aquitain

En ex-région Poitou-Charentes, on distingue 3 grands types d'aquifères : les aquifères de socle, les aquifères de roches sédimentaires, dont les aquifères des calcaires karstiques ou fissurés et aquifères des formations sableuses et enfin les aquifères alluviaux (Bichot et Gennat, 2013).

Au Nord de l'ex-région Aquitaine se développe le système Multicouche Nord-Aquitain qui fournit l'alimentation en eau potable de la Gironde, et une partie de la Dordogne, du Lot-et-Garonne et des Landes,

au Sud, l'aquifère profond des Sables Infra-Molassiques est commun avec le Midi-Pyrénées. Au Nord-Est et au Sud, les formations calcaires des Causses et des Chaînon Béarnais renferment de puissants aquifères karstiques.

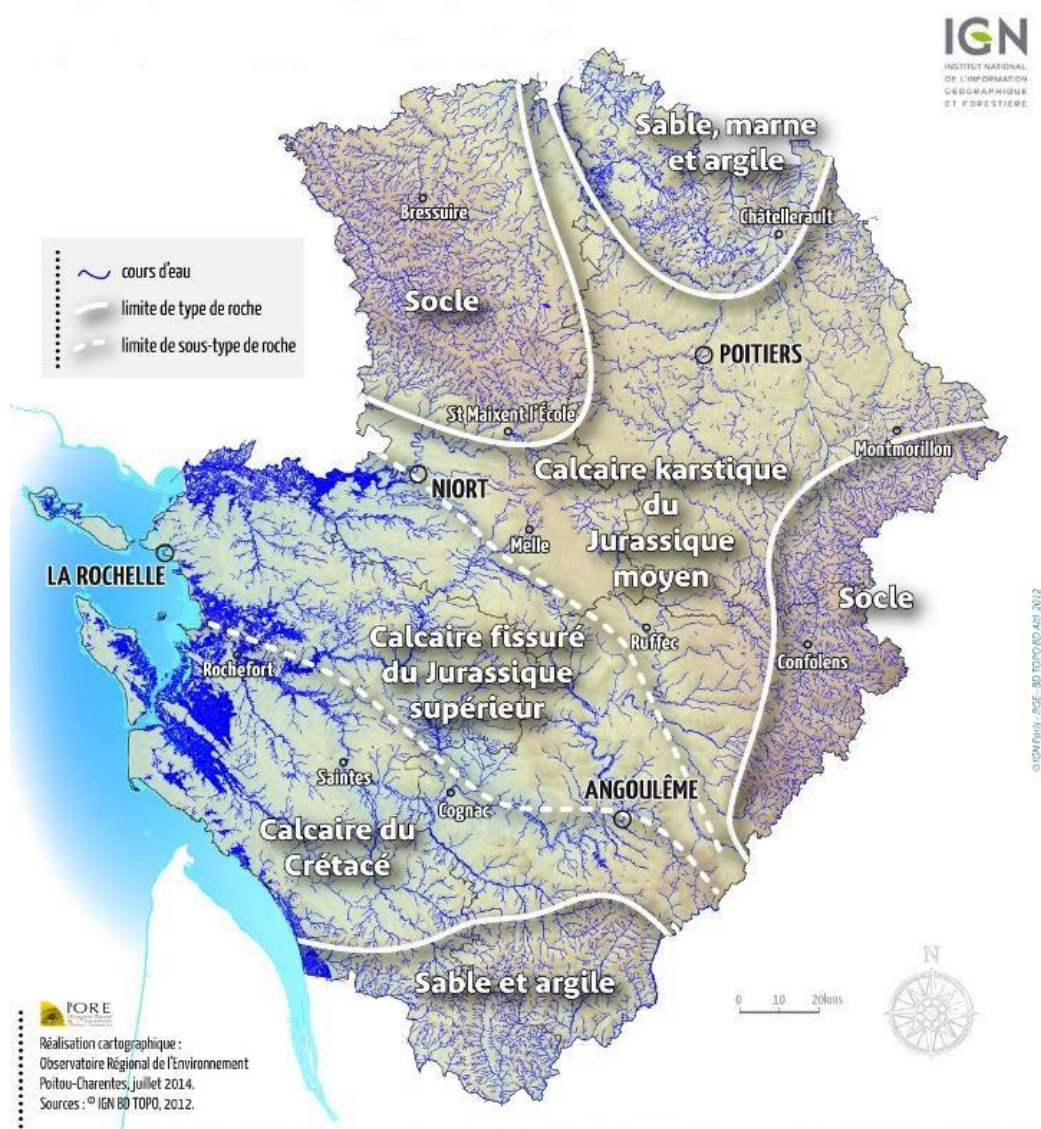


Figure 5 : Aquifères de l'ex-région Poitou-Charentes (IGN-ORE)

Aquifères alluviaux

Superposées à ces grands systèmes aquifères, les formations alluviales du Quaternaire sont le siège des nappes d'accompagnement des grands cours d'eau, et de la nappe phréatique du Sable des Landes.

Quel que soit les habitats, les eaux souterraines des différents aquifères sont colonisées par une diversité d'espèces animales.

Différents types d'habitats aquatiques souterrains sont propices à la stygofaune :

- les nappes d'eau souterraine libres sont des nappes contenues dans des aquifères sédimentaires (nappes alluviales ou nappes d'accompagnement des cours d'eau, parties libres des nappes captives) en particulier dans les aquifères karstiques, et les nappes contenues dans des aquifères de socle.
- le milieu hyporhéique⁶ est constitué de l'ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côté d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface.

⁶ Hyporhéique (littéralement, "sous-écoulement") : qualifie la zone correspondant au lit profond des cours d'eau de surface.

En pratique ces différents habitats aquatiques sont accessibles par :

- des structures naturelles : sources, cavités souterraines pénétrables (gouffres, galeries souterraines, rivières souterraines, ...), sous-écoulement de cours d'eau, (cf. Figures 6B, 6C, 6E, 6F).
- des structures aménagées par l'homme : fontaines, lavoirs, puits, piézomètres, forages, aqueducs, mines, carrières souterraines, (cf. Figures 6A, 6D).

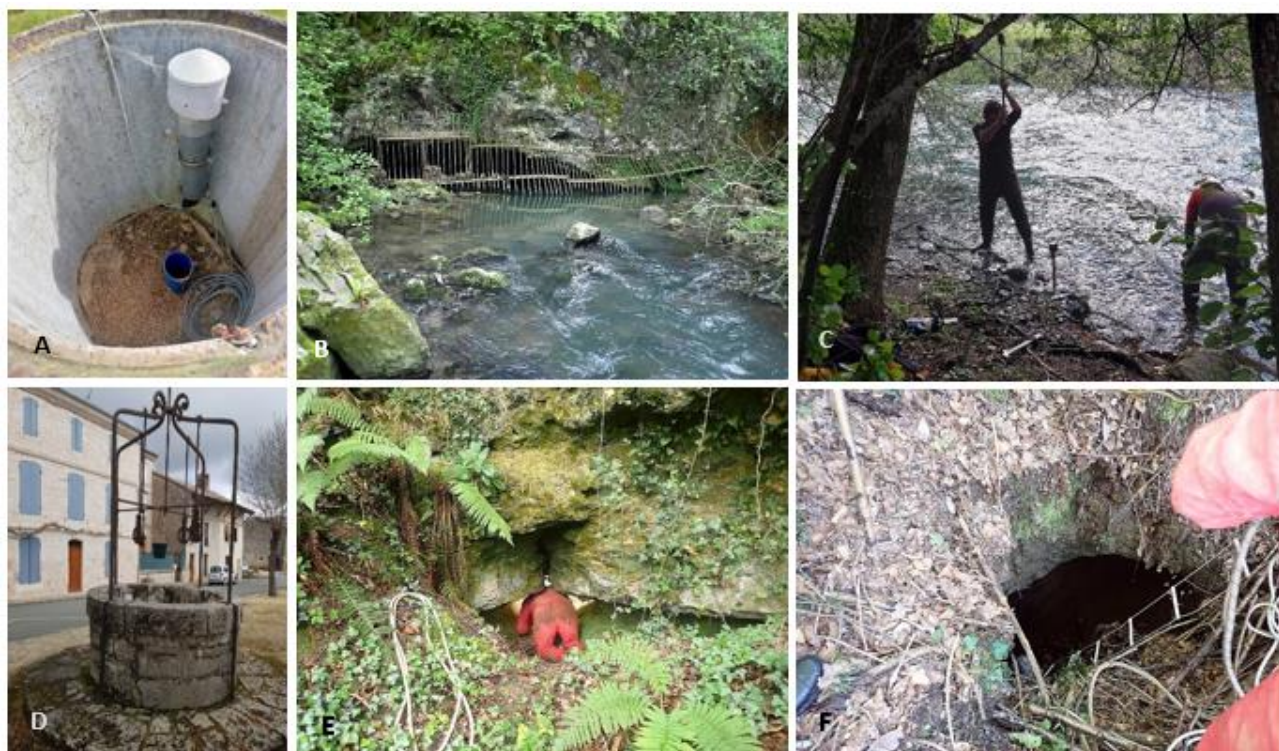


Figure 6 : Illustrations des collectes - **A** : Piézomètre (St Laurent, 47), (Photo de S. Niollet) ; **B** : Résurgence de l'Arbéroue (Isturits, 64), (Photo de F. Lefebvre) ; **C** : Milieu hyporhéique du Gave d'Ossau (Gère Bélesten, 64), (Photo de S. Niollet) ; **D** : Puits de l'église (Laparade, 47), (Photo de S. Niollet) ; **E** : Entrée de la grotte Menjot (Lahosse, 40), (Photo de F. Lefebvre) ; **F** : Entrée de la galerie du ruisseau souterrain d'Audin, (Saint-Martin de Seignanx, 40), (Photo de F. Lefebvre).

2.5 Stratégie d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage suit les recommandations du programme européen PASCALIS 2003-2005 (cf. Malard *et al.*, 2002 ; Stoch *et al.*, 2004). Elle correspond à un échantillonnage multi-stratifié, comprenant chronologiquement les étapes suivantes :

- le département (découpage purement administratif, N = 12) : correspondant à des unités de travail effectives sur le terrain (structuration départementale des associations et organismes partenaires). Pour le Poitou Charentes, N = 4.
- le bassin versant (découpage hydrogéographique, N = 7) : inégaux en taille, mais mutuellement exclusifs, et correspondant à des barrières d'isolement biologique cette strate est au nombre de cinq et correspond au découpage hydro-géographique. Pour le Poitou Charentes, N = 5.
- l'aquifère (découpage hydrogéologique, N = 5) : inégaux en termes de surface (d'extension géographique) et correspondant aux types de masse d'eau souterraine rencontrés (aquifère alluvial, aquifère sédimentaire, système imperméable localement aquifère, systèmes hydraulique composite propre aux zones intensément plissées de montagne, aquifère de socle). Pour le Poitou-Charentes, N = 3.
- la géologie (découpage géochronologique, N = 4 ères) : inégaux à l'échelle régionale. Pour le Poitou Charentes, N = 4.

2.6 Sélection des habitats

À plus petite échelle, quatre types d'habitats sont définis en tant que milieu potentiel de vie de la stygofaune :

- les sources : exutoires (exurgence⁷, résurgence⁸) d'un flux d'eau souterrain au niveau de la surface du sol dans un environnement naturel (vasque, griffon) ou anthropisé (fontaine, bassin, lavoir). Écologiquement, c'est un habitat à faciès lotique⁹ (pour les sources pérennes), en obscurité partielle ou totale, et en continuité directe avec les eaux de surface (cf. Figures 6B, 7D).
- les nappes souterraines : masse d'eau caractérisée par des vitesses d'écoulement (ou de circulation) très faibles, dont l'accès se fait via un puits, un forage, une cavité artificielle (mine, carrière, cave) ou naturelle (gouffre, grotte). Écologiquement, c'est un habitat à faciès lentique¹⁰, en obscurité quasi-totale et permanente, et isolé (faunistiquement) des eaux de surface (hors nappes karstiques), (cf. Figures 6D, 7A, 7B, 7C, 7D).
- les rivières souterraines : cours d'eau souterrain dont l'accès se fait via une cavité naturelle (gouffre, grotte) ou artificielle (mine, carrière, cave). Écologiquement, c'est un habitat à faciès lentique, en obscurité totale et permanente, et généralement bien isolé (faunistiquement) des eaux de surface (si toutefois le point de collecte est suffisamment loin de l'exutoire ou de la perte amont s'il s'agit d'un méandre souterrain d'un cours d'eau de surface), (cf. Figures 6E, 6F, 7A, 7B, 8C, 8D).
- le milieu hyporhéique : sous-écoulement des cours d'eau de surface, à l'interface entre eaux de surface et eaux souterraines. Écologiquement, c'est un habitat à faciès lentique, en obscurité quasi-totale et permanente (à partir de 10-15 cm), et en continuité directe (faunistiquement et physiquement) avec les eaux de surface sus-jacente, (cf. Figures 6F, 7E).



Figure 7 : Illustrations des collectes - **A & B** : Grotte de la Bidouze (Saint-Just-Ibarre, 64), (Photo S. Niollet) ; **C & F** : Mine des trois Rois, (Banca, 64), (Photo de S. Niollet) ; **D** : Lavoir (Asasp Arros, 64), (Photo de S. Niollet) ; **E** : Milieu hyporhéique du Gave d'Ossau (Gère Bélesten, 64), (Photo de S. Niollet).

⁷ Exurgence : émergence à l'air libre d'eaux souterraines issues d'un réseau karstique alimenté uniquement par percolation des eaux pluviales.

⁸ Résurgence : émergence à l'air libre d'un cours d'eau superficiel en amont qui a été englouti dans les fissures et pertes d'un réseau karstique.

⁹ Lotique : qualifie une masse d'eau animée d'un flux.

¹⁰ Lentique : qualifie une masse d'eau stagnante ou à très faible flux (nappe phréatique, gour, flaque).

2.7 Sites prospectés

La sélection de sites pour chaque département a été déterminée en fonction des systèmes aquifères existants et des différents types d'habitats. Cela a permis d'établir une liste de sites au sein d'un tableur Excel répertoriant succinctement des informations à partir desquelles sont établies des fiches individuelles par site, « Fiche Topo Stygofaune Nouvelle-Aquitaine » (cf. Annexe 1) apportant une aide précieuse lors de la prospection sur le terrain. Toutes informations utiles y sont répertoriées tels que les données GPS, les contacts des mairies et propriétaires et les contraintes du site (autorisation et ouverture), un plan de localisation, des photos (Sources informations BRGM, IGN, SIGORE, KARSTEAU, etc.). Il est à noter que les mairies, les propriétaires et/ou gestionnaires de sites, le Comité de Spéléologie Régional et les Comités Départementaux de Spéléologie ont été sollicités pour leur contribution et leur connaissance et compétences.



Figure 8 : Illustrations des collectes **A** : Prélèvements par spéléo plongeurs aux Ardoisières de Travassac (Donzenac, 19), (Photo S. Niollet) ; **B** : Prélèvements par spéléo plongeurs Ancienne carrière de Cognac-sur-l'Isle (24), (Photo S. Niollet) ; **C & D** : Grotte des Eaux chaudes, (Laruns 64) ; (Photos M.-C. Delmasure & S. Niollet).

2.8 Méthodes de prospection des habitats

A chacun de ces habitats et de ses accès correspondent des appareils de prélèvement spécifiques et adaptés. Toutes les méthodes de prospection permettent de collecter des espèces de taille supérieure à 200 μm .

Pour les **sources**, les faciès de ces différents exutoires demandent au préleveur une certaine expérience pour s'adapter aux contraintes du milieu afin de collecter au point le plus en amont et dans la partie obscure.

- Le filet à main utilisé comme piège filtrant est positionné à la manière d'un filet Surber, au travers du flux d'eau (faciès lotique), pour y amener les éléments mis en suspension en amont par raclage ou brassage du substrat, (cf. Figure 9B).
- Le filet à main utilisé comme un tamis pour les prélèvements de substrats lorsque le flux d'eau est faible (faciès lentique), diffus ou le volume d'eau très important.

A l'exception des sources vaclusiennes à très haut débit nécessitant l'intervention de spéléo-plongeurs, la prospection des sources au filet à main est une méthode facile à mettre en place, (cf. Figures 8 A & B).

Pour les **nappes souterraines**, ce sont des milieux dans lesquels la collecte s'effectue par-dessus, si possible à l'aplomb, (cf. Figure 9A).

- Le filet phréatobiologique (filet de type Cvetkov) dont l'extrémité est munie d'une pièce avec un clapet « non-retour » conduit à filtrer toute l'eau. Il est utilisé principalement pour les puits. Relié à une corde il permet de brasser et filtrer la colonne d'eau par une manipulation adaptée et ainsi mettre en suspension et filtrer la faune susceptible de reposer sur le fond et les parois.

Pour les **rivères souterraines**, l'accès est généralement difficile.

- Le filet à main utilisé comme piège filtrant est positionné à la manière d'un filet Surber, au travers du flux d'eau est important (faciès lotique), devant lequel est brassée la surface du sédiment et tous supports de vie pour la stygofaune (pierres, bois morts, etc.), (cf. Figure 9B).
- La méthode à vue est une collecte à l'œil nu ou à l'aide d'une loupe à main, par le préleveur qui de part une observation minutieuse des parois, du substrat et de tous les supports de vie (bois morts, rochers, pierres, etc.) permet la collecte de la stygofaune, (cf. Figure 9C).

Pour les **lits des cours d'eau de surface**, l'accès y est généralement simple mais demandent un équipement de prélèvement conséquent.

- Le sondage Bou-Rouch, (Bou, 1974) pompe manuelle est jumelée au filet à main permettant le filtrage de l'eau à la sortie de la pompe. Pour la collecte dans les lits de cours d'eau, l'appareil est connecté avec un tube précédemment enfoncé à la masse dans le substrat de 20 à 120 cm dont l'extrémité se termine par une crépine et à l'autre extrémité la collecte est filtrée avec le filet à main en sortie de pompe, (cf. Figure 9E).

Pour les **piézomètres**, la méthodologie est adaptée à partir de celle utilisée pour le milieu hyporhéique.

- La pompe Bou-Rouch est ici montée sur un support mobile de fixation de manière à la connecter à un tuyau dont l'autre extrémité est crépinée (i.e., percée de petits trous d'aspiration). Le tuyau, souple et renforcé, fait 40 mm de diamètre pour une longueur de 9 m. En sortie de pompe, l'eau remontée est filtrée à travers un filet à mains. Le pompage en piézomètre s'effectue jusqu'à épuisement de la colonne d'eau ou dans la limite de 3x 10 L., (cf. Figure 9D).



Figure 9 : Illustrations du matériel et des collectes - **A** Forage Digue de Barcelone, Aire sur Adour, 40, (Photo S. Niollet) ; **B** Piège filtrant en sortie du captage de Socory, Ascain , 64, (Photo F. Lefebvre) ; **C** Recherche à vue sur bois à la Grotte de la Verna, Saint-Engrâce, 64, (Photo S. Niollet) ; **D** : Bou Rouch montée avec tuyau collecteur, piézomètre de Courrèges, Grenade sur Adour, 40, (Photo F. Lefebvre) ; **E** : Bou Rouch montée tube acier pour collecte en milieu hyporhéique, (Photo S. Niollet) ; **F** : Collecte à vue au filet à main, lavoir de Pujo-le-Plan, 40, (Photo S. Niollet).

2.9 Effort d'échantillonnage

Les types d'accès aux eaux souterraines imposent l'utilisation de différentes méthodes de collecte, ce qui se traduit par un effort d'échantillonnage différent et constitue un biais d'échantillonnage. Cependant, pour chaque méthode, l'effort d'échantillonnage appliqué diffère :

- Le filet Cvetkov : 3x 10 descentes/remontées a brassages de la colonne d'eau + récolte des contenus dans le réservoir de fond de filet
- La pompe/sonde Bou-Rouch : 3 pompages de 10 L, à 2 profondeurs différentes ou à 2 endroits du lit mineur/piézomètre + filtrations au filet à main
- Le filet à main en tant que piège filtrant/filtrage substrat : effort de collecte (temps de pose, brassage amont, filtration) compris entre 15 et 20 min.

2.10 Collecte et les mesures de terrain

2.10.1 Mesures physico-chimiques

Le prélèvement d'eau s'effectue avant la collecte, de manière à effectuer les analyses sur de l'eau brute, non-perturbée. Un grand volume d'eau est prélevé au seau au plus proche du point de collecte et à mi-hauteur de la colonne d'eau.

Les paramètres physico-chimiques sont quantifiés sur site au moyen d'une sonde multi paramètres, de kits et tests colorimétriques, facilement réalisables sur le terrain, (cf. Tableau 1).

Paramètres étudiés	Matériels d'analyse
Température (°C)	Sonde HANNA® HI9814
Potentiel Hydrogène, pH	
Conductivité électrique, Ev (mS/cm)	
Solides dissous totaux, TDS (ppm)	
O ₂ dissous (mg/L)	Kit HANNA® HI3810
Ammonium, NH ₄ ⁺ (mg/L)	Languettes test colorimétriques (QUANTOFIX®)
Phosphates, PO ₄ ³⁻ (mg/L)	
Sulfates, SO ₄ ²⁻ (mg/L)	
Nitrates, NO ₃ ²⁻ (mg/L)	
Nitrites, NO ₂ ⁻ (mg/L)	
Carbonates, CaCO ₃ (mg/L)	

Tableau 1 : Liste des paramètres physico-chimiques mesurés.

2.10.2 Collecte

Après chaque filtration de collecte, un échantillon est conservé dans un flacon capé de 500 mL, identifié intérieur-extérieur auquel est rajouté de l'alcool non-dénaturé à 99,9% pour obtenir une solution à 70% d'alcool minimum afin de préserver leurs molécules d'ADN pour d'éventuelles analyses génétiques ultérieures.

Un échantillon d'eau de "secours" pour chaque site prospecté est stocké dans un flacon capé d'une contenance d'1L, identifié intérieur-extérieur, de manière à pouvoir vérifier ultérieurement, au besoin, les mesures enregistrées.

2.10.3 Enregistrement des données terrain

Lors de chaque collecte une "Fiche Collecte Stygobie en Nouvelle-Aquitaine" est renseignée de manière à consigner immédiatement toutes les informations de terrain (Annexe 2).

Toutes les informations propres à la collecte sont notées :

- Nom(s) du/des collecteur(s), date et lieu (toponymie IGN)
- Coordonnées géographiques (degrés décimaux ou Lambert 93)
- Type d'habitat et point d'accès à l'eau
- Croquis du site et localisation du point de collecte
- Nature de substrat et granulométrie
- Hauteur niveau d'eau (sonde piézométrique OTT, KL-30)
- Luminosité en lux (luxmètre)
- Relevé faunistique et floristique (alentours immédiats du point de collecte)
- Attribution d'un identifiant unique à chaque prélèvement (PC + numéro de département + 3 initiales du site + numéro de collecte).
- Paramètres physico-chimiques de l'eau

Des illustrations photographiques capturées ce jour-là seront incorporés sur la fiche « Fiche Topo » et les informations sur ces dernières seront mises à jour tels que les données GPS.

2.11 Tri et détermination

Après la prospection, une étape de tri et de détermination des individus collectés est réalisée sous loupe trinoculaire (OPTIKA – x7 – x45), (cf. Figure 10). Les individus sont triés selon leur groupe taxonomique (Turbellariés, Nématodes, Annélides, Mollusques, Hydracariens, Cladocères, Ostracodes, Copépodes, Amphipodes, Isopodes, Collemboles et autres insectes) ou leur espèce si elle est déterminable. Un cliché de chaque morphotype est systématiquement archivé (caméra AMSCOPE).

Les spécimens sont conservés dans des microtubes de 2 mL à joint torique, conçus pour une longue conservation, remplis d'alcool 99,9% et annotés (groupe taxonomique, date, lieu de prélèvement et observateur). Ils sont répertoriés sur une fiche, "Fiche de Tri et Dét. Stygofaune en Nouvelle-Aquitaine" (Annexe 3).

Ces spécimens conservés sont envoyés à des spécialistes de la stygofaune de chaque groupe taxonomique pour une détermination plus fine (cf. Tableau 2).

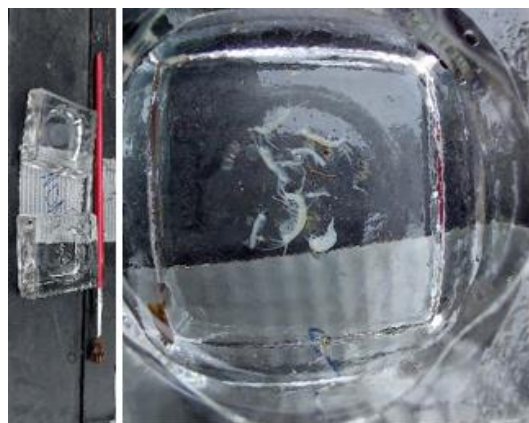


Figure 10 : Coupelles avec échantillons pour détermination (Photos S. Niollet)

Grands taxons	Taxons	Experts	Structures (localisation)
Crustacés	isopodes	C. DOUADY	univ. Lyon 1, LEHNA (69)
		F. MALARD	univ. Lyon 1, LEHNA (69)
		F. LEFEBVRE	SEPANSO Aquitaine (33)
	amphipodes	C. FIŠER	univ. de Ljubljana (Slovénie)
		C. BOU	Association Tarnaise d'Études Karstiques (81)
	ostracodes	T. NAMIOTKO	univ. de Gdansk (Pologne)
	copépodes	F. STOCH	univ. de Bruxelles (Belgique)
		D. GALASSI	univ. de l'Aquila (Italie)
	syncarides	A. CAMACHO	Muséum national des sciences naturelles de Madrid (Espagne)
Mollusques	gastropodes	A. BERTRAND	Étude et Conservation des Mollusques Continentaux (09)
Annélides	oligochètes	M. LAFOND	univ. Lyon 1, LEHNA (69)
	achètes et turbellariés	F. NOËL	Franck NOËL expertise environnementale (53)
Arachnides	hydracariens	M. BERTRAND	Société d'Horticulture et d'Histoire Naturelle de l'Hérault (34)

Tableau 2 : Experts taxonomiques et leur structure de rattachement selon leur domaine de compétence.

3 Résultats

L'analyse des données vise à fournir des résultats permettant d'approfondir les connaissances de la stygofaune et plus particulièrement sur les *Niphargus*. Les résultats seront présentés pour chacune des hypothèses. Les analyses se feront sur les données d'occurrence (absence/présence) de l'espèce *Niphargus* étant donné que l'effort d'échantillonnage est différent selon le type de sites.

3.1 Contexte

Mon travail s'est divisé en deux grandes parties, de l'acquisition au traitement des données. La première partie se réalise par la succession de plusieurs étapes. Premièrement une étape de "préparation au terrain" consistant à renseigner les "Fiches Topographiques" contenant les informations nécessaires aux collectes (coordonnées géographiques, identité des propriétaires/gestionnaires de sites, etc.). Deuxièmement, une étape, sur le terrain, composée de mesures physico-chimiques sur l'eau du site. Ma participation couvre 49 sites répartis de la Corrèze aux Pyrénées-Atlantiques (cf. Figure 11).

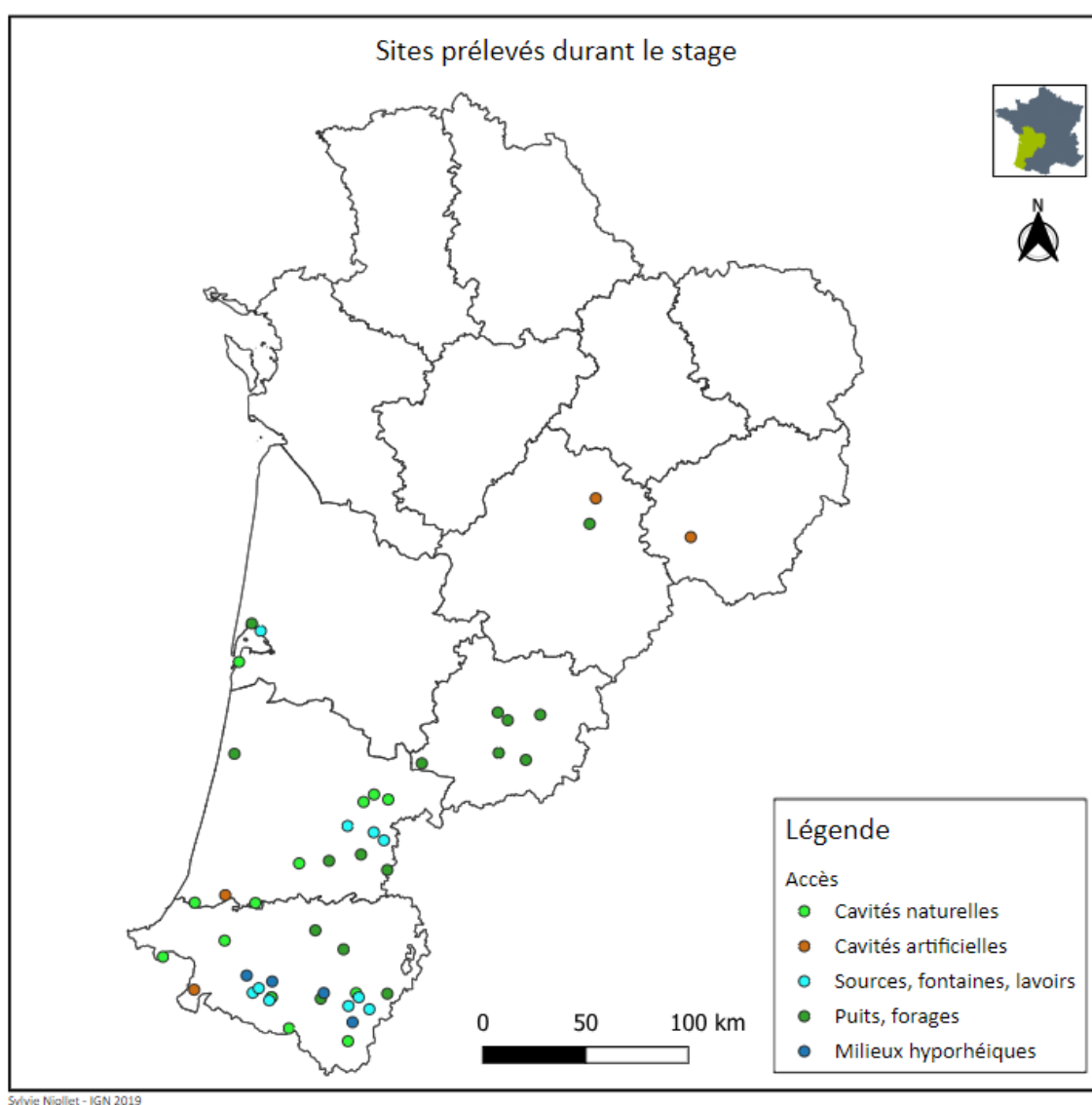


Figure 11 : Cartographie des sites prospectés durant le stage

Dans ce cadre, j'ai notamment cherché à optimiser la méthode de pompage dans les piézomètres en limitant la prise d'air à la jonction entre la pompe et le tuyau collecteur. Il s'est avéré que la simple pose de ruban adhésif, facile à mettre et retirer entre deux collectes, permet de diminuer l'effort de pompage, et ainsi d'atteindre des profondeurs de collecte jusque 7 à 8 m. Aussi, le filet Cvetkov pour la collecte dans les puits et les forages étant très fragile (grande surface de filet à fin maillage), et étant parfois mis à rudes épreuves (frottements, accrochage aux tuyauteries en place, etc.), j'ai cherché un moyen de le réparer efficacement en colmatant les petits trous et accrocs. Aucune tentative de collage de « rustine » (ruban adhésif pour piscine ou pièce de filet en double couche) n'ayant tenu, il s'est avéré qu'un colmatage par de la colle à chaud résiste très bien à l'usage, et permet ainsi de prolonger la durée de vie des filets Cvetkov. De plus, j'ai mis en place des équipements individuels de protection (EPI), comme des gants et une cuvette rigide pour la manipulation et la pose des produits utilisés dans certains kits d'analyses physico-chimiques. Puis, au retour du terrain, les fiches collecte sont scannées, les mesures sont consignées dans un fichier (la banque de données et les informations des fiches topo sont mises à jour. Cette étape répond à l'objectif d'inventaire du programme.

La deuxième partie, l'étude statistique des données est réalisée sur la première région prospectée. À terme, cette étape répondra au deuxième objectif du programme. La banque de données de l'ancienne région Poitou-Charentes sur laquelle j'ai travaillé comprenait 129 sites (cf. Figure 12). Suite à une sélection rigoureuse, où a minima 1 taxon stygobie a été collecté et identifié (pour s'assurer que les collectes ont bien été effectuées dans la zone aquatique souterraine), 88 sites stygobies ont été retenus pour les analyses. La fréquence d'occurrence des *Niphargus* y est de 44 %.

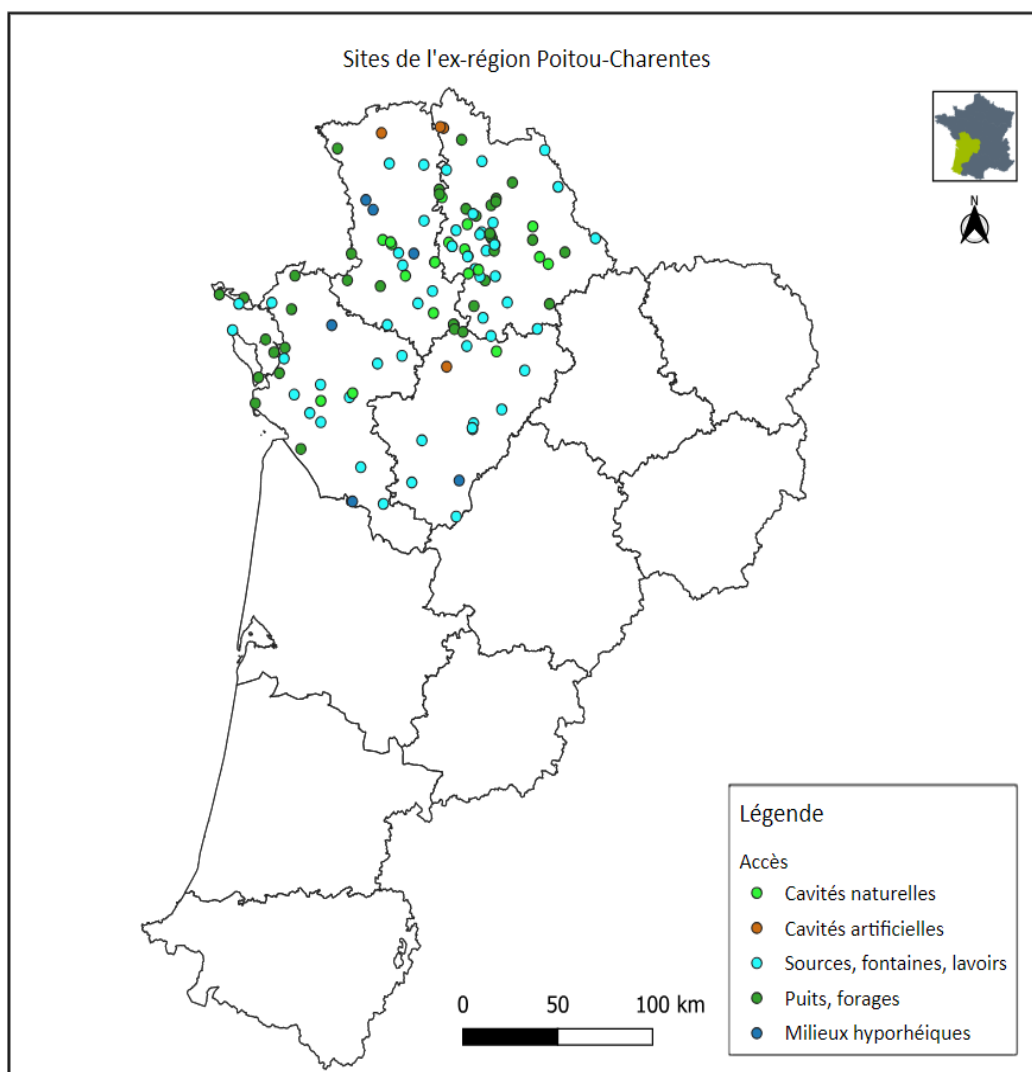


Figure 12 : Cartographie des sites analysés de l'ex-région Poitou-Charentes

3.2 La distribution des *Niphargus* diffère-t-elle entre les ères géologiques ?

La majorité des collectes des sites date de l'ère Secondaire. Ils sont au nombre de 36 pour les sites avec *Niphargus* et 43 pour les sites sans *Niphargus*, totalisant 90 %, (cf. Figure 13). Les ères Primaire et Quaternaire comprennent respectivement 2 et 7 sites de collectes, tandis l'ère Tertiaire n'est pas représentée.

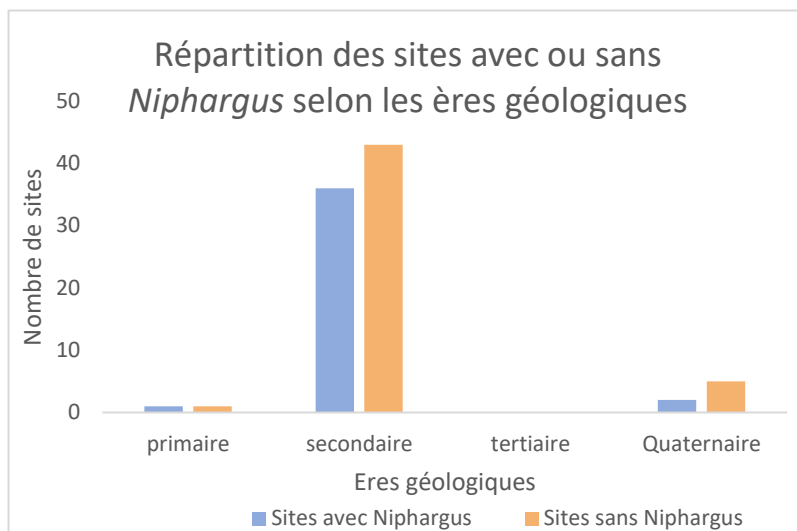


Figure 13 : Répartition des sites avec ou sans *Niphargus* selon les ères géologiques

En moyenne, les *Niphargus* sont bien représentés sur les sites en ères Primaire et Secondaire, leur fréquence d'occurrence étant respectivement de 50 % et 47 %. À l'inverse ils semblent moins présents sur les sites d'âges géologiques plus récents, leur fréquence d'occurrence est de 29 % sur des sites datant de l'ère Quaternaire, (cf. Figure 14).

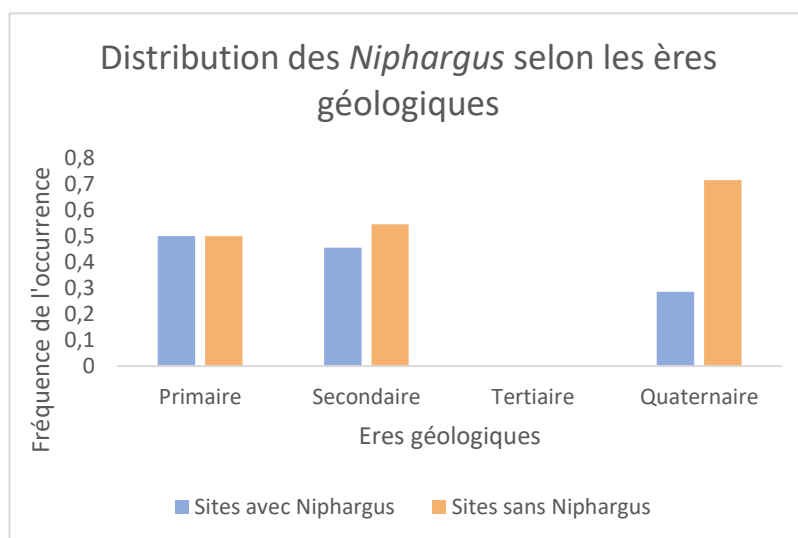


Figure 14 : Distribution des *Niphargus* selon les ères géologiques

3.3 La distribution des *Niphargus* diffère-t-elle selon les aquifères ?

La majeure partie des sites collectés a été effectuée dans des aquifères karstiques. Sont recensées 35 collectes pour les sites avec *Niphargus* et 39 pour les sites sans *Niphargus*, ce qui totalise 84 %. En ce qui concerne les collectes réalisées en aquifères alluviaux, elles s'élèvent à 7, tandis qu'il y en a eu 3 pour les aquifères sableux et de 1 pour les aquifères de socle (cf. Figure 15).

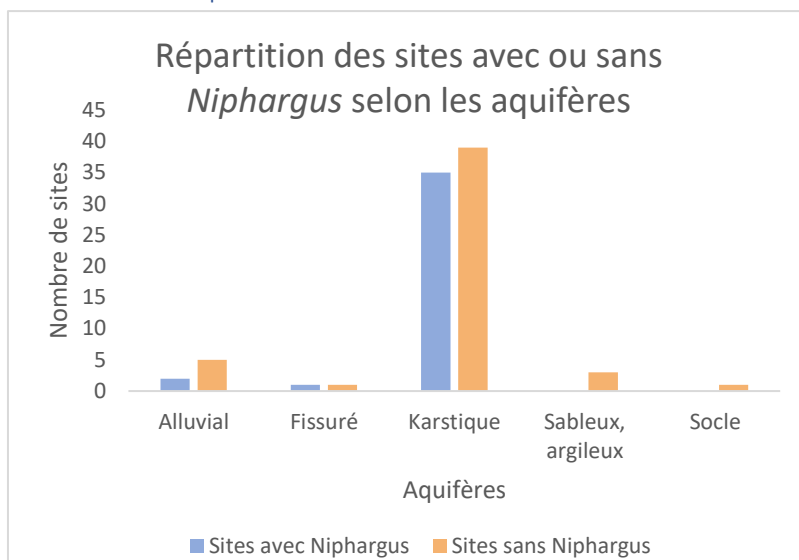


Figure 15 : Répartition des sites collectés selon les aquifères

En moyenne les *Niphargus* sont bien représentés dans les aquifères karstiques, leur fréquence d'occurrence y est de 47 %. Les *Niphargus* sont présents dans les aquifères fissurés avec une fréquence d'occurrence de 67% sur les 3 sites collectés. Par contre, ils sont nettement moins présents dans les aquifères alluviaux avec une fréquence d'occurrence de 29%. Même si le nombre de sites concerné est faible, les *Niphargus* sont absents dans les aquifères sableux et de socle, (cf. Figure 16).

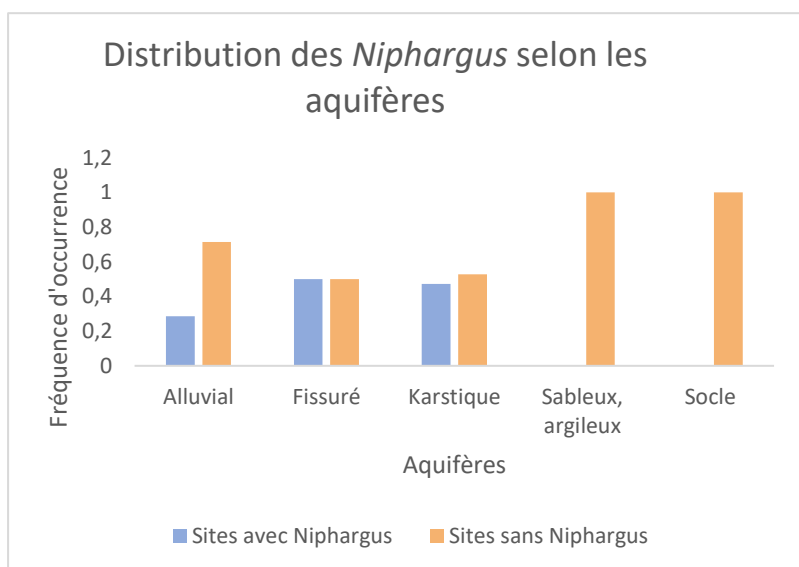


Figure 16 : Distribution des *Niphargus* selon les aquifères

3.4 Les *Niphargus* sont-ils de bons bio-indicateurs de la biodiversité de la stygofaune des sites ?

Au total, la prospection réalisée des 88 sites dénombre un total de 900 individus recensés, appartenant à 13 taxons stygobies différents (suivant les groupes, la détermination taxonomique s'est parfois arrêtée au genre, voire à la famille). L'abondance (A) correspond au nombre total d'individus par taxon. La richesse spécifique (S) correspond au nombre de taxons distincts rencontrés sur chaque site. L'indice de diversité de Shannon (H') traduit la diversité taxonomique de la faune stygobie des sites. L'indice d'équitabilité de Pielou (E) évalue la prédominance relative des différents taxons. La majorité des sites a une faible hétérogénéité et des dominances fortes traduisant un fort déséquilibre dans les communautés en place (indice de Pielou < 0.5). Un tableau récapitulatif (cf. Annexe 4) présente précisément ces différents indicateurs pour chacun des 88 sites étudiés.

	A Abondance	S Richesse spécifique	H' Indice	E Indice de Piélou
Moyenne	10,22727273	2,079545455	0,667912141	0,235526591
Min	1	1	0	0
Quartile 1	1	1	0	0
Mediane	3	2	0,691445215	0,292227631
Quartile 3	10,25	3	1	0,425617056
Max	105	5	2,128085279	0,528320834

Tableau 3 : Caractéristiques de la biodiversité stygobie de l'ancienne région Poitou-Charentes.

Les sites présentent en moyenne une richesse de 2 taxons par site, ce qui est assez faible, avec une médiane et des quartiles de 1 à 3 taxons. Toutefois, certains sites peuvent être composé de plus de taxons, le maximum allant à jusqu'à 5 taxons (cf. Tableau 3).

Les sites présentent en moyenne une abondance de 10 individus par site avec une très grande variabilité, la gamme de valeurs allant de 1 à 105 (médiane = 3 ; quartile 25-75% = 1-10).

L'indice de Shannon moyen de 0.67 montre une diversité modérée, avec une certaine variabilité puisque les valeurs varient de 0 à jusqu'à 2,12. (médiane = 0,69 ; quartile 25-75% = 1).

L'indice de Piélou moyen de 0.23 montre que les sites ont une distribution des individus inégale avec une médiane de 0,29 et des quartiles entre 0 et 0,42. Cependant, les valeurs allant de 0 à 0,53 montrent un déséquilibre dans la répartition des individus entre les différents taxons.

Globalement, ces résultats indiquent que la stygofaune de région Poitou-Charentes présente une diversité modérée de taxons avec forte variabilité en termes d'abondance. Certains sites se caractérisent par une répartition inégale des taxons. Cela traduit une spécificité des écosystèmes aquatiques souterrains, qui se retrouve à l'échelle nationale comme mondiale, avec des chaînes alimentaires tronquées et des abondances généralement faibles et variables.

Une approche de regroupement en trois classes simplifie l'interprétation et la communication sur la présence des *Niphargus* selon les classes de l'indice de Shannon (H'). Trois classes distinctes d'indice de Shannon peuvent être établies en se basant sur les plages suivantes :

- Classe basse : Note de H' : [0 et 0,001[
- Classe Intermédiaire : Note de H' : [0,001 ; 1[
- Classe Haute : Note de H' : [1 ; + ∞

Les sites avec *Niphargus* montrent des effectifs de 11, 8 et 20 respectivement pour les classes basse, intermédiaire et haute. Pour les sites sans *Niphargus*, les effectifs sont de 25, 13 et 11 pour ces mêmes classes. Les effectifs des sites sans *Niphargus* diminuent lorsque l'indice de Shannon est élevé tandis que les sites avec *Niphargus* présentent une variabilité plus marquée (cf. Figure 17).

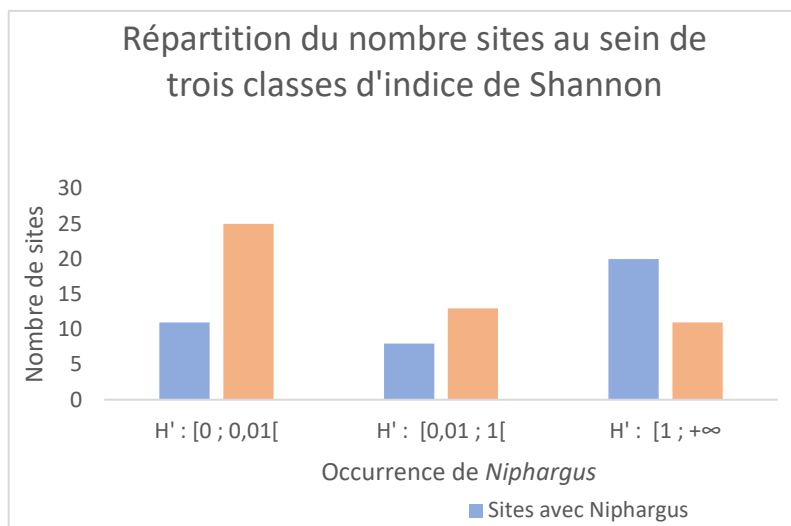


Figure 17 : Répartition du nombre de sites au sein de trois classes d'indice de Shannon

La plupart des sites avec *Niphargus* se trouvent dans 51 % des sites de classe d'indice haute (≥ 1), ce qui traduit qu'ils sont entourés d'un nombre de taxons important. Les *Niphargus* sont présents dans 30 % des sites de faible biodiversité (fréquence d'occurrence : 0,30), tandis qu'ils sont 38 % dans les sites dans la classe intermédiaire et 64 % dans la classe d'indice haute, (cf. Figure 18).

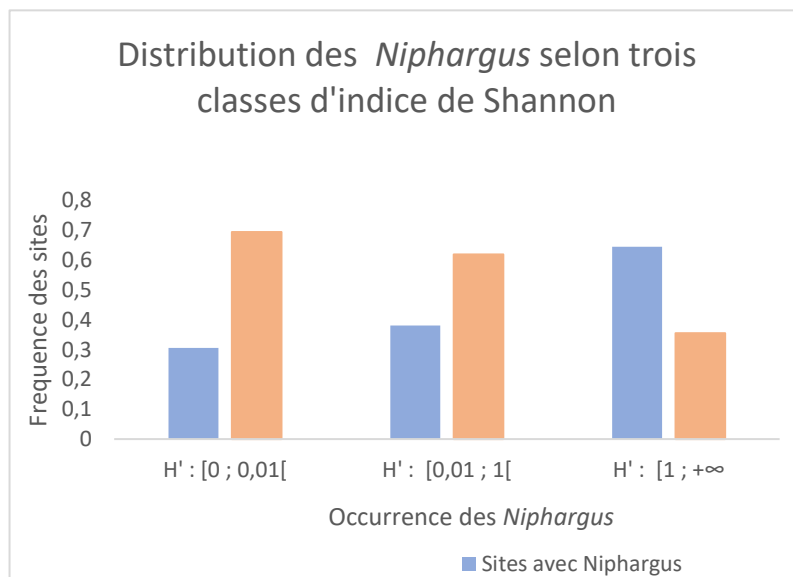


Figure 18 : Distribution des *Niphargus* selon trois classes d'indice de Shannon

L'exploration du potentiel des *Niphargus* en tant que bioindicateurs pour évaluer la diversité de la stygofaune est réalisée par une comparaison des moyennes entre les sites avec et sans *Niphargus*.

Les résultats montrent que les *Niphargus* peuvent être de bons indicateurs de la diversité stygobie, p-value 0.03694. Le résultat est significatif, ce qui renforce l'idée que les sites avec la présence de *Niphargus* présentent une proportion plus élevée de taxons stygobies. Les sites avec *Niphargus* comprennent en moyenne sensiblement plus de taxons que les sites sans *Niphargus*, respectivement 1 et 2 taxons. Les sites sans *Niphargus* oscillent entre 1 et 2 taxons tandis que les sites avec *Niphargus* varient généralement entre 1 à 3 taxons. La gamme de valeurs du nombre de taxons des sites sans *Niphargus* varie de 1 à 5 tandis que celle des sites avec *Niphargus* varie de 1 à 7 taxons (cf. Figure 19).

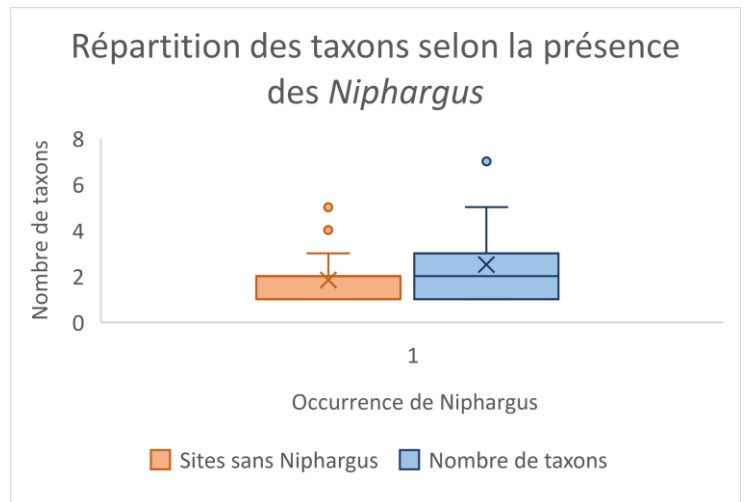


Figure 19 : Répartition des taxons selon la présence de *Niphargus*

52 % des taxons présents dans les sites avec *Niphargus* comprennent d'autres taxons stygobies, tandis que cette proportion est de 40 % dans les sites sans *Niphargus* (cf. Figure 20).

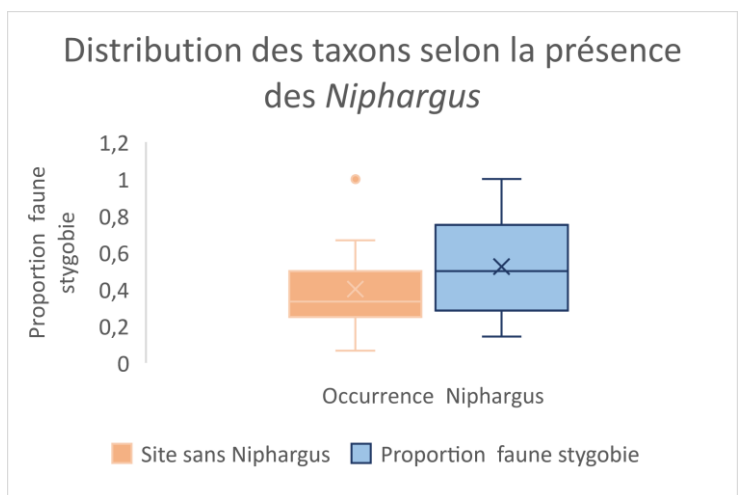


Figure 20 : Distribution des taxons selon la présence de *Niphargus*

Ces résultats suggèrent que la présence des *Niphargus* est associée à une augmentation significative de la proportion de taxons stygobies dans les sites. Cela renforce l'hypothèse que les *Niphargus* pourraient être utilisés comme bio-indicateurs pour évaluer la diversité de la stygofaune dans les milieux.

Cependant, même si la comparaison de moyenne montre une p-value significative, la qualité de prédiction est faible ($R^2 = 0.0509$) (cf. Figure 21).

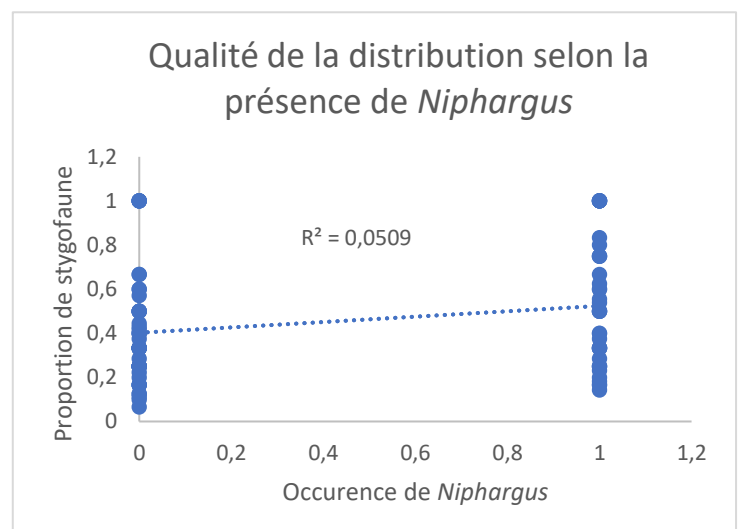


Figure 21 : Qualité de prédiction de la distribution selon la présence de *Niphargus*

3.5 Les *Niphargus* peuvent-ils être de bons bio-indicateurs pour évaluer la qualité des eaux souterraines ?

L'analyse en composantes principales est une méthode descriptive qui vise à mettre en évidence les corrélations entre les différentes variables. Elle permet de regrouper des individus en fonction de leurs caractéristiques.

L'analyse en composantes principales (ACP) est appliquée aux variables physico-chimiques, tandis que les sites sont regroupés en fonction de la présence de *Niphargus*. Les deux premiers axes expliquent 50 % de la variabilité totale entre les sites. La dimension 1 est principalement expliquée par les variables Solides dissous (TDS) et conductivité (Ev), suivies par les variables carbonates et température. La dimension 2, quant à elle, est influencée par l'oxygène et nitrates, suivies des variables température et phosphates (*cf.* Figure 22). Deux diagrammes présentent les principales variables constituant les dimensions 1 et 2 (Annexe 5).

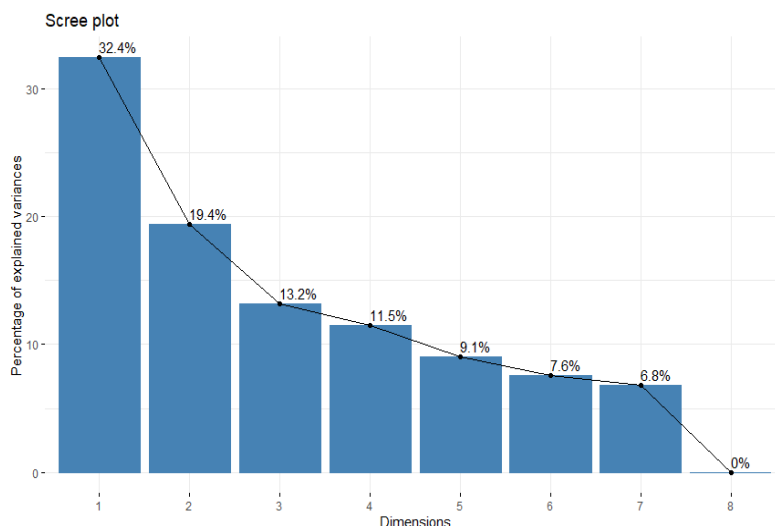


Figure 22 : Composantes de la variabilité de l'ACP

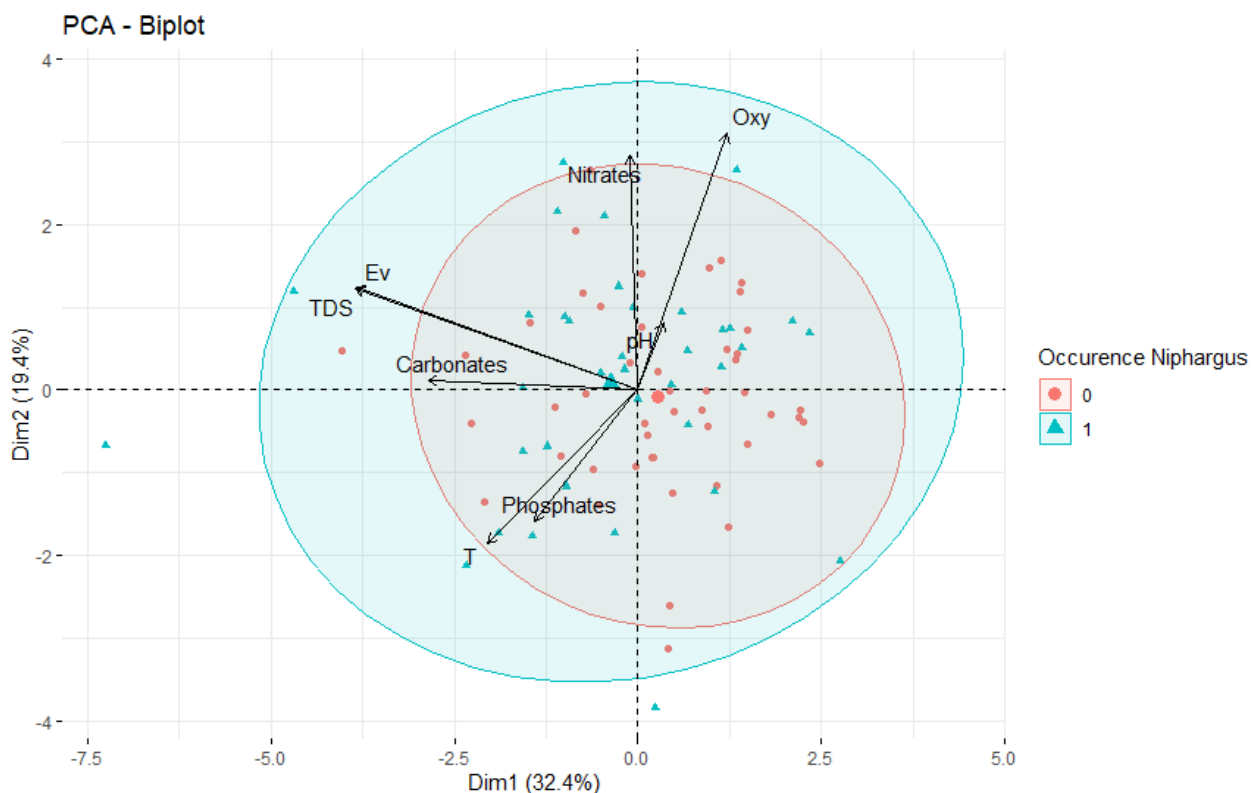


Figure 23 : Représentation du premier plan factoriel de l'ACP pour les variables et les sites avec ou sans *Niphargus*

Les sites avec présence ou absence de *Niphargus* se distribuent sur l'ensemble de la représentation, ce qui reflète d'une grande variabilité des sites. Aucune distinction notable entre les variables ne se démarque (cf. Figure 23).

La distinction des sites en fonction de la présence ou de l'absence de *Niphargus* est représentée par deux ellipses. Cependant, ces deux ellipses se superposent et les deux "barycentres" de chaque groupe sont très proches, tout en étant proche du 0 sur les deux axes.

L'analyse des données s'est portée sur l'occurrence des *Niphargus* en tant que variable de réponse. L'objectif est de comprendre comment cette variable binaire varie en fonction de différentes variables qualitatives et quantitatives. En ce qui concerne les variables qualitatives, les tests du χ^2 ou de Fisher pouvaient être utilisés en se basant sur des tableaux de contingence. Pour les variables quantitatives, une approche plus complexe a été adoptée en utilisant un modèle linéaire généralisé (GLM) sous le logiciel R. Cette démarche vise à fournir une analyse exhaustive et cohérente qui englobe à la fois les aspects qualitatifs et quantitatifs des données.

Les résultats de l'analyse linéaire généralisée (GLM) révèlent que la variable "accès à l'eau" explique de manière significative la présence des *Niphargus*, tandis que les autres variables testées n'expliquent pas de manière significative leur présence (p-value 0.01387) (cf. Figure 24).

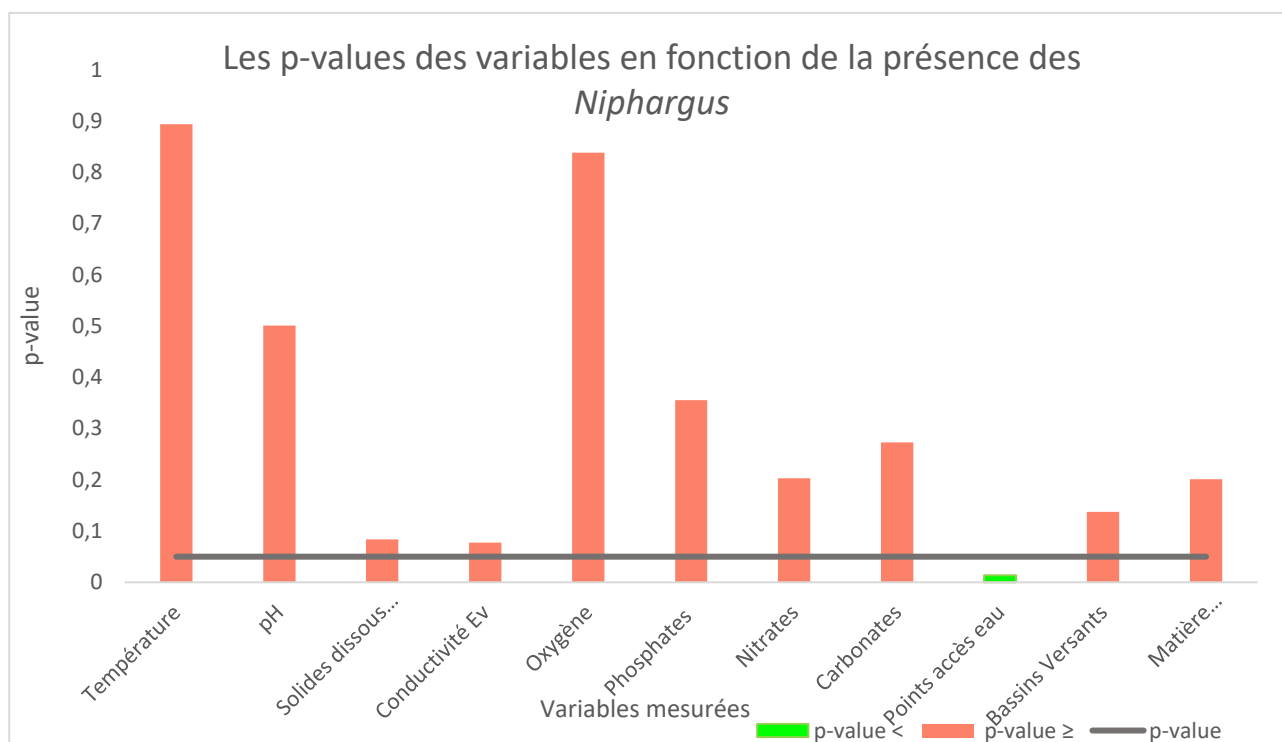


Figure 24 : Représentation des p-values en fonction de la présence des *Niphargus*

En examinant les effectifs de ces modalités d'accès à l'eau, deux catégories peuvent être supprimées pour l'analyse (accès 2 : effectif de 4, accès 5 : effectif de 3). Pour affiner davantage notre étude, une nouvelle analyse GLM est réalisée en se concentrant uniquement sur les trois modalités d'accès à l'eau restantes. Cette analyse fournit une valeur de p égale à 0,02392 pour l'accès à l'eau, ce qui est significatif. Cette variable "accès à l'eau", correspond aux différents habitats (accès 1 : cavités naturelles, accès 3 : sources, fontaines et lavoirs, accès 4 : puits, forages et piézomètres). Elle semble jouer un rôle dans l'explication de la présence des *Niphargus*.

En examinant attentivement la répartition de l'occurrence des *Niphargus* selon les différentes modalités d'accès à l'eau à l'aide d'un test de Tukey, plusieurs observations importantes se dégagent (cf. Figure 25). L'accès 1 se distingue de manière significative de l'accès 3, démontrant ainsi une différence notable entre ces deux catégories. Cependant, l'accès 1 ne présente pas de différence significative par rapport à l'accès 4. De la même manière, bien que l'accès 3 ne montre pas de différence statistiquement significative par rapport à l'accès 4, il reste significativement différent de l'accès 1. La fréquence d'occurrence des *Niphargus* est significativement plus grande en cavités naturelles, dans lesquelles le collecteur peut également collecter à vue des sources mais elle ne se distingue pas des habitats tels que les puits.

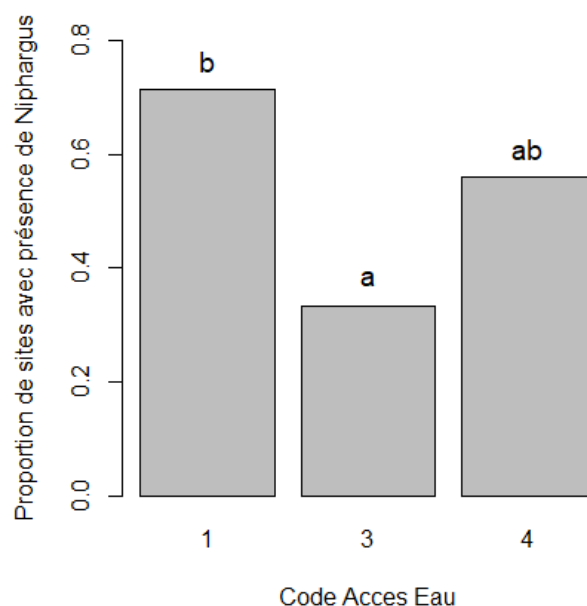


Figure 25 : Représentation du test de Tukey de l'accès à l'eau en fonction de la représentation des sites

Par conséquent, il serait imprudent de se baser uniquement sur ces catégories d'accès pour affirmer qu'elles permettent de distinguer de manière significative la présence de *Niphargus*.

Maintenant concernant la variable de qualité de l'eau, il s'agit de créer une variable de qualité d'eau simplifiée qui prend en compte les différentes mesures effectuées (Température, Potentiel Hydrogène (pH), Solides dissous (TDS), Conductivité (Ev), Oxygène, Phosphates, Nitrates, Nitrites, Ammonium, Carbonates).

Pour ce faire, chaque variable a été codifiée 0 ou 1, 0 étant le moins bon classement (en se référant à différentes normes françaises et européenne). La qualité d'eau est obtenue en additionnant les valeurs codées de ces 10 variables. C'est cette nouvelle variable, représentant la qualité de l'eau, qui est ensuite testée en relation avec l'occurrence des *Niphargus*.

Le graphique révèle que les sites se répartissent en sept classes distinctes, avec une note de qualité d'eau comprise entre 5 et 11 pour les 88 sites étudiés. Cette répartition met en évidence les variations de la qualité de l'eau selon les sites (cf. Figure 26).

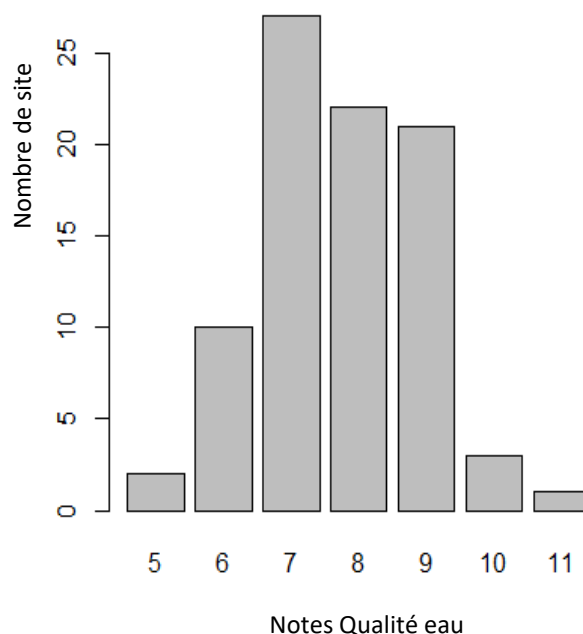


Figure 26 : Représentation du nombre de sites selon la note qualité eau obtenue

L'établissement d'une approche de regroupement en trois classes simplifie l'interprétation des niveaux de la qualité de l'eau.

Trois classes distinctes de qualité de l'eau sont établies en se basant sur les plages suivantes :

- Classe 1 : Note de qualité d'eau entre 5 et 6
- Classe 2 : Note de qualité d'eau entre 7 et 8
- Classe 3 : Note de qualité d'eau 9 et +

Ce regroupement en trois classes simplifiées permet une évaluation rapide. Les classes 1, 2, 3 peuvent être considérées respectivement comme de qualité "Basse", "Intermédiaire" et "Haute". La répartition des 88 sites de l'ancienne région Poitou-Charentes au sein de 3 classes montre qu'ils sont majoritairement au sein de la deuxième classe de ce classement (cf. Figure 27).

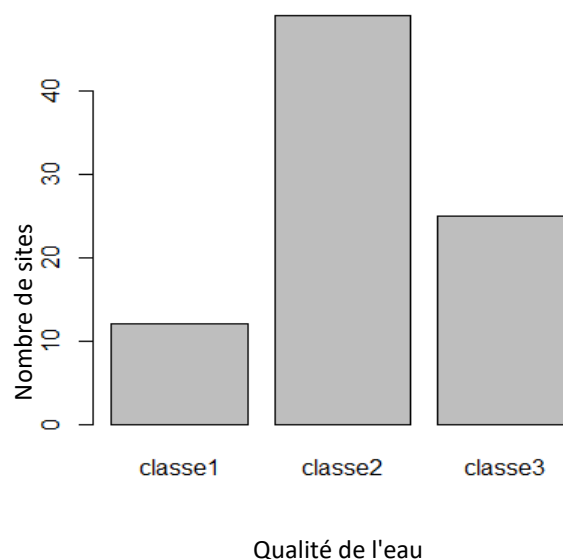


Figure 27 : Représentation, du nombre de sites selon trois classes de la qualité de l'eau

L'analyse GLM des trois classes de la qualité de l'eau en fonction de la présence de *Niphargus* se révèle significatif, la p-value est de 0.02576.

En test post hoc, un test de Tukey vise à déterminer si les moyennes des proportions de présence de *Niphargus* diffèrent significativement entre les classes. Les résultats du test de Tukey apportent une compréhension plus approfondie. En effet, les classes sont considérées significativement différentes si les lettres associées aux moyennes des proportions de sites en présence de *Niphargus* diffèrent.

Le test de Tukey révèle que la classe 1 de la qualité de l'eau est significativement différente de la classe 3 mais qu'elle ne diffère pas de la classe 2. La classe 2 de la qualité d'eau n'est significativement pas différente de la classe 1 et de la classe 3. Les *Niphargus* sont significativement plus présents dans les eaux de qualité basse que dans les sites de qualité haute, ce serait des bio-marqueurs de mauvaise qualité des eaux souterraines (cf. Figure 28).

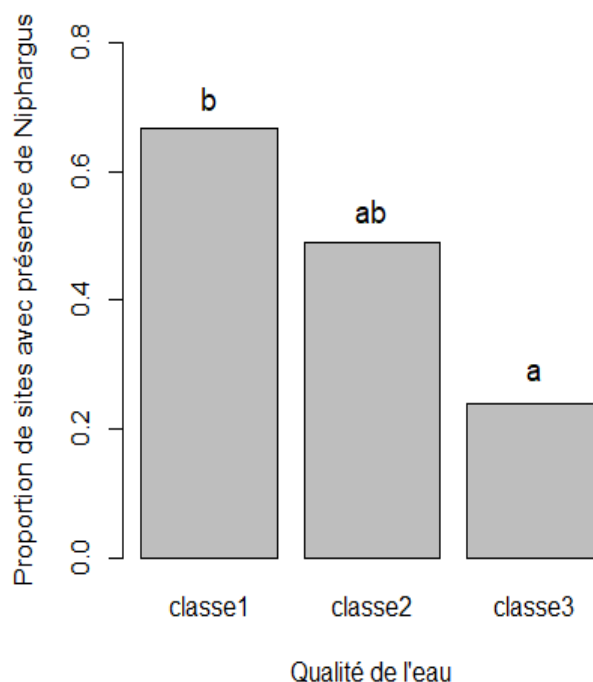


Figure 28 : Distribution des sites avec *Niphargus* selon trois classes de qualité d'eau

Ce classement de la qualité de l'eau en fonction de la présence des *Niphargus* permet d'établir deux classes de la qualité d'eau distinctement différentes (classe 1 et classe 3).

Un autre regroupement en trois classes est testé pour déterminer si ce classement alternatif montre une répartition différente des *Niphargus* au sein de ces classes, tout en maintenant un équilibre satisfaisant dans les effectifs des classes. La note variable qualité eau est toujours obtenue comme précédemment par la somme des codes des variables physico-chimiques mesurées lors de l'étude.

Les nouvelles classes sont établies comme suit :

- Classe 1 : Note de qualité d'eau entre 5, 6 et 7
- Classe 2 : Note de qualité d'eau 8
- Classe 3 : Note de qualité d'eau 9 et +

Comme pour le regroupement précédent en trois classes simplifiée, les classes 1, 2, 3 peuvent être considérées respectivement comme de qualité "Basse", "Intermédiaire" et "Haute". La répartition des 88 sites de l'étude au sein de 3 classes montre qu'ils sont majoritairement au sein de la première classe de qualité de l'eau de ce classement alternatif (cf. Figure 29).

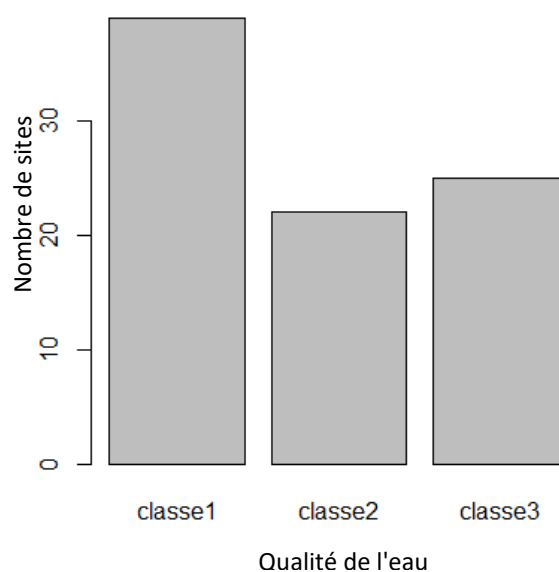


Figure 29 : Représentation du nombre de sites selon trois nouvelles classes de la qualité de l'eau

L'analyse GLM de ce nouveau classement de la qualité de l'eau en fonction de la présence des *Niphargus* est significatif, p-value 0.034.

Le test de Tukey, en test post hoc, révèle que la classe 1 de qualité de l'eau est significativement différente de la classe 3 mais qu'elle ne diffère pas de la classe 2. La classe 2 de la qualité d'eau n'est significativement pas différente de la classe 1 et de la classe 3. Les *Niphargus* sont significativement plus présents dans les sites de qualité de l'eau basse que dans les sites de qualité de l'eau haute, ce qui indique qu'ils seraient des bioindicateurs de basse qualité des eaux souterraines (cf. Figure 30).

Ce classement alternatif n'a également pas démontré la possibilité de distinguer trois classes de qualité d'eau en fonction des *Niphargus* significativement différentes. Seules les classes 1 et 3 sont significativement différentes l'une de l'autre.

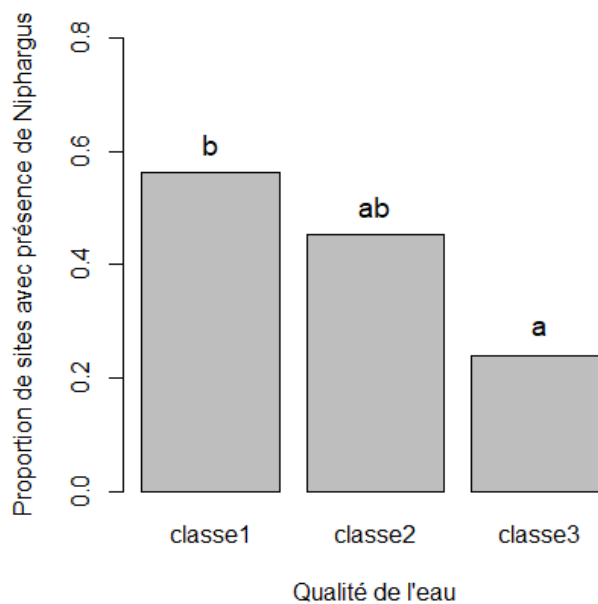


Figure 30 : Proportion de sites avec *Niphargus* selon trois nouvelles classes de la qualité de l'eau

4 Discussion

Cette étude statistique, à base de tests d'hypothèses autour de la fréquence d'occurrence des crustacés *Niphargus* (le seul taxon stygobie réellement visible et identifiable sur le terrain), a tenté de répondre aux quatre hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : Est-ce que la distribution des *Niphargus* varie en fonction de l'âge géologique des habitats ?

L'ère géologique du Secondaire est majoritairement représentée dans les proportions effectuées en Poitou-Charentes, avec 79 sites sur les 88 collectés, soit 90 %. Ceci reflète assez fidèlement la géologie de la région, mais le nombre limité de sites inventoriés pour d'autres ères géologiques rend difficile d'envisager des tests statistiques du fait d'effectifs inférieurs à 5 et d'obtenir une évaluation réaliste de la distribution des *Niphargus*.

L'extension en cours de l'étude au reste de la Nouvelle-Aquitaine permettra de répondre en partie à cette question, en disposant d'un échantillonnage plus conséquent, notamment sur des sites d'âges géologiques datés du Tertiaire et Quaternaire.

Hypothèse 2 : Les *Niphargus* manifestent-ils une préférence pour certains types d'aquifères ?

Même constat avec les aquifères pour les lesquels 74 des 88 sites sont situés dans des aquifères karstiques, 84 %. Là encore, cela reflète assez fidèlement l'hydrologie de la région, mais la limitation du nombre de sites inventoriés provenant d'autres aquifères rend difficile l'évaluation de ce paramètre sur la distribution des *Niphargus*.

Des recherches futures pourraient se pencher sur des échantillons plus larges et diversifiés provenant de différentes aquifères. La présence préférentielle de *Niphargus* dans certains types d'aquifères pourrait indiquer une adaptation à des conditions environnementales particulières. Des études plus approfondies pourraient se concentrer sur les caractéristiques hydrogéologiques et chimiques spécifiques de ces aquifères pour déterminer comment elles influencent la présence des *Niphargus*. Des analyses de préférences alimentaires et d'autres facteurs environnementaux pourraient également être explorées pour expliquer cette distribution (Ercoli, F. et *al.*, 2019).

Hypothèse 3 : Les *Niphargus* peuvent-ils servir de bons bio-indicateurs pour évaluer la biodiversité de la stygofaune sur les sites ?

L'analyse de la biodiversité des sites révèle des différences marquées en termes d'abondance des différents taxons stygobies. L'examen des statistiques en relation avec la présence des taxons *Niphargus* au sein de trois classes d'indice de Shannon dégage des tendances claires. Ces résultats mettent en lumière un lien potentiel entre la présence de *Niphargus* et la structuration de la biodiversité dans la communauté étudiée. Les résultats statistiques soulignent que les *Niphargus* peuvent servir d'indicateurs fiables de la diversité de la stygofaune ($p\text{-value} \leq 0.05$). En effet, l'étude démontre que leur présence est liée à une proportion accrue de taxons stygobies, atteignant spécifiquement 52 % et 40 % sans *Niphargus*. Cette corrélation significative entre la présence des *Niphargus* et l'augmentation des taxons stygobies renforce la notion qu'ils peuvent être des bio-indicateurs utiles pour évaluer la diversité de la stygofaune dans les milieux. Cependant, bien que la comparaison des moyennes révèle une $p\text{-value}$ significative, la qualité de prédiction demeure limitée ($R^2 = 0.0509$). Par conséquent, l'occurrence des *Niphargus* ne permet pas une prédiction significativement acceptable de la biodiversité de la stygofaune.

Des études plus approfondies pourraient également explorer comment les *Niphargus* réagissent aux changements environnementaux et s'ils sont sensibles aux perturbations anthropiques.

Hypothèse 4 : *Niphargus* peuvent-ils être de bons bio-indicateurs pour évaluer la qualité des eaux souterraines ?

L'analyse en composantes principales révèle que les sites présentent une grande variabilité, indépendamment de la présence de *Niphargus*. Les variables considérées ne permettent pas de différencier les sites en fonction de la présence de *Niphargus*. Les *Niphargus* semblent s'adapter à toutes ces variables sans montrer de préférences particulières, ils sont présents partout et tolérant vis-à-vis des paramètres physico-chimiques.

L'analyse statistique des données s'est concentrée sur l'occurrence des *Niphargus* en relation avec les diverses variables. Seul le facteur "accès à l'eau" explique de manière significative la présence des *Niphargus* ($p\text{-value} \leq 0.05$). Cependant, en poursuivant avec un test post hoc utilisant le test de Tukey, il apparaît que les différents types d'accès ne sont pas tous significativement différents entre eux. Par conséquent, se baser uniquement sur ces catégories d'accès pour affirmer une distinction significative de la présence de *Niphargus* serait prématurée.

L'approche par modèle linéaire généralisé (GLM), associée à la classification des sites en trois classes de qualité des eaux souterraines, révèle des divergences entre les deux simulations de classification. Néanmoins, les tests post hoc effectués via le test de Tukey indiquent que ces classifications de sites ne se distinguent pas toutes nettement les unes des autres, seules deux classes sont significativement différentes. De ce fait, ces classifications n'ont pas démontré de manière significative leur capacité à différencier trois classes de qualité d'eau en fonction des sites.

Pour évaluer leur efficacité en tant qu'indicateurs de la qualité des eaux souterraines, des recherches pourraient se concentrer sur d'autres indicateurs environnementaux, tels que la concentration en contaminants chimiques. Une comparaison plus poussée entre les sites avec et sans *Niphargus* pourrait fournir des informations sur leur sensibilité à la pollution. En outre, des études de suivi à long terme pourraient déterminer si les populations de *Niphargus* fluctuent en réponse aux changements de qualité de l'eau.

A ce jour, l'étude en cours sur l'ensemble de la région Nouvelle-Aquitaine (N=350 sites inventoriés) n'a pas d'équivalent à l'échelle nationale, ni à l'échelle européenne (dixit Florian Malard, Laboratoire LEHNA, université Lyon 1). Ce travail n'est qu'une phase exploratoire intermédiaire ; le jeu de données ainsi collecté sera ultimement confié au laboratoire INRAE de Cestas, spécialisé dans la bio-indication.

5 Bibliographie

- Bichot F. et Gennat A., (2013). Les eaux souterraines en Poitou-Charentes. Brochure BRGM, 72 p. (http://sigespoc.brgm.fr/IMG/pdf/brochure_es_pch.pdf).
- Botosaneanu L. (1986) Stygofauna mundi. A Faunistic, Distributional and Ecological Synthesis of the World Fauna inhabiting subterranean Waters (including the Marine Interstitial). E.J. Brill Publ., Leiden.
- Bou C., (1974). Les méthodes de récolte dans les eaux souterraines interstitielles. *Ann. Spéléol.* **29** (4), 611–619.
- Bouchet P., (1990). La malacofaune française: endémisme, patrimoine naturel et protection. *Revue d'Ecologie.* **45**: 259–288.
- Danielopol D.L., Griebler C., Gunatilaka A., Notenboom J. (2003) Present state and future prospects for groundwater ecosystems. *Environmental Conservation*, **30**, 104–130.
- Danielopol D.L., Gibert J., Griebler C., Gunatilaka A., Hahn H.J., Messana G., Notenboom J., Sket B. (2004) Incorporating ecological perspectives in European groundwater management policy. *Environmental Conservation*, **31**, 185–189.
- Danielopol D.L., Gibert J., Griebler C., (2006a). Efforts of the European Commission to improve communication between environmental scientists and policy-makers. *Environ. Sci. Polut. Res* **13**, 138–139.
- Danielopol D.L., Griebler, C., & Gunatilaka, A. (2008). Cryptic biodiversity in groundwaters : a contribution to the present knowledge. In "Carbon and Nutrient Fluxes in Continental Margins: A Global Synthesis", pp. 377-406. Springer.
- EPA, (2003). Guidance for the assessment of environmental factors; consideration of subterranean fauna in groundwater and caves during environmental impact assessment in Western Australia. Environmental Protection Authority, Perth, Australia, pp. 12.
- Ercoli, F., Lefebvre, F., Delangle, M., et al. Differing trophic niches of three French stygobionts and their implications for conservation of endemic stygofauna. *Aquatic Conservation*, 2019 ; 29 : 2193-2203. (<https://doi.org/10.1002/agc.33227>)
- EU-GWD, (2006). Directive 2006/118 of the European Parliament and the Council of the 12 December 2006. Official J. European Comm. L372, 19-31.
- Ferreira D., Malard F., Dole-Olivier M.J., Gibert J. (2007). Obligate Groundwater Fauna of France : Diversity Patterns and Conservation Implications. *Biodiversity and Conservation*, **16** : 567–596.
- Fišer C., Brancel, A., Yoshizawa M., Mammola S., Fišer Z., (2023). Dissolving Morphological and Behavioral Traits of Groundwater Animals into a Functional Phenotype. *Groundwater Ecology Evolution and evolution.* **18**, 415-418.
- Gibert J., Danielopol D., Stanford J. A. (1994) *Groundwater ecology*, Academic Press, San Diego, 573p.
- Gibert J. (2001). Protocols for the assessment and conservation of aquatic life in the subsurface (PASCALIS): a European Project. In: Culver D.C., Deharveng L., Gibert J. and Sasowsky I.D. (eds), *Mapping Subterranean Biodiversity/Cartographie de la biodiversité souterraine*, Proceedings of the International Workshop held, 18–20 March 2001. Laboratoire Souterrain du CNRS, Moulis, Ariège, France. Karst Waters Institute, Special Publication 6, Charles Town, West Virginia, pp. 19–21.
- Gibert J. et Deharveng L. (2002) Subterranean Ecosystems: A Truncated Functional Biodiversity *BioScience*, **52**, 473–481
- Gibert, J., Culver, D.C., Danielopol, D.L., Griebler, C., Gunatilaka, A., Notenboom, J., & Sket, B. (2004). "Groundwater ecosystems: human impact and future management." In *Aquatic Ecosystems: Trends and Global Prospects* (pp. N.V.C. polumin). Cambridge University Press.
- Gibert J., Culver D.C., Dole-Olivier M.-J., Malard F., Christman M.C., Deharveng L. (2009) Assessing and conserving groundwater biodiversity: synthesis and perspectives. *Freshwater Biology*, **54**, 930–941.
- Ginet R., Decu V., (1977). *Initiation à la biologie et à l'écologie souterraines*. Editions universitaires, Jean Pierre Delarge, Paris, 345p.
- Gonser T. (2001) Les eaux souterraines - un milieu obscur. *Bulletin de l'EAWAG news* **49**, 36 : 6-8
- Griebler C., Stein H., Kellermann C., Berkhoff S., Briellmann H., Schmidt S., Selesi D., Steube C., Fuchs A., Hahn H.J., (2010). Ecological assessment of groundwater ecosystems - Vision or illusion? *Ecol. Eng.* **36**, 1174–1190.

- Holsinger J.R., (1993). Biodiversity of subterranean amphipod crustaceans: global patterns and zoogeographic implications. *J. Nat. Hist.* **27**: 821–835.
- Juberthie C. et Decu V. (1994,1998, 2001). *Encyclopedia Biospeleologica*, Société de Biospéléologie, Moulis et Bucarest, 2294p.
- Korbel, K.L., Hose, G.C., (2011). A tiered framework for assessing groundwater ecosystem health. *Hydrobiologia* **661**, 329–349.
- Malard F., Plénet S., Gibert J., (1996). The use of invertebrates in ground water monitoring: a rising research field. *Ground Water Monitoring and Remediation* **16**:103–113.
- Malard F., & Hervant F. (1999). Oxygen supply and the adaptations of animals in groundwater. *Freshwater Biology*, **41** : 1-30.
- Malard, Florian, M.-J. Dole-Olivier, J. Mathieu, F. Stoch, A. Brancelj, A. I. Camacho, F. Fiers, et al. (2002). "Sampling Manual for the Assessment of Regional Groundwater Biodiversity."
- Malard, F., Dole-Olivier, M.-J., Mathieu, J., Stoch, F., et al. (2004). "Sampling Manual for the Assessment of Regional Groundwater Biodiversity." EU PASCALIS Project Report, 74 p.
- Moura P., Barraud S., Baptista, M.B., Malard, F., (2011). Multicriteria decision-aid method for the evaluation of the performance of stormwater infiltration system over the time. *Water Sci. Technol* **64**, 1993–2000.
- Notenboom J., Plénet S., and Turquin M.J., (1994). Groundwater contamination and its impact on groundwater animals and ecosystems. In *Groundwater ecology*, ed. J. Gilbert, Danielopol D.L., and Stanford J.A., 477-504 New York : Academic Press.
- Premate E., Borko S., Delic T., Malard F., Simon L., Fiser C., (2021a). Cave amphipods reveal co-variation between morphology and trophic niche in a low-productivity environment. *Freshwater Biology* **66**, 1876-1888.
- Système d'évaluation de la qualité des eaux souterraines SEQ - Eaux Souterraines. Rapport de présentation. Version 0.1 -Août 2003. MEDD et BRGM
- Sket B. (1999) The nature of biodiversity in hypogean waters and how it is endangered. *Biodiversity & Conservation*, **8**, 1319–1338.
- Stein H., Hermans R., & Mertens J. (2010). The potential use of fauna and bacteria as ecological indicators for the assessment of groundwater quality. *Journal of Environmental Monitoring*, **12**(11), 2103-2112.
- Stoch, F., Malard, F., Castellarini, F., Dole-Olivier, M.-J., & Gibert, J. (2004). "Statistical analyses and identification of indicators." EU PASCALIS Project Report, 156 p.
- UNESCO (2022). The United Nations World Water Development Report 2022: groundwater: making the invisible visible, 225 pages (<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000380723>)
- Wendland, F., Hannappel, S., Kunkel, R., Schenk, R., Voigt, H.J., Wolter, R., (2005). A procedure to define natural groundwater conditions of groundwater bodies in Germany. *Water Sci. Technol.* **51**, 249–257.
- Wendland, F., Blum, A., Coetsiers, M., Gorova, R., Griffioen, J., Grima, J., Hinsby, K., Kunkel, R., Marandi, A., Melo, T., Panagopoulos, A., Pauwels, H., Ruski, M., Traversa, P., Vermooten, J.S.A., Walraevens, K., (2008). European aquifer typology: a practical framework for an overview of major groundwater composition at European scale. *Environ. Geol* **55**, 77–85.

Annexe 1



Fiche Topo – Stygofaune en Nouvelle-Aquitaine

Département : LANDES (40)

Commune : PUJO-LE-PLAN

(COG/INSEE)

Lieu-dit/Toponymie : Sources du lavoir de Pujol le Plan

(Geoportail/IGN)

Coordonnées géographiques :

- X / Y / Z (L93) : 431522/6313325/63m

(Geoportail/IGN)

- GPS décimal : -0,3405987/43,8678133

(Geoportail/IGN)

Étage géologique : Miocène

(InfoTerre/BRGM)

Aquifère : Helvétien

(BRGM)

Bassins versants :

(Geoportail/IGN)

Code BSS : 09521X0003

(InfoTerre/BRGM)

Code Masse d'eau souterraine : FRFG066
2021/AEAG)

(SDAGE 2016-

Histoire & Patrimoine local :

Remarques :

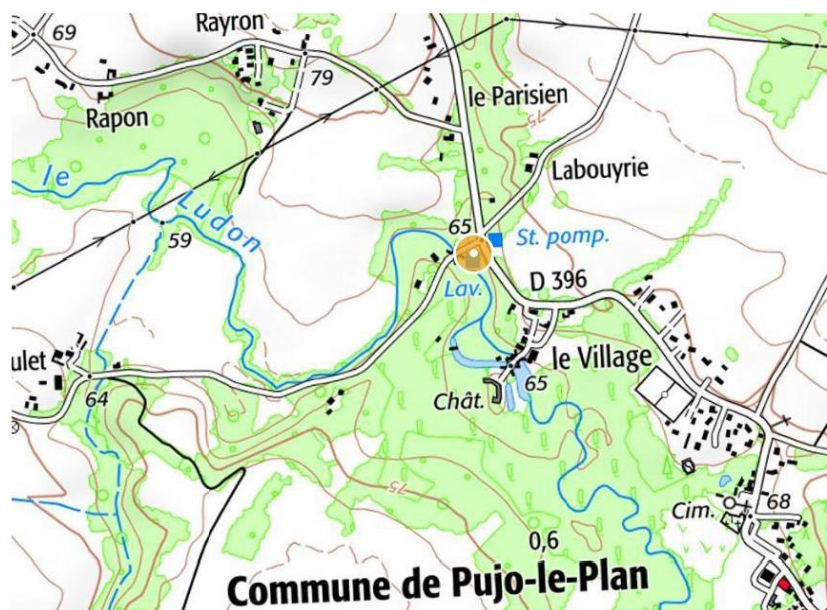
Biblio/Média :

Contacts : Davis FLANDIN : 06 42 21 29 41 ; david.flandin@landes.fr

Valérie ROBINO (Technicienne chargée de la surveillance des aquifères landais) : valerie.robino@landes.fr,
06 23 81 71 64 et 05 58 05 40 40, poste 8767

Mairie : 05.58.03.22.75 ; commune-pujol-le-plan@wanadoo.fr ; Mme Lesparre (Maire)

Localisation (Géoportail/IGN) :



Illustrations & Photos



SEPANSO Aquitaine : 1, rue de Tautia, 33800 BORDEAUX
Tél. : 05 56 91 33 65 / Courriel : thierry.alezine@sepanso.org

Annexe 2



173



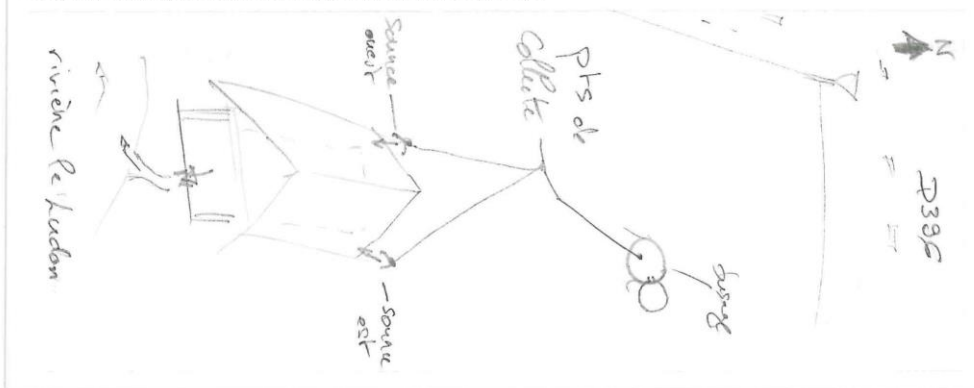
Fiche Collecte - Stygofaune en Nouvelle-Aquitaine

Collecteur(s) / Observateur(s) : FL + SN
Date : 27/03/2023 H. arrivée : 10 h 15 min H. départ : 11 h 50 min

Nom Station : SOURCES DU LAVOIR
Lieu-dit : LE LAVOIR
Commune : PUJO-LE-PLAN Département : 40
Latitude (DS) : 43° 52' 10" N Longitude (DS) : 00° 20' 26" O
Altitude : 063 m Autres systèmes / Remarques : 431522 / 6313325 m (L93)
Cord. GRS portable FL 058 / + pointage Geopoint FL après collecte Photo : ☒

Habitat : rivière souterraine ☐ nappe souterraine ☐ œil source ☒ hyporhéos ☐
Point(s) d'accès : galerie souterraine ☐ puits ☐ captage ☐ source naturelle ☐
fontaine ☒ piézomètre ☐ sous-écoulement ruisseau ☐ sous-écoulement rivière ☐

Croquis / Faciès (circulation d'eau, points de collecte, etc.) :



Nature du substrat : matière organique ☒ argile/limon ($\approx \mu\text{m}$) ☒ sable ($< 2 \text{ mm}$) ☐
graviers ($2-10 \text{ mm}$) ☐ cailloux ($10-100 \text{ mm}$) ☒ pierre/bloc ($>10 \text{ cm}$) ☐

Flux : nul ☐ faible ☒ moyen ☐ fort ☐
Niveau d'eau : (par rapport au sol) 0.0 m Hauteur d'eau : 0.1 m luminosité : 10 lux

Qualité d'eau : T : 14.1 °C pH : 7.28 Ev : 0.54 mS/cm TDS : 270 ppm
Oxygène (O_2) : 3.5 mg/L Ammonium (NH_4^+) : 10 mg/L Phosphate (PO_4^{3-}) : 1.5 mg/L
Sulfate (SO_4^{2-}) : 200 mg/L Nitrate/ite (NO_3/NO_2) : 375/0 mg/L
Carbonate (CaCO_3) : 8 (x17.8) : 140 mg/L Pollution/détritus : RAS

Biotope (amont) : g^{des} cultures ☐ bocage/prairies ☒ cours d'eau ☐ mares/étangs ☐
marais ☐ tourbières ☐ zones urbaines ☐ forêts ☐ pelouses sèches ☐ landes ☐
falaises calcaires ☐ roches siliceuses ☐ galeries souterraines ☐ littoral halophile ☐
Flore (alentours immédiats) : noms français + latin TaxRef... ORTIE - Lamiaceae pourpre (x8)
Plantain lancéolé (x1) - Limonum bonactum (x22, en fleurs) - Ranunc
acrisolus (x1) - Ranunc. flammula (x50, fleur. t. 12) - Ortie dioïque (x1)
Ache faux-cresson (x100, fleur. blanc) - Cardamine des Rives (x10)
Faune (alentours immédiats) : noms français + latin TaxRef... Pic noir (x1, vu et entendu)
Limace étagée (x1) - Gnatus asellus (x1) - Philosia muscorum (x1)

ID Prélèvement (PC/AQ/LM + N° Dpt + 3 Initiales Station + N°) AQ40PUS1 (ex. : PC86GAS1)
Méthode(s) : à vue ☐ filtrage substrat ☒ sondage Bou-Rouch ☐ filet Cvetkov ☒
piège à appât ☐ piège à habitat ☐ piège filtrant ☐ pompage ☐
Effort d'échantillonnage (durée, nombre, volume) : 2 exubances + 1 Cvetkov à 20 min

ID Prélèvement (PC/AQ/LM + N° Dpt + 3 Initiales Station + N°) 111111 (ex. : PC86GAS1)
Méthode(s) : à vue ☐ filtrage substrat ☐ sondage Bou-Rouch ☐ filet Cvetkov ☐
piège à appât ☐ piège à habitat ☐ piège filtrant ☐ pompage ☐
Effort d'échantillonnage (durée, nombre, volume) : _____

Remarques : Les 2 sources collectées en "regard plant" + 1 Cvetkov dans
le regard en amont - possible Nipit vus...
Retour en mainie souhaité

Annexe 3



Fiche Tri & Dét. - Stygofaune en Nouvelle-Aquitaine



ID Station : P U I T S S U R E A U ID Prélèvement : P C 7 9 S U R 2

Observateur(s) : F L + Date : 1 8 / 0 2 / 2 0 1 4

[illegible]

François Lefebvre : 14, rue Jean Moulin - 86240 Fontaine-le-Comte
Tél. : 05 49 88 99 04 / Fax : 08 26 99 86 21 / Courriel : francois.lefebvre@eco-analyses.com

Remarques : faune stygobie (Gallaselle, Niphargus, etc.) + faune de surface (acararien pigmenté + collemboles)

Photos :



Mollusque gastéropode (env. 2 mm)



Crustacé copépode (env. 1 mm)



Crustacé Niphargus sp.(env. 10 mm)

Annexe 4

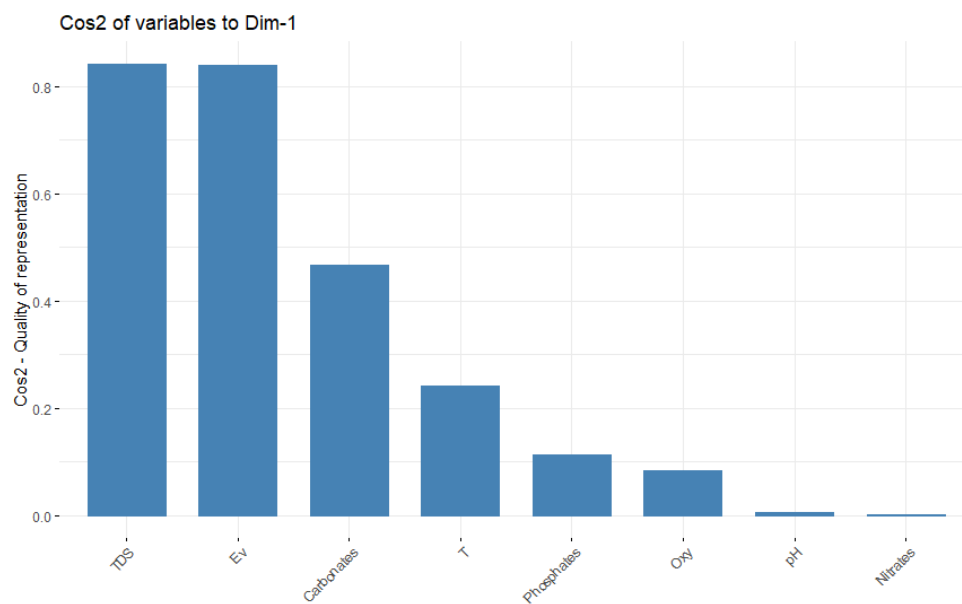
Tableau récapitulatif des indices de Biodiversité

Site	1	2	3	5	7	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	22	23	24	25	26	28
A	24	7	2	3	78	51	2	16	4	5	1	7	12	31	1	1	29	13	2	1	1	5
S	1	3	2	2	4	2	1	5	2	1	1	5	4	2	1	1	5	5	1	1	1	1
H'	0,19	1,23	0,68	0,79	2,67	1,72	0,49	2,23	0,90	0,66	0,38	1,61	1,64	0,09	0,38	0,38	2,71	2,09	0,49	0,38	0,38	0,66
E	0,19	0,61	0,23	0,16	0,38	0,21	0,05	0,20	0,07	0,05	0,03	0,11	0,10	0,01	0,02	0,02	0,12	0,09	0,02	0,02	0,01	0,02
Site	29	30	31	36	37	38	39	40	41	43	44	45	46	48	50	52	53	54	58	59	61	62
A	2	3	24	2	1	1	5	13	3	1	1	3	10	11	4	55	5	1	81	5	2	12
S	2	1	2	2	1	1	2	4	2	1	1	1	2	4	2	3	2	1	1	3	2	2
H'	0,68	0,57	1,11	0,68	0,38	0,38	0,92	1,95	0,79	0,38	0,38	0,57	1,02	1,53	0,86	1,77	0,92	0,38	5,73	1,16	0,68	1,20
E	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01	0,01	0,02	0,05	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,03	0,02	0,01	0,10	0,02	0,01	0,02
Site	64	66	67	68	69	71	72	73	74	75	77	78	79	82	83	84	85	89	92	97	101	102
A	1	4	1	1	11	4	7	5	3	1	23	7	37	2	6	105	3	5	26	21	3	1
S	1	2	1	1	3	4	1	2	3	1	2	2	3	2	3	2	3	2	3	3	3	1
H'	0,38	0,86	0,38	0,38	1,29	1,19	0,71	0,92	0,95	0,38	0,89	0,99	0,04	0,68	1,19	6,13	0,95	0,92	1,22	1,52	0,95	0,38
E	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,07	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00
Site	103	104	105	106	107	108	109	111	112	113	114	115	116	117	119	121	122	123	126	127	128	129
A	7	16	1	1	1	15	3	5	1	1	4	2	7	3	2	2	1	3	1	2	3	1
S	5	1	1	1	1	4	1	1	1	1	2	2	4	3	2	1	1	3	1	2	3	1
H'	1,61	0,58	0,38	0,38	0,38	1,91	0,57	0,66	0,38	0,38	0,90	0,68	1,43	0,95	0,68	0,49	0,38	0,95	0,38	0,68	0,95	0,38
E	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00

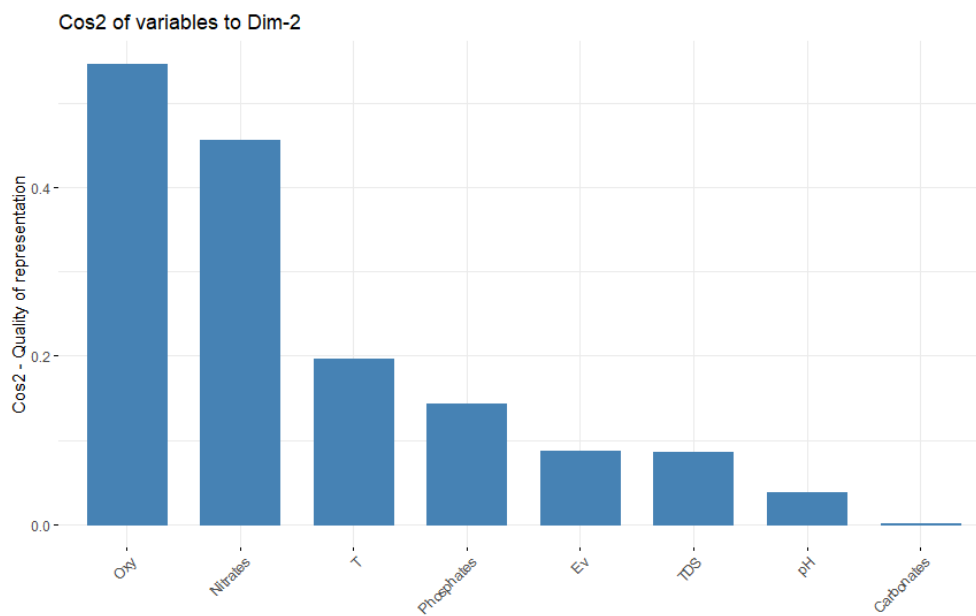
S

A : Abondance, S : Richesse spécifique H' : Indice de diversité de Shannon, $H' = -\sum_{i=1}^S p_i \log_2 p_i$, E : Equitabilité de Piélou, $E = H / \log_2 S$

Annexe 5



Graphique des principales variables représentant la dimension 1



Graphique des principales variables représentant la dimension 2