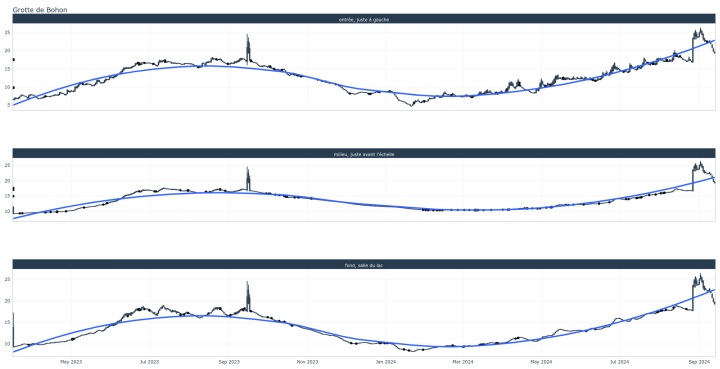
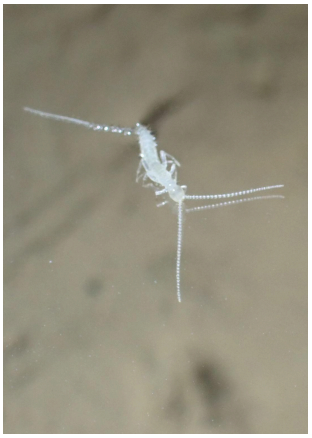
Marché public

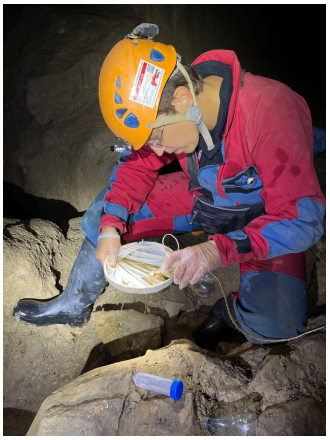
Développement d'une méthode de détermination de l'état de conservation de l'habitat Natura 2000 « Cavités souterraines naturelles » (8310) et de surveillance/suivi en Wallonie

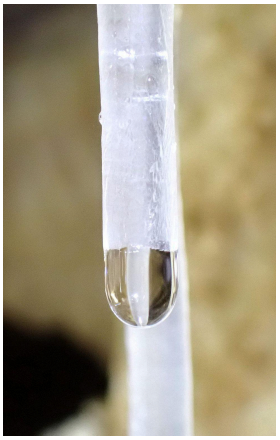
-

Rapport Post-Final - Février 2025









Colophon

Etude et rapport réalisés par

1. Ecofirst

Société Coopérative (SC)
n° immatriculation BCE : BE-0692 806 959
ayant son siège Grand'rue 12 – 6870 Awenne (Belgique)
Contact général :
Gérard Jadoul +32 498 54 42 40 gerard.jadoul@ecofirst.eu
Personnes de contact pour ce dossier :
Pierrette Nyssen +32 473 265 264 pierrette.nyssen@ecofirst.eu
Jean-François Godeau +32 472 944 847 jf.godeau@ecofirst.eu

en association avec

2. Maison de la Spéléologie et du Patrimoine Souterrain

association sans but lucratif (ASBL)
n° immatriculation BCE : BE-0418 589 147
ayant son siège Avenue Arthur Procès, 5 - 5000 Namur (Belgique)
Personnes de contact pour ce dossier :
Loran Haesen +32 497 42 89 24 loran@speleo.be
Nathalie Goffioul nathalie@speleo.be

et avec

3. Commission Wallonne d'Etude et de Protection des Sites Souterrains

association sans but lucratif (ASBL)
n° immatriculation BCE : BE-0425 871 570
ayant son siège : Clos des pommiers, 26 - 1310 la Hulpe (Belgique)
Contact général :
Gerald Fanuel - Président de la CWEPSS
Personne de contact pour ce dossier :
Georges Michel +32 486 42 04 35 cwepss@gmail.com

dans le cadre d'un marché public

IPE 002 BNIP - Cahier spécial des charges n° 03.05.02-18H273
Marché public de services visant au développement d'une méthode de détermination de l'état de conservation de l'habitat Natura 2000 "Cavités souterraines naturelles" (8310) et de surveillance/suivi en Wallonie dans le cadre du projet LIFE intégré

émis par le

Service Public de Wallonie - DNF

Adjudicateur : La Région wallonne, représentée par son Gouvernement en la personne de La Région wallonne, représentée par son Gouvernement en la personne Madame Céline Tellier, Ministre de l'Environnement, de la Nature, de la Forêt, de la Ruralité et du Bien-Être animal

Service/Direction responsable de la gestion du marché : Service Public de Wallonie
Agriculture, Ressources naturelles et Environnement
Département de la Nature et des Forêts
Direction de la Nature et des Espaces Verts
Adresse postale : Avenue Prince de Liège 15, 5100 Jambes (BELGIQUE)

Personne de contact pour ce dossier :
Eric Joiris +32 470 61 18 77 Eric.joiris@spw.wallonie.be

dans le cadre du

LIFE BNIP
LIFE intégré - Belgian Nature Integrated Project

et géré en collaboration avec le

DEMNA

Service Public de Wallonie Agriculture, Ressources naturelles et Environnement
Département de l'Etude du Milieu naturel et agricole
Adresse postale : avenue de la Faculté d'Agronomie, 22 - 5030 Gembloux (BELGIQUE)

Personnes de contact pour ce dossier :
Quentin Smits +32 477 53 88 81 quentin.smits@spw.wallonie.be
Jean-Louis Gathoye +32 478 69 16 93 jeanlouis.gathoye@gmail.com
Lionel Wibail +32 471 91 27 45 lionel.wibail@spw.wallonie.be

Photos de couverture : Profil de température de la Grotte de Bohon (graphes réalisés par JF. Godeau) - Entrée de la Grotte du Parrain (photo G. Rochez) - Diploure à la grotte Lyell (photo P. Nyssen) - Collecte de matériel biologique à la grotte de Bohon (photo J. Demaret) - Détail fistuleuse à la grotte des Collemboles (photo JF. Godeau) - Niphargus (photo G. Rochez)

Date de finalisation du rapport post-final : 14-02-2025

Table des matières

Contexte et cadre du rapport 5
1. Base de données de références bibliographiques 5
1.1 Constitution d'une base de données Zotero et lecture de biblio 5
2. Monitoring article 17 dans les pays voisins 9
2.1 Symposium octobre 2021 9
2.2 Réunions bilatérales 10
2.3 Travail de synthèse 10
3. Rédaction de synthèses bibliographiques 10
3.1 Description générale du milieu souterrain 11
3.2 Variables abiotiques à suivre pour caractériser le bon état des habitats souterrains 11
3.3 Paramètres biotiques à suivre pour caractériser le bon état des habitats souterrains 12
3.4 Menaces et mesures de protection 12
4. Base de données biologiques 13
4.1 Création d'une liste taxonomique complète 13
4.2 Création d'une base de données biologiques structurée 14
4.3 Recherche de données biologiques pré-existantes 15
4.4 Encodage des données de la littérature 17
4.5 Rencontre avec des experts actifs dans le domaine 19
4.6 Stage de biospéologie 19
4.7 Contribution à des ouvrages de référence et communication 20
5. Étude des sites 20
5.1 Choix des sites représentatifs 20
5.2 Participation à une réflexion sur le statut de protection des sites 24
6. Caractérisation des activités en surface et identification des menaces qui en découlent 25
6.1 Accueil et encadrement d'un stagiaire chargé de la réalisation d'un TFE 25
7. Travail de terrain 26
7.1 Autorisation d'accès aux sites-tests 26
7.2 Achat du matériel de terrain 27
7.3 Sorties de terrain 27
8. Méthodologie d'évaluation de l'état de conservation de l'habitat 8310 43
8.1 Sélection de l'échantillon 43
8.2 Schéma d'évaluation 44
8.3 Application de la méthodologie d'évaluation aux 5 grottes test 53
9. Agenda du projet 54
10. Annexes 55

Contexte et cadre du rapport

Le Service Public de Wallonie (SPW) a émis en juillet 2021 un Cahier spécial des charges n°03.05.02-18H273 relatif à un marché public de services visant au développement d'une méthode de détermination de l'état de conservation de l'habitat Natura 2000 « Cavités souterraines naturelles » (8310) et de surveillance / suivi en Wallonie dans le cadre du projet LIFE intégré IPE 002 BNIP (soit « marché 8310 » en abrégé). Les 3 partenaires (Ecofirst, MaSePaS et CWEPSS), réunis en groupement d'opérateurs économiques, se sont solidairement engagés à réaliser ce marché 8310, conformément au cahier spécial des charges. L'attribution de ce marché, prévu sur une durée contractuelle totale de 18 mois, a été notifiée en date du 14-12-2021 par le SPW, il prend donc fin en juin 2023.

Le présent document est une mise à jour du rapport final du marché, émis en juin 2023, dont l'objectif était de faire un état des lieux des missions réalisées par les partenaires dans le cadre du marché 8310 depuis sa notification. Cette mise à jour, nommée "rapport post-final_février 2025" contient une série d'éléments supplémentaires, ajoutés dans le rapport final de telle sorte que l'ensemble des éléments et des délivrables soient rassemblés et fournis au SPW de manière claire, synthétique et coordonnée.

1. Base de données de références bibliographiques

1.1 Constitution d'une base de données Zotero et lecture de biblio

Dès le début du projet et tout au long de celui-ci, nous avons activement récolté un maximum d'informations bibliographiques et d'études pertinentes déjà existantes sur le sujet. MaSePaS possédant d'emblée d'importantes ressources bibliographiques référencées, celles-ci ont été rassemblées de façon structurée afin d'être exploitables aisément et facilement partagées entre utilisateurs. Toute la littérature regroupée au cours des 30 dernières années pour l'Atlas du Karst Wallon par la CWEPSS a également été consultée. Les articles concernant l'écologie souterraine et tout relevé sur la faune invertébrée des grottes de Wallonie, lorsqu'ils avaient un intérêt pour le projet, ont été sélectionnés pour être intégrés dans cette liste de références.

Pour organiser et partager cette importante manne d'information, nous avons opté pour la constitution d'une base de données biblio dans 'Zotero', une application multiplateforme et offrant des liens avec le navigateur 'Firefox' (pour importer aisément de nouvelles références issues du web), ainsi qu'avec les éditeurs de textes (MS et LibreOffice). Zotero est en effet le logiciel idéal pour stocker et éditer les références bibliographiques, permettant de classer, annoter, trier, commenter et analyser les documents, tout cela dans le but de faciliter notre synthèse de rédaction. Au vu des différents imports et du stockage important des documents dans Zotero, la capacité de la base de données en sa version gratuite a été rapidement dépassée. Nous avons donc augmenté le compte Zotero à 6 Go (coût annuel de 60 $).

La base de références a été par la suite complétée par les nouvelles entrées progressivement trouvées par l'équipe, dont chaque membre possède les droits d'édition de la collection. Les droits administrateurs de la collection sont localisés à MaSePaS (Nathalie Goffioul).

En date du 03/02/2025, la base de données contient 312 entrées, majoritairement accompagnée d'une version numérique du texte au format PDF. Au fur et à mesure de la complétion de la base bibliographique, un maximum de documents ont été scannés et, dans la mesure du possible, "OCRisés" (reconnaissance automatique des caractères). Étant donné que les articles numérisés sont liés aux références dans la base de données Zotero, il est facile de faire des recherches via Zotero directement dans les textes réunis. L'accès à la base bibliographique Zotero a été étendu au comité d'accompagnement et reste en possession du DEMNA à la fin du projet[1]. Elle constitue un des livrables de notre mission dans le cadre de ce marché. La liste complète des références qu'elle contient en date du 03/02/2025 est fournie en annexe de ce rapport (annexe 1).

Cette base de données contient :

- des articles "généraux" quant aux méthodes d'évaluation du bon état du milieu souterrain et la conservation du milieu souterrain au sens large. Ils ont été sources d'inspiration pour construire le protocole d'évaluation demandé par le SPW en adaptant celui-ci aux réalités et spécificités des grottes de Wallonie.
- des textes et inventaires de la faune des cavités de Wallonie, qui ont été partiellement dépouillés pour constituer la liste faunistique de la biodiversité des cavités wallonnes.
- des thématiques plus spécifiques qui se sont précisées au cours de l'avancement de notre travail. Ainsi, nous avons étendu nos recherches et lectures à des sujets comme le changement climatique, le radon dans les grottes, les types de pollutions, des travaux de recherche (thèse, etc) sur certains groupes taxonomiques souterrains particuliers…

Cette base de données bibliographiques est un excellent outil, transmis dans son entièreté au DEMNA, et qui contient les articles de référence et les données de base pour l'évaluation future de l'état de conservation du milieu (habitat 8310). Il est bien entendu possible pour le DEMNA de continuer à alimenter la base et à y ajouter des articles complémentaires à l'avenir concernant la problématique de la conservation de la biodiversité souterraine.

[1] En date du 03-02-2025, seul Quentin Smits pour le SPW est membre du groupe zotero "Marché 8310". Il pourra inviter d'autres collègues intéressés à rejoindre le groupe le cas échéant.

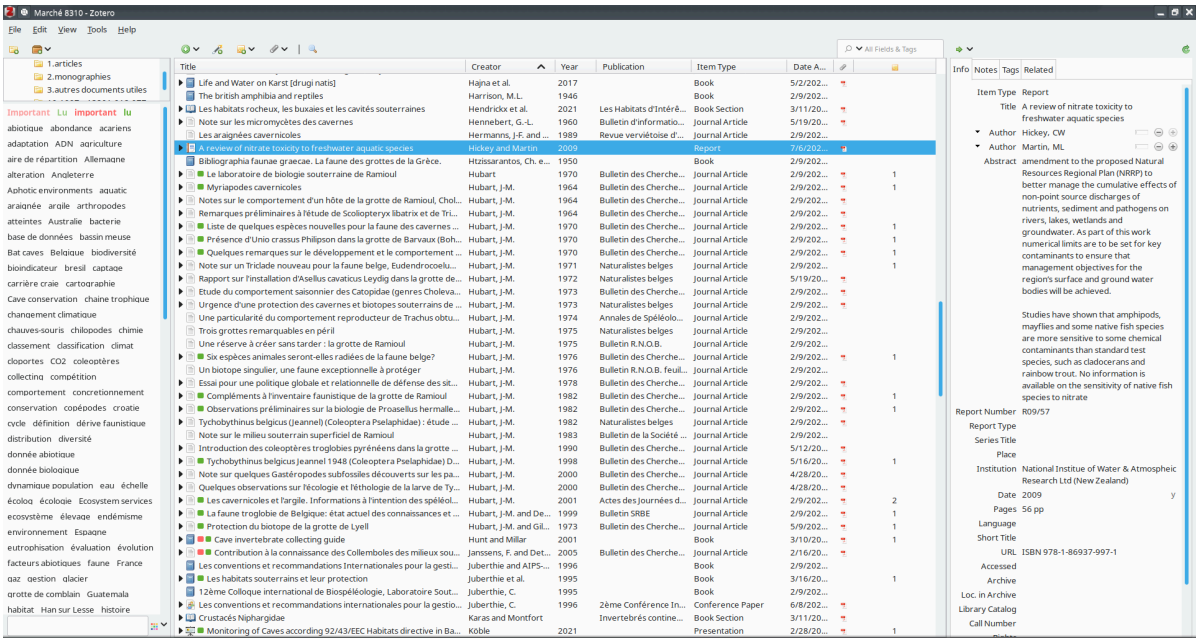


Figure 1. Capture d'écran de la base bibliographique Zotero

Formation à l'usage de Zotero et création de tutoriels

Pour la mise en place de la bibliographie partagée via Zotero, nous avons constitué des documents permettant la prise en main de l'outil. Une marche à suivre a été rédigée (annexe 2) et une vidéo-tutoriel (screencast commenté : https://vimeo.com/730286512) montre de manière vivante les fonctionnalités principales de Zotero.
Si ces outils ont à la base été créés pour un usage interne entre partenaires, ces "tutoriels" doivent permettre aux agents du DEMNA et à tout autre utilisateur de se familiariser avec l'outil et de pouvoir exploiter l'ensemble de ces références dans le cadre de l'évaluation future de cet habitat souterrain en Wallonie.

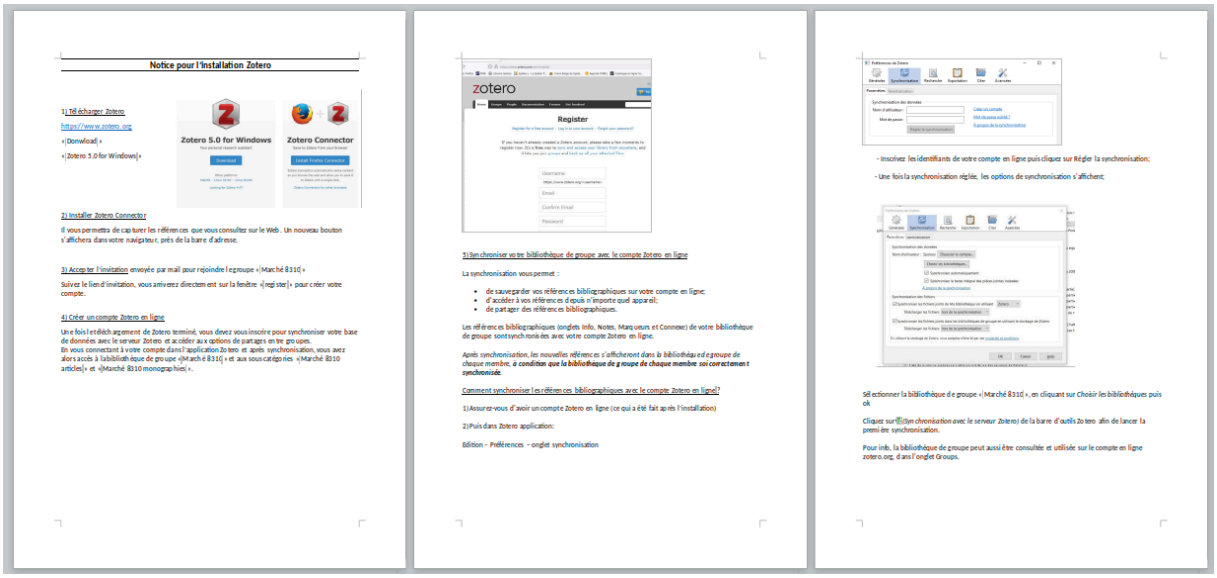


Figure 2. Aperçu du document de prise en main de l'outil Zotero.

Lecture, notes et mots clés (“Tags”)

Après avoir récolté les informations bibliographiques et études pertinentes déjà existantes sur le sujet, un important travail de lecture et de synthèse a été réalisé. Les références rassemblées dans notre base de données bibliographique numérisée ont été accompagnées de notes et de mots-clés. Ceux-ci peuvent ensuite être utilisés pour retrouver facilement des informations, pour trier et/ou pour regrouper des références traitant de sujets concomitants. Les notes prennent la forme d’une fenêtre de texte libre où le lecteur peut écrire ses réflexions, commentaires et questions ainsi qu’y copier-coller des passages de texte. Chaque auteur fait précéder sa note de son nom pour faciliter les échanges entre les membres de l’équipe.

Les mots-clés sont des mots ou des associations de mots jugés pertinents par rapport au contenu de l’article auquel ils se réfèrent. Ils sont utiles en premier lieu pour repérer aisément les articles ‘lu’ ou ‘important’ et ainsi prioriser les efforts de l’équipe pour passer en revue l’ensemble de la collection.
L’autre caractéristique des mots-clés est leur standardisation : les mots sont saisis en minuscule et de préférence en français, les pays et les noms propres sont indiqués avec une majuscule. Dès qu’un nouveau mot-clé est introduit, il autorise l’autocomplétion à partir des premières lettres de ce mot pour des saisies ultérieures. Ceci réduit considérablement le travail et les erreurs. Un travail d’uniformisation a toutefois été régulièrement effectué pour parfaire la cohérence de la liste de mot-clés. Pour définir ces mots-clés, nous sommes partis de questions principales pour l’analyse de l’habitat 8310 : identification et évaluation des paramètres abiotiques et biologiques et lien entre l'état de conservation du milieu et les espèces présentes, critères de “catégorisation” de l’habitat et sous-habitats, méthodes d’échantillonnage pratiquées, identification des menaces, perspectives et recommandations pour la conservation de l’habitat et des espèces, les sources de données (biologiques et abiotiques) pour la Belgique… La liste de tags ainsi définie reprend les concepts principaux pour notre étude.

Les 15 mot-clés le plus fréquents sont : lu (N = 156); Belgique (N = 50); donnée biologique (N = 39); menace (N = 29); climat (N = 28); conservation (N = 28); monitoring (N = 27), abiotique (N = 21); biodiversité (N = 18); eau (N = 17); gestion (N = 16); important (15); environnement (N = 14); stygobie (N = 14); évolution (N = 12); France (N = 12); tourisme (N = 11),...

Figure 3. Wordcloud des mot-clés intégrés dans la base bibliographique Zotero.

2. Monitoring article 17 dans les pays voisins

2.1 Symposium octobre 2021

Du 26 au 30 octobre 2021 s'est tenu le "6th EuroSpeleo Protection Symposium", ayant pour thème "*Assessing, monitoring and protecting cave biotopes and geotopes through Natura 2000 or similar programs in Europe*". Ce symposium était conjointement organisé par la "German Federal Agency for Nature Conservation (BfN)", et la "European Cave Protection Commission (ECPC)" de la "European Speleological Federation (FSE)". Cette conférence était hybride : présentiel à Vilm en Allemagne et online. Quatre personnes de notre équipe ont assisté à ce symposium online, ce qui nous a permis d'identifier des interlocuteurs-clé pour cette thématique en Europe, d'assister aux présentations, de participer aux débats et de récolter des informations pertinentes pour le marché. Les supports de présentation ont été intégrés dans la base biblio Zotero, un résumé des éléments à retenir pour la Belgique ont été réalisés pour chaque présentation.

Nous avons par ailleurs contribué dans la foulée de ce colloque à la rédaction d'un article de synthèse sur les enjeux de l'évaluation de l'état de conservation des habitats souterrains. Voici la référence complète de cet article, qui se trouve par ailleurs dans la base de données Zotero du projet :

Weigand AM, Bücs S-L, Deleva S, Lukić Bilela L, Nyssen P, Paragamian K, Ssymank A, Weigand H, Zakšek V, Zagmajster M, Balázs G, Barjadze S, Bürger K, Burn W, Cailhol D, Decrolière A, Didonna F, Doli A, Drazina T, Dreybrodt J, Đud L, Egri C, Erhard M, Finžgar S, Fröhlich D, Gartrell G, Gazaryan S, Georges M, Godeau J-F, Grunewald R, Gunn J, Hajenga J, Hofmann P, Knight LRFD, Köble H, Kuharic N, Lüthi C, Munteanu CM, Novak R, Ozols D, Petkovic M, Stoch F, Vogel B, Vukovic I, Hall Weberg M, Zaenker C, Zaenker S, Feit U, Thies J-C (2022) **Current cave monitoring practices, their variation and**

recommendations for future improvement in Europe: A synopsis from the 6 EuroSpeleo Protection Symposium. Research Ideas and Outcomes 8: e85859. https://doi.org/10.3897/rio.8.e85859

2.2 Réunions bilatérales

Des contacts ont été pris avec des personnes-clés dans les pays/régions voisins de la Wallonie (France, Allemagne, Luxembourg, Flandre[2]) afin d'organiser une réunion bilatérale avec chacun d'eux. L'objectif de cette réunion était de bien comprendre la méthodologie appliquée dans leur pays / région pour rassembler les données nécessaires au rapportage article 17 et leur manière de procéder pour cette évaluation sur une période de 6 ans : quels paramètres utilisés, quels inventaires/mesures réalisés, quels sites choisir et combien pour tenter d'être représentatif, à qui confier le travail de terrain mais aussi les déterminations biologiques et au final l'estimation du bon état, etc. Nous avons ciblé les régions proches, partant du principe que leur faune souterraine devaient être assez similaires à celles de la Wallonie et qu'ils partageaient également certains enjeux en termes de conservation / menaces.

Des réunions bilatérales ont eu lieu avec la France, le Luxembourg et la Flandre. Les compte-rendus de ces réunions sont fournis en annexe 3 à titre d'information. En ce qui concerne l'Allemagne, vu que leur méthode, détaillée lors du colloque, est très similaire à ce qu'il se fait au Luxembourg et vu le manque de disponibilité des interlocuteurs-clés, nous avons estimé qu'il n'était pas nécessaire de les rencontrer dans ce contexte.

2.3 Travail de synthèse

Ces différents échanges et informations ont alimenté un travail de revue bibliographique critique sur l'état des connaissances dans les régions voisines. Le document qui en résulte s'intitule "***Synthèse des pratiques pour l'évaluation article 17 pour les pays voisins de l'UE***", et est intégré dans la compilation des synthèses bibliographiques en annexe 4 (***Partie 01***).

3. Rédaction de synthèses bibliographiques

Une synthèse bibliographique traitant des différents thèmes d'étude a été réalisée avec, pour chaque sujet, un chapitre théorique général (qui résume la biblio disponible, les différentes techniques existantes, le matériel envisageable) et une description des techniques existantes et des variables que l'on propose de retenir pour la Wallonie ainsi qu'un choix des méthodes pour réaliser les mesures. Nous nous sommes attachés au maximum à tenir compte de la faisabilité de ces investigations, des prérequis scientifiques et du coût qu'elles engendrent comme c'était demandé dans la mission qui nous a été confiée.

Les points suivants détaillent les différents chapitres qui constituent cette synthèse bibliographique, fournie en annexe 4.

[2] *Les Pays-Bas ont volontairement été omis de la liste vu l'absence de grottes dans ce pays.*

3.1 Description générale du milieu souterrain

La synthèse théorique de cette section traite des éléments suivants :

- Critères pour définir ce qu'on considère comme une grotte et qui corresponde à l'habitat 8310, méthodologie de calcul de surface, de longueur, ainsi que la manière d'obtenir l'*area* et le *range* (dans le contexte du rapportage article 17 de la directive habitats Natura 2000). Il faut toutefois noter que ces concepts, utilisés pour l'ensemble des habitats N2000, s'appliquent très mal au milieu souterrain.
- Description de l'habitat, catégorisation des micro-biotopes et des substrats, y compris les zones avec/sans eau, eau permanente/temporaire
- Relation hypogée/épigée tant au niveau de la faune qu'au niveau de l'eau
- des ressources alimentaires pour la faune, absence de producteurs primaires, chaîne trophique et "compétition" pour ces ressources

Cette synthèse constitue la ***Partie 02***, intitulée "***Description générale du milieu souterrain***", de la compilation des synthèses bibliographiques en annexe 4.

3.2 Variables abiotiques à suivre pour caractériser le bon état des habitats souterrains

Ce chapitre aborde les points suivants :

- La température : variable essentielle du climat souterrain,
- Évaluation de la qualité des eaux souterraines au travers de plusieurs variables physico-chimiques (température de l'eau, conductivité, turbidité, pH, oxygène, azote, présence de matière organique…). Estimation des effets possibles sur les organismes,
- Présence et impacts de micropolluants et aspects bactériologiques (en particulier dans l'eau),
- Les paramètres à analyser dans l'air en grotte : température (différence avec l'extérieur et en différents points de la cavité) quantification des taux de CO_2 / CO / radon / oxygène / et autres gaz atmosphériques.

Ont ainsi été retenues comme variables à monitorer en priorité :

- La température
- La conductivité
- La concentration en oxygène dissous
- La concentration en nitrates
- La présence de colonies de bactéries
- Les concentrations en O_2, CO, CO_2 et H_2S

Les différentes méthodes d'analyse et leurs applications sont justifiées et commentées dans notre synthèse bibliographique. Cette synthèse constitue la ***Partie 03***, intitulée "***Variables abiotiques à suivre pour caractériser le bon état des habitats souterrains***", de la compilation des synthèses bibliographiques en annexe 4.

3.3 Paramètres biotiques à suivre pour caractériser le bon état des habitats souterrains

Vu l'ampleur de la biblio sur le sujet, la diversité des méthodes et l'importante complexité des questions d'inventaires, identification et valorisation de résultats pour l'étude de la faune des grottes, la rédaction de ce chapitre s'est non seulement basée sur la littérature, mais également sur des entretiens avec différents experts dans le domaine.

Préalablement à la rédaction d'un texte de synthèse, nous avons travaillé à la constitution d'une base de données biologique (voir point 4), l'établissement d'une liste taxonomique la plus exhaustive possible.

Le texte de synthèse traite des aspects suivants :

- Groupes taxonomiques à inventorier en priorité, en fonction de leur degré de dépendance au milieu souterrain et de la capacité d'identification, espèces "indicatrices", …
- Techniques d'échantillonnage et de prélèvement sous terre, fréquence saisonnière, discussion des risques représentés par le sur-prélèvement et les pièges à appâts, méthodes de conservation, …
- Identification des taxons observés, jusqu'à quel degré de précision (ordre, famille, espèce… voire sous-espèce), avec quelle méthodologie d'identification : morphologique (avec quelles références), génétique (barcoding, metabacoding, eDNA...)
- Méthode de "mesure" des paramètres biotiques : quantification, présence/absence, indices, …
- Notion de chaîne trophique
- Notion d'indice de biodiversité et méthodologie de calcul

Cette synthèse constitue la ***Partie 04***, intitulée "***Variables biotiques à suivre pour caractériser le bon état des habitats souterrains***", de la compilation des synthèses bibliographiques en annexe 4.

3.4 Menaces et mesures de protection

Ce chapitre aborde les points suivants :

- La destruction directe des cavités (carrières, travaux d'infrastructure, assèchement par exploitation hydraulique…).
- Les habitats souterrains ne sont pas des systèmes fermés, ils interagissent avec le milieu en surface via des échanges d'énergie, de matière minérale et organique, d'eau et même d'organismes vivants. De ce fait, les activités en surface ont des impacts indirects sur la cavité et sa biodiversité. En termes de menaces, il faut être attentif à toute activité anthropique pouvant entraîner une pollution concentrée ou diffuse vers le sous-sol, une modification de l'hydrologie, de l'imperméabilisation des sols, de l'apport en matière organique...).
- La surfréquentation des cavités (par des spéléologues notamment) a longtemps été considérée comme la menace principale pesant sur le milieu souterrain. Si cette analyse peut avoir un certain sens dans des karsts

montagneux et isolés où l'impact de l'activité en surface est négligeable, c'est très réducteur d'adopter cette approche aux zones calcaires de Wallonie fortement impactées par une diversité d'activités anthropiques.

- La présence d'espèces « invasives » dans le milieu souterrain et/ou qui ne se retrouvent sous terre qu'accidentellement et qui peuvent dans certaines circonstances entrer en concurrence avec les espèces troglobies - troglophiles.
- Les changements climatiques constituent une menace majeure pour la biodiversité et les habitats naturels. Une hausse des températures dans le milieu souterrain accompagné d'un assèchement aurait des conséquences potentiellement irréversibles sur la faune qui y est inféodée. Par ailleurs, on constate que dans l'atmosphère des grottes, les concentrations en CO_2 peuvent être 10 à 100 x supérieures que dans l'air extérieur. Comprendre et intégrer les processus à l'origine de cette sur-concentration souterraine est nécessaire pour une gestion intégrée des gaz à effet de serre et de leurs effets sur le climat.

Cette partie théorique liste les différentes menaces qui peuvent impacter la biodiversité spécifique ou les paramètres abiotiques du site. Nous avons appliqué une analyse des risques et menaces aux 5 cavités-test via un travail de caractérisation réalisé à l'échelle du bassin d'alimentation[3] de chaque grotte (voir point 6). La méthode semi-quantitative proposée mériterait d'être affinée, mais elle offre la possibilité d'intégrer la pression anthropique et la vulnérabilité à différentes cavités en se basant essentiellement sur des données cartographiques et une application via web-GIS.

Cette synthèse constitue la ***Partie 05***, intitulée "***État du milieu souterrain en Wallonie : menaces et mesures de protection***", de la compilation des synthèses bibliographiques en annexe 4.

4. Base de données biologiques

4.1 Création d'une liste taxonomique complète

Un dictionnaire de référence des espèces (potentiellement) cavernicoles belges a été élaboré sur base de différentes sources : la BD PASCALIS (espèces aquatiques), la liste des espèces troglobies de Belgique (provenant de la liste compilée par les chercheurs de la Wallonie) et la liste allemande des espèces cavernicoles (qui est aussi celle utilisée au Grand-Duché de Luxembourg); partant de l'hypothèse qu'une part non négligeable des espèces belges figurent dans l'inventaire allemand (proximité). Le travail réalisé a été de concaténer ces 3 listes pour éliminer les doublons en tenant compte des synonymies et modifications de la taxonomie au cours du temps, puis d'ajouter une série d'espèces supplémentaires lors de l'encodage des données issues de la littérature. La référence utilisée est la nomenclature française TaxRef de l'INPN (Inventaire national du patrimoine naturel, en France), www.gbif.org et www.marinespecies.org pour les espèces aquatiques. La liste actuelle contient près de 1100 taxons uniques. Pour chacun d'eux, les grands niveaux de la taxonomie (phylum, classe, ordre, famille) sont complétés. On y précise également, lorsqu'il est connu,

[3] Le bassin d'alimentation doit devenir l'unité de gestion et de protection des sites souterrains, en particulier lorsqu'ils contiennent des habitats aquatiques.

le caractère troglo/stygobie, troglo/stygophile et subtroglophile/trogloxène. La liste contient également la provenance de chaque taxon (source). Cette liste taxonomique constitue une bonne base de travail et de référence, il s'agit d'un livrable important de notre mission dans le cadre de ce marché. Elle est présentée en annexe 5.

4.2 Création d'une base de données biologiques structurée

Les partenaires ont pris contact avec Yvan Barbier au DEMNA pour s'assurer que la base de données produite dans le cadre du présent marché soit compatible avec les bases de données du SPW. Une sélection des champs utiles pour les données souterraines a été effectuée et discutée avec Y. Barbier pour s'assurer du format obligatoire à leur donner. Dans certains cas, les champs sont limités à un choix dans des valeurs prédéfinies listées en menu déroulant. Nous nous sommes assurés qu'il était possible d'ajouter des valeurs à ces dictionnaires de référence pour répondre à nos besoins. Ces dictionnaires ont été créés sur base des dictionnaires existants.

La structure générale de la base de données correspond à celle de DataFaunaFlora (DFF), similaire en tout point à celle du portail d'encodage de l'Observatoire Faune Flore et Habitats (OFFH). Cette base de données est articulée en trois tables interconnectées : *stat* [station], *cond* [condition] et *spec* [espèce].

À chaque **station** (localisation géographique), peu.ven.t être associée.s **une ou plusieurs condition.s** (date des observations, méthode utilisée, lieu de récolte), auxquelles sont associée.s **une ou plusieurs espèces** observées.

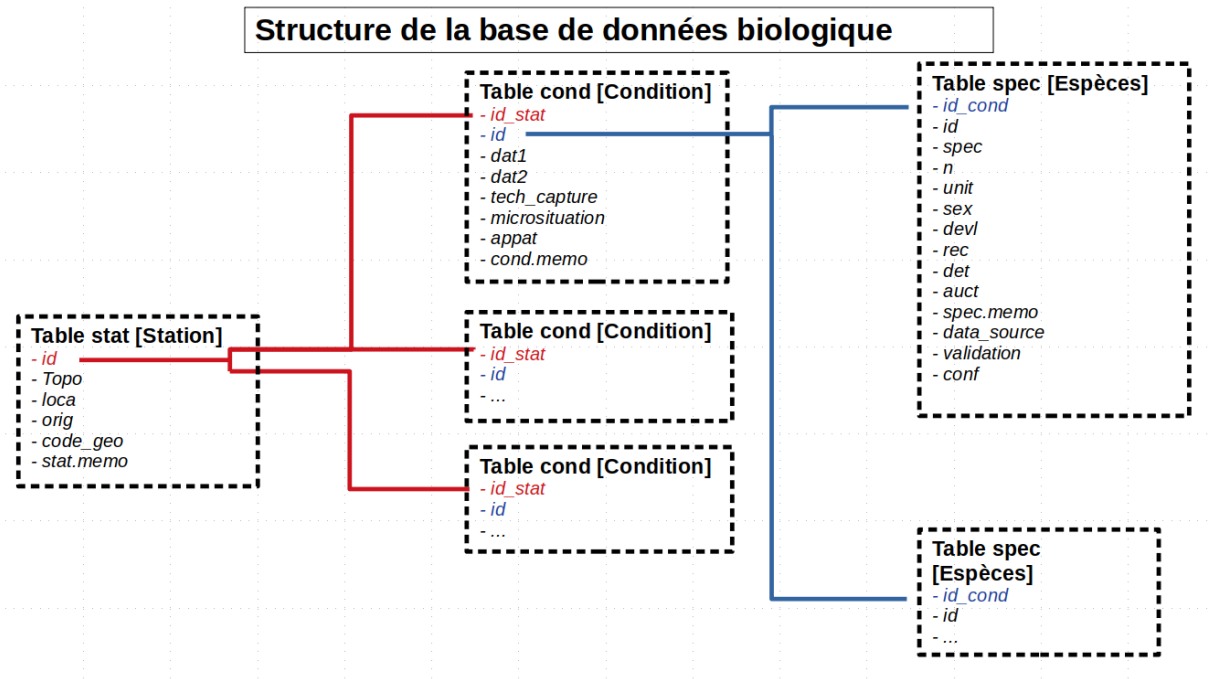


Figure 4. Structure de la base de données biologique. Celle-ci correspond strictement à la structure des systèmes d'encodage en ligne (OFFH) et en local (DFF) du SPW.

Metadonnées des champs sélectionnés

Table stat :

- topo : nom du site
- loca : localité
- orig : coordonnées XY (datum Lambert 72)
- code_geo : code de l'Atlas du Karst Wallon
- stat.memo : toute autre info utile sur le site, qui ne se trouverait pas dans l'Atlas du Karst Wallon

Table cond :

- dat1 : date de début d'inventaire (par exemple date de la pose du piège)
- dat2 : date de fin d'inventaire / date d'inventaire (si c'est un seul jour ou observation ponctuelle)
- tech_capture : technique de capture / d'observation, sur base d'un dictionnaire pré-défini
- microsituation : sur base d'un dictionnaire pré-défini, par exemple guano, eau (compartiments à subdiviser), cadavre, racines, paroi, zone d'entrée (avec lumière), etc.
- cond.memo : référence bibliographique d'où vient l'information + toute autre info utile sur la condition d'observation (y compris les mesures de température, humidité, la localisation précise du piège à l'intérieur du site, etc).
- appa : champ préexistant dans DFF, destiné à encoder l'usage éventuel d'appâts.

Table spec :

- spec.taxprio : espèce (sur base du dictionnaire d'espèces)
- n : nombre
- unit : unité (sur base d'un dictionnaire pré-défini)
- sex : sexe (sur base d'un dictionnaire pré-défini)
- devl : stade (sur base d'un dictionnaire pré-défini)
- rec : récolteur - une seule personne, celle qui a récolté l'individu ou l'a observé, avec un format standardisé, par exemple Nyssen P ou Godeau JF
- det : déterminateur - celui ou ceux qui a.ont déterminé l'espèce, avec un format standardisé, par exemple Nyssen P ou Godeau JF
- auct : auteur - celui qui encode la donnée
- spec.memo : toute autre info utile sur l'observation précise. On mettra ici l'info si identification sur base d'analyse ADN.
- data_source : nom de l'institution/organisation (champs alpha de longueur 10)
- validation : valeurs dans un dico (sur base d'un dictionnaire pré-défini)
- conf : niveau de confidentialité (3-4-5, cf. codification existante)

4.3 Recherche de données biologiques pré-existantes

Malgré que ce point ne fasse pas partie des attentes explicites du cahier des charges du marché 8310, il est très vite apparu nécessaire de mener un travail de recherche des données existantes pour la faune souterraine. En effet, ceci est une étape indispensable à l'évaluation de la faune potentiellement rencontrée dans nos grottes wallonnes, à l'identification des naturalistes ou chercheurs qui s'intéressent (se sont intéressés) à l'étude de certains taxons observables en grotte, et enfin à la constitution d'une base de données pouvant alimenter un certain état de référence en matière de faune souterraine dans les sites les mieux prospectés historiquement.
Sans une telle liste, il sera par ailleurs impossible d'établir si des espèces, connues préalablement, ont disparu du territoire et/ou si l'état général de la biodiversité souterraine s'améliore ou se détériore en Wallonie

Des contacts ont été pris avec différentes structures en possession de données biologiques (hors chiroptères) pour identifier les éventuels jeux de données pré-existants :

- **IRSNB** :
    - contacts avec W. Deconinck : pas de jeu de données “tout fait” existant pour le milieu souterrain, mais possibilité de contribuer via la mise à disposition d’étudiants pour du traitement préférentiel de matériel de collection.
    - contacts avec P. Martin pour récupérer les données du projet PASCALIS (2001-2004). Ces données, intégralement transmises, ont été reformatées pour les besoins du projet et ont été importées dans la base de données biologiques (cf point 4.2).
    - contacts avec différentes personnes (S. Verheyden, Y. Samyn, …) pour tenter de trouver une version informatiquement exploitable des données de Leruth, 1939 (sans succès).
- **GBIF** : recherches / requêtes sur le portail web. Aucun jeu de données “cavernicole” n’est clairement identifié pour la Belgique.
- **DEMNA** et **Natagora** : contacts avec Y. Barbier pour les données OFFH et JY. Paquet pour les données *www.observations.be* : aucun jeu de données “cavernicole” n’est disponible en l’état. Une requête a été réalisée des deux côtés pour évaluer le nombre de données disponibles pour les taxons de la liste taxonomique - première version. On voit que sur 350 espèces présentes dans la liste taxonomique fournie, il existe des données dans un de ces deux portails pour seulement 100 espèces (moins de 30%). Lorsqu’on regarde le degré de liaison au milieu souterrain des espèces pour lesquelles des données existent (voir tableau 1), on constate que la majorité des données provient d’espèces non liées au milieu souterrain ou trogloxènes. Les mammifères (chauves-souris, castor, blaireau, renard), les papillons (petite tortue) et les amphibiens (grenouille rousse et crapaud commun surtout, triton alpestre et salamandre plus ponctuellement) rassemblent l’essentiel des données disponibles. Or ces espèces sont très peu (voire pas du tout) indicatrices de l’état de conservation des grottes et les données encodées ne proviennent vraisemblablement pas (ou seulement très ponctuellement) du milieu souterrain. Très très peu de données sont disponibles pour les espèces troglobies (7 données en tout pour 3 espèces d’amphipodes aquatiques !) et dans les groupes taxonomiques a priori les plus indicateurs du milieu souterrain tels que les collemboles, acariens, les amphipodes et isopodes (crustacés terrestres comme les cloportes et aquatiques comme les niphargus), les mille-pattes (chilopodes et diplopodes), …
  Cette brève analyse des données disponibles dans le portail OFFH et observations.be nous confirme que quasi aucune donnée n’existe à l’heure actuelle sur la faune des grottes dans ces bases de données.

Groupe taxonomique	nombre d'espèces (total = 101)				nombre de données Obs.be (total = 94792)				nombre de données OFFH (total = 194114)			
/ lien au milieu souterrain	à priori aucun	troglobie	troglophile	trogloxène	à priori aucun	troglobie	troglophile	trogloxène	à priori aucun	troglobie	troglophile	trogloxène
Acari	2				8							
Annelida			1				11					
Araneae	2		8		23		660				55	
Archaeognatha	1				59				13			
Plathelminthes	2		1						20		2	
Bivalvia	5		1		208				241		4	
Collembola	1		4		1		39					
Chilopoda - Diplopoda	2		4				515		6		44	
Gastropoda	8		2	2	1475		480	2027	4253		111	806
Glomerida			1				737				83	
Isopoda	1		5	1			3653	560	15		1515	104
Amphipoda	1	3	2						43	7	870	
Lepidoptera				1				37388				40556
Coleoptera	4		3		3		18		10		1	
Diptera				1				215				9
Heteroptera	1				2				5			
Amphibia			1	3				18804			20	33520
Chiroptera	3			21	645			4227	1768			50139
Mammalia (non Chiroptera)	1			2	4802			18232	10376			49518
Total	34	3	33	31	7226		6113	81453	16750	7	2705	174652

Tableau 1. Analyse des données disponibles dans les portails observations.be et OFFH pour les taxons potentiellement rencontrés en grotte

4.4 Encodage des données de la littérature

Vu l'absence de données encodées accessibles (voir point 4.3), après avoir en vain tenté d'obtenir des données pré-encodées auprès de toutes les personnes, structures et institutions qui auraient potentiellement pu collationner des jeux de données informatiques, nous avons entamé un travail conséquent d'encodage des données existant dans la littérature, dans la structure de base de données construite à dessein (cf point 4.2).

Les ouvrages de biblio qui font état de données biologiques précises (càd comportant au moins une date ou une période de temps courte + une espèce + un site situé en Belgique) ont été tagués dans Zotero. Un travail conséquent d'encodage des données existantes a ensuite été mené pour aboutir à une base de données qui contient en fin de projet environ 2190 données dans la table *spec* [espèce] pour 500 taxons différents, environ 615 entrées dans la table *cond* [condition] et 281 sites dans la table *stat* [station]. Ces sites sont à la fois des grottes qui représentent l'habitat 8310 sensu stricto, mais sont également, selon les références, d'autres types d'habitats souterrains (milieu artificiel, tel des carrières, résurgences, etc). La base de données biologiques est transmise en annexe 6. L'encodage a également nécessité l'ajout d'une série d'espèces dans la base de référence taxonomique préalablement compilée.

Les données détaillées issues des jeux de données, articles ou références biblio suivants ont été encodées :

- données du projet PASCALIS
- Baert, L., Ransy, M., Dethier, M., 2009. Les araignées cavernicoles de Belgique. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 48, 5–16.
- Bareth, C., Dethier, M., 2009. Les Diploures Campodéidés de Belgique. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 17–24.
- Dethier, M., Depasse, J., 2007. La faune invertébrée des grottes de Neptune (anciennement Adugeoir et du Pont d'Avignon (province de namur, Belgique). Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 97–108.

- Dethier, M., Hubart, J-M., 2003. Nouvelles récoltes et observations concernant la faune souterraine de Wallonie. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 42, 45–56.
- Hubart, J-M., 1970. Liste de quelques espèces nouvelles pour la faune des cavernes de Belgique. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 199–206.
- Hubart, J-M., 1970. Quelques remarques sur le développement et le comportement d'*Anthophagus bicornis*. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 215–220.
- Hubart, J-M., 1970. Présence d'*Unio crassus* Philipson dans la grotte de Barvaux (Bohon). Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 207–214.
- Hubart, J-M., 1982. Compléments à l'inventaire faunistique de la grotte de Ramioul. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 341–345.
- Hubart, J-M., 1982. *Tychobythinus belgicus* (Jeannel) (Coleoptera Pselaphidae) : étude et protection du biotope, nouvelles données écologiques. Naturalistes belges 185–199.
- Hubart, J-M., 1998. *Tychobythinus belgicus* Jeannel 1948 (Coleoptera Pselaphidae) Découverte d'une nouvelle station. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 38, 89–92.
- Hubart, J-M., Dethier, M., 1999. La faune troglobie de Belgique: état actuel des connaissances et perspectives. Bulletin SRBE 164–178.
- Janssens, F., Dethier, M., 2005. Contribution à la connaissance des Collemboles des milieux souterrains de Belgique. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 145–165.
- Leclercq, J., 1957. Etude biopspéléologique Fonds de Forêt. Bulletin d'Information de la Commission de Topographie et de Toponymie 2–9.
- Thieren, Y., Dethier, M., 2006. Les coléoptères Leiodidae des grottes de Ramioul (commune de Flemalle, province de Liège). Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 117–127.

Tous ces articles ont, dans le groupe Zotero Marché 8310, une note associée qui précise de statut de l'encodage ("OK fini"). D'autres articles qui contiennent des données biologiques pour les grottes de Belgique portent une note "à encoder" ou une explication sur l'absence de données "encodables".

Ce travail devra être poursuivi par le DEMNA et/ou le DNF après la fin de notre mission. En effet, d'autres sources de données importantes ont été identifiées, mais ce travail, très consommateur en temps, dépassait de loin nos possibilités dans le cadre de ce marché. Les données biologiques concernant les 5 sites tests ont été encodées en priorité, conformément aux souhaits du comité d'accompagnement.

Un des ouvrages les plus anciens, mais aussi les plus riches en données, concernant l'étude de la faune souterraine belge est le livre de Leruth : **Leruth, R., 1939. La biologie du domaine souterrain et la faune cavernicole de la Belgique. Musée royal d'histoire naturelle de Belgique, Bruxelles, Belgique.** Cet ouvrage contient des centaines de pages d'observations réalisées dans une cinquantaine de sites souterrains (naturels et artificiels) wallons dans les années 1930 et constitue à ce titre une référence très précieuse dans le contexte d'une évaluation de l'évolution à long terme de la richesse spécifique de notre milieu souterrain. Une liste des sites concernés par l'ouvrage de Leruth a été établie afin d'évaluer sa couverture géographique. Cette liste est fournie en annexe 7. L'encodage des données contenues dans ce livre pose question, vu l'ampleur du travail requis. Seules les données qui proviennent des sites test du présent marché, à savoir la grotte de Lyell et la grotte de Bohon ont été encodées (sachant que cet ouvrage ne traite pas des 3 autres sites).

Les autres principales ressources à encoder, actuellement identifiées, sont :

- Les données de la collection Delhez : Dethier, M., 1998. Collection Delhez-Catalogue provisoire. Bulletin des Chercheurs de la Wallonie 38, 33–76.

- Les données de la thèse de X. Ducarme sur les acariens : Ducarme, X., 2004. Survey of mites in caves and deep soil and evolution of mites in these habitats. Canadian journal of Zoology 8: 841-850. (et données annexes)
- Quelques articles ponctuels, notamment : Fiers, F., 2005. A new species of the genus Speocyclops (Crustacea, Copepoda, Cyclopoida) from the Han-sur-Lesse Cave, a well known and popular cavern, in southeastern Belgium. Biologie : bulletin de l'Institut royal des Sciences naturelles de Belgique 111–118.
- Les données issues des travaux plus récents (et encore en cours) sur les Amphipodes réalisés par l'équipe de l'ULB (Dieter Weber, Claire Chauveau, Jean-François Flot, …). Une prise de contact avec cette équipe pour récupérer l'ensemble des données en leur possession serait probablement judicieux.

4.5 Rencontre avec des experts actifs dans le domaine

Afin d'améliorer nos connaissances et de discuter des différentes possibilités, nous avons rencontré différentes personnes au cours de plusieurs réunions :

- rencontre avec **Michel Dethier** pour discuter de sa vision sur les espèces à suivre, les possibilités d'identification morphologiques, les références, etc. En effet, historiquement, quelques personnes et institutions ont travaillé de manière approfondie sur la biospéologie en Belgique (Leruth † dans les années 1930, les Chercheurs de la Wallonie à partir 1950 - F. Delhez †, M. Dethier, JM. Hubart † principalement). Nous avons contacté et rencontré M. Dethier (le seul encore accessible aujourd'hui) pour tenter de rassembler toutes les données disponibles (y compris en termes de biblio) et bénéficier de sa vision sur les méthodologies à mettre en place dans le contexte de l'évaluation de l'état de conservation du milieu souterrain wallon.
- rencontre avec l'équipe de génétique de l'**ULB** (Département de Biologie des Organismes - Unité de recherche Evolutionary Biology and Ecology) spécialisée dans l'étude du milieu souterrain et en particulier ses crustacés aquatiques (JF. Flot, C. Chauveau, D. Weber) pour évaluer la possibilité d'une collaboration pour tester l'apport d'une analyse ADN comme outil de détermination des organismes cavernicoles et pour mieux caractériser leur lignée et leur statut troglobie (priorité en termes de conservation).
- 2 rencontres avec Johan Michaux (équipe génétique de l'**ULg**) pour évaluer la possibilité d'une collaboration pour les analyses ADN, discuter de protocole et affiner les moyens à mettre en œuvre et les possibilités d'utiliser les techniques de barcoding pour contribuer à l'évaluation de l'état de conservation du milieu souterrain.

4.6 Stage de biospéologie

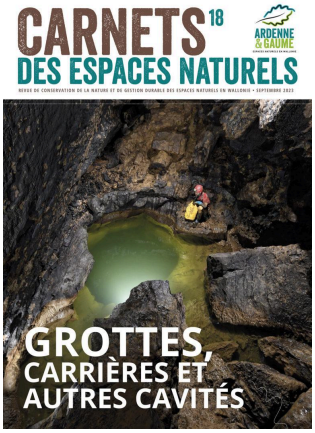
Un stage de biospéologie a été organisé en novembre 2021 par l'Union Belge de Spéléologie, en collaboration avec la commission scientifique de la Fédération Française de Spéléologie. Ce stage, encadré par un couple de spécialistes dans le domaine (J. et B. Lips) a été l'occasion pour 2 membres de l'équipe des partenaires de se former aux techniques de capture, de prélèvement et d'identification. La grotte d'Eprave et la Grotte du Fayt (toutes deux à Rochefort) ont été échantillonnées dans ce contexte.

Les données récoltées dans ce contexte ont été encodées sur la plateforme iNaturalist en vue de tester la possibilité d'identification par des pairs sur base de photos. La conclusion de ce petit test est que, dans la plupart des cas, sans avoir accès à l'échantillon, l'identification sur base photographique ne peut se faire à l'espèce, elle reste à un niveau taxonomique supra-spécifique.

Certains échantillons collectés ont par ailleurs été identifiés sur base morphologique par différents spécialistes, soit via J. Lips, soit via nos soins (le matériel biologique collecté avait été réparti entre nous au moment du stage). Les données de ces inventaires ont été mises à jour selon les identifications réalisées (sur iNaturalist et/ou via les experts consultés).

4.7 Contribution à des ouvrages de référence et communication

À titre d'information, MaSePaS, a édité avec d'autres structures, en fin d'année 2022, le livre de Dethier M. et Rochez, G. intitulé ***Biospéologie - Initiation à l'étude de la faune cavernicole de Belgique***. Ce livre est un ouvrage de vulgarisation sur l'étude de la faune souterraine, particulièrement intéressant dans le contexte de ce marché car il pose un cadre clair et rend cette discipline plus attractive.



Par ailleurs, les partenaires du projet ont coordonné et contribué à la rédaction du numéro 18 des **Carnets des Espaces Naturels** (revue éditée par Ardenne et Gaume) sur le thème du milieu souterrain : *Grottes, Carrières et Autres cavités*. Ce numéro a été édité en fin d'année 2023 et il contient une série d'articles de synthèse et de vulgarisation qui nous semblent également utiles de transmettre en guise de délivrables de cette mission. Cette revue est fournie en annexe 8.

5. Étude des sites

5.1 Choix des sites représentatifs

5.1.1. Introduction

Une phase test a été menée sur 5 cavités dans le cadre de ce marché avec pour objectif non pas de collecter le plus grand nombre d'espèces, mais bien de vérifier que le protocole proposé pour déterminer le bon état de conservation du milieu souterrain est "applicable" (praticabilité et aspect coût/bénéfice). Cette phase concerne à la fois les relevés biologiques (inventaire de la biodiversité des invertébrés, technique d'échantillonnage, processus de détermination, diversité des micro-habitats…) et les paramètres abiotiques du milieu souterrain, ainsi que le relevé des menaces tant en surface que sous terre.

Pour que notre test soit probant, notre choix des 5 cavités a été réalisé de telle sorte qu'elles soient représentatives de la diversité des grottes wallonnes (et donc pas seulement se

focaliser sur des grands réseaux et/ou des sites où une biodiversité initiale est déjà bien connue). Nous avons listé une quinzaine de critères (voir tableau présenté en annexe 9) permettant de garantir cette diversité dans les cavités tout en intégrant une large gamme d'éléments et qui peuvent avoir une influence sur leur richesse biologique et leur bon état de conservation. C'est en appliquant ces critères à un ensemble de cavités que nous avons arrêté notre choix pour les 5 grottes-test.

5.1.2. Critères de choix (et caractérisation) pour sélectionner les 5 grottes-test

A. **Développement** : cavité présentant un développement important (notamment pour disposer d'une diversité de sous-habitats) vs. cavité plus réduite en développement
B. **Présence d'eau** : cavité aquatique (présence d'un regard sur la nappe, gours et percolation active, rivière souterraine, zone temporairement sous eau -crues-) vs. grotte plus sèche
C. **Statut** : cavité disposant d'un statut de protection (Natura 2000 par ex. ou Réserve Naturelle Domaniale, Cavité Souterraine d'Intérêt Scientifique) vs. grotte sans statut particulier
D. **Fermeture** : grotte fermée (présence d'une porte ou d'une grille empêchant l'accès au réseau) vs. cavité laissée en libre accès
E. **Technicité du point de vue spéléo** : degré de difficulté pour pouvoir y accéder et/ou la visiter (3 classes prévues), nécessité de l'usage d'une corde pour pouvoir tester la descente du matériel de mesure et la réalisation des relevés sous terre en conditions difficiles
F. **Paysage :** sélection de sites sous des occupations du sol différentes (impact anthropique et menace +/- diffuse liée à de possibles pollutions, bassins forestiers vs. urbanisé vs. agricole vs. pompage ou carrière)
G. **Infos biologiques existantes** : site disposant de données biologiques historiques (Leruth / Dethier / Hubart / PASCALIS / …) vs. site sans "histoire biospéléologique"
H. **Fréquentation** : cavité faisant l'objet d'une gestion stricte des accès (très faible fréquentation) vs. grotte nettement plus fréquentée[4] (grotte-école de l'UBS, accessible aux tours opérateurs)
I. **Proximité de la surface** : cavité très superficielle (proche de la surface) vs. grotte s'enfonçant plus profondément dans un massif (avec épaisseur de calcaire plus importante par rapport à la surface - effet de filtre et rôle de l'épikarst et apports trophiques)
J. **Données chauves-souris** : sélection de grottes pour lesquelles on dispose de connaissances chiroptérologiques variées; mise en évidence de communautés guanophile et intérêt de suivre des sites déjà étudiés du point de vue chiroptérologique
K. **Géologie :** sélection de cavités situées dans des contextes géologiques différents (dévonien vs. carbonifère)

Enfin, on a veillé à une certaine distribution géographique pour que les cavités choisies soient réparties entre les grands massifs karstiques de Wallonie et ne proviennent pas toutes du même bassin d'alimentation.

[4] *Ce critère n'est pas redondant avec la notion de fermeture. Des grottes fermées peuvent être assez fortement fréquentées (comme par exemple la grotte Sainte Anne).*

5.1.3. Proposition de cavités pour faire partie de la sélection des 5 cavités-test

Le tableau présenté en annexe 9 évalue, pour un ensemble de 18 cavités envisagées, la manière dont ils se répartissent selon les critères de sélection listés ci-dessus. Cette évaluation a permis de choisir les 5 sites-test décrits ci-dessous.

1. Trou d'Haquin (534-009) à Assesse. Vaste chantoir en bout de vallée aveugle, donnant accès à une importante grotte. Deux réseaux concrétionnés, plusieurs ruisseaux souterrains, cascades, siphons, grandes salles, etc. Développement total = 1954 m. Des prolongements ont été découverts dans les éboulis en 1996 et par la suite par divers groupes de spéléologues. Les recherches, explorations et une "re-topographie" complète (par le GRPS) sont en cours depuis 2018. Les eaux resurgissent à Chauvaux (534-021), la relation a été vérifiée par traçage à la fluorescéine (Coppenolle) et au réseau de Frênes (traçage SSN 1979). Les traçages du Fond d'Hestroy ont été refaits et quantifiés précisément par l'UNamur en 2018.

Cette cavité est fermée par une porte (cadenas UBS), sa fréquentation est assez importante (grotte-école). La cavité est vaste et certains réseaux ne sont quasi jamais visités contrairement au parcours classique. De ce fait, cette grotte présente la possibilité de différencier l'impact des visites au sein de la même grotte.

2. Grotte de Lyell (418-014) à Engis. Grotte subhorizontale à 4 entrées et 2 étages - vaste galerie de 90 m - avec un étage inférieur boueux et humide (couloir de 60 m). Il s'agit d'un important gisement ossifère du quaternaire (ours des cavernes). Développement total = 335 m. En 2006, les chercheurs de la Wallonie publient (Regards n°62) une liste actualisée de la faune de la grotte (90 espèces dont 9 troglobies). Cette cavité est fermée et dispose du statut de site classé, son accès est très réglementé et très rare. On note la présence d'une vaste carrière à proximité. Ce site est considéré comme une des cavités les plus intéressantes de Wallonie du point de vue biologique, avec notamment la présence d'une espèce troglobie endémique (le coléoptère *Tychobythinus belgicus*). Elle a d'ailleurs fait l'objet de nombreux inventaires biologiques par le passé.

3. Grotte de Bohon (551-013) à Durbuy. Grotte subhorizontale à deux étages, de près de 600 m de développement. L'étage inférieur est parcouru par un bras souterrain de l'Ourthe en provenance des pertes (551-010, L21), avec plan d'eau terminal siphonnant ("lac"). Elle est constituée d'un grand porche d'entrée (15 x 5 m) et d'une vaste galerie (longueur 75 m, largeur 6 m) où coule l'Ourthe souterraine. Le développement renseigné par la topo de Naveau donne 589 m (et semble un peu excessif). Malgré ses multiples statuts de protection, la cavité a été longtemps exploitée commercialement et surfréquentée (visite par des tours opérateurs et sport aventure). Depuis 2010, le placement d'une nouvelle grille à l'entrée et la gestion très stricte imposée par le DNF (la grotte dispose du statut de CSIS) ont rendu sa quiétude au site. Il s'agit d'un cas intéressant pour mesurer la régénérescence d'une cavité (notamment du point de vue biologique) après une période de forte fréquentation / perturbation.

Le méandre de l'Ourthe recoupé souterrainement par la cavité est essentiellement forestier avec quelques zones de pâtures. La cavité peut par contre être directement influencée par la qualité de la rivière dont un bras la traverse. La présence de nombreux campings en amont et la gestion de leurs eaux usées mérite d'être pris en compte.

4. Grotte des Collemboles (492-147) à Comblain-au-Pont. Galerie horizontale creusée dans un joint de stratification vertical, avec quelques cheminées remontantes dont une qui rejoint un petit réseau supérieur. La nappe d'eau se situe en contrebas avec une connexion probable (mais non prouvée par traçage) avec le chantoir de la carrière d'Oneux (492-143). Le nouveau réseau étroit est très concrétionné (réseau Renwart). Développement total = 314 m. La cavité est sous la protection du club spéléo GRSC. Seul le réseau Renwart découvert récemment et riche en concrétions est équipé d'une porte. La cavité fait l'objet de comptages chiroptères réguliers dans sa première partie (avant la porte). Elle n'est fréquentée qu'occasionnellement malgré qu'elle soit ouverte, car sa visite ne présente pas réellement d'intérêt spéléologique.

En surface, on est sur un versant forestier assez pentu… sans activité anthropique importante, mais qui par le passé a fait l'objet de l'extension d'une assez importante carrière calcaire. Le site d'extraction est rendu à la nature, mais on ignore s'il n'a pas fait l'objet de certains remblaiements avec des déchets inertes et/ou autres.

5. Trou-qui-fume (538-242) à Furfooz (Dinant). Cavité à deux entrées étagées. L'entrée supérieure proche du plateau est un gouffre, qui présente une succession de ressauts verticaux étroits encombrés d'éboulis jusqu'au niveau de base parcouru par la Lesse souterraine qui se jette par un déversoir dans un lac. En amont, des galeries et salles éboulées débutent au chantoir des Nutons (F61). Ce site comporte une partie du cours souterrain de la Lesse comprenant le Chantoir des Nutons, le Puits des Vaux, la Galerie des Sources et le trou de la Loutre. Ces relations hydrogéologiques (double recoupement souterrain de méandre) ont été très précisément étudiées par l'UNamur (exemple intéressant de lien rapide entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines). Le lac dans cette galerie fait 30 m de profondeur pour 40 m de long et 8 m de large. Développement total = 923 m. Les deux entrées de la cavité sont fermées par des portes et la grotte dispose du statut de CSIS, tout en étant intégrée dans la réserve naturelle agréée de Furfooz (gérée par Ardenne & Gaume).

En surface, on retrouve principalement des forêts et très peu d'incidence anthropique en termes de pollutions. Mais la cavité est en connexion directe et rapide avec la Lesse et les montées d'eau permettent de disposer des banquettes d'alluvions qui se reconstituent à chaque nouvelle crue. Cette cavité est un site de référence pour l'hivernage des chauves-souris (en particulier les Rhinolophes). L'accès y est très strictement réglementé, se limitant généralement aux seuls comptages annuels des chiroptères.

D'autres sites (choix supplémentaires / sites de remplacement) ont été évoqués au début et ont fait l'objet d'une analyse sur la grille de critères, mais n'ont finalement pas été retenus en tant que sites test dans le cadre du présent marché. Ils pourraient néanmoins constituer des "candidats intéressants" à l'avenir pour un monitoring et une évaluation périodique de l'état de conservation de l'habitat 8310 en Wallonie :

- Grotte Sainte Anne (426-050) à Tilff (Esneux)
- Grotte Bebronne (428-032) à Andrimont (Dison)
- Grotte de Freyr (538-109) à Waulsort (Hastière)
- Grotte du Fayt (593-070) à Jemelle (Rochefort)
- Chantoir de Granchamps (493-031) à Louveigné (Sprimont) ou Chantoir de Sècheval (493-067) à Remouchamps (Aywaille)
- Réseau de Frênes (478-025) à Lustin (Profondeville)
- Trou du Nou-Maulin (593-045) à Rochefort

- Grotte d'Eprave (592-021) à Eprave (Rochefort)
- Grotte de Hohière (552-010) à Villers-Sainte-Gertrude (Durbuy)
- Grotte du Père Noël (592-070) à Han-sur-Lesse (Rochefort)

Le réseau des 72 cavités souterraines d'intérêt scientifique (CSIS) constitue un autre set de cavités qui pourrait devenir une liste de base pour l'évaluation de l'état de conservation du milieu souterrain en Wallonie. Pour l'ensemble de ces cavités, il existe une base descriptive dans les dossiers de désignation CSIS. Par ailleurs, dans la plupart des CSIS, l'inventaire biologique, quand il y en a un, se limite actuellement à un relevé des chauves-souris. Or, disposer d'une liste des espèces présentes avec leur degré de dépendance au milieu souterrain permettrait d'objectiver et d'optimiser les mesures de conservation à prendre sur ces sites. Sur les 5 sites tests choisis dans le cadre de cette mission, 3 sont des CSIS. Nos relevés dans ces 3 sites complètent utilement et enrichissent la connaissance (biologique et écologique) de ces cavités sous statut de protection. Il incombera ensuite au DNF (qui coordonne la gestion des CSIS) de tenir compte de ces données nouvelles dans la gestion et les mesures conservatoires à prendre en faveur de ces cavités. Enfin, notre démarche d'inventaire (avec mesures de paramètres environnementaux et données biologiques) constitue une première étape dans la mise en place d'un monitoring physique et biologique pour ces sites sous statut.

Pour chacun des 5 sites sur lesquels nous avons testé notre protocole d'évaluation, une carte d'identité avec une synthèse des données, une description des sites, des menaces anciennes, des sous-habitats… a été réalisée. Le protocole de récolte des données y a été réalisé dans le but de l'avaliser et de permettre, dans un second temps, aux instances en charge d'évaluer le bon état de conservation de l'habitat 8310, de l'appliquer à un plus grand nombre de cavités. Le but est d'aboutir à une estimation globale de l'état de conservation de l'habitat "grottes naturelles non accessible au public" (8310) en Wallonie sur base d'un rapport réalisé par le DEMNA tous les 6 ans afin de rencontrer les obligations de rapportage imposées aux états membres de l'Union Européenne par l'article 17 de la directive Habitats Natura 2000.

5.2 Participation à une réflexion sur le statut de protection des sites

Une réflexion générale a été menée sur le statut de protection des sites (dont CSIS, Natura 2000, RND, etc), suite à une demande du Cabinet de la Ministre Tellier dans le cadre de la révision de la Loi sur la Conservation de la Nature (LCN) et de ses applications. Des éléments de réflexion ont été transmis, tant sur des moyens d'améliorer la prise en compte des sites souterrains dans les statuts de protection existants, que sur le fonctionnement des comités de gestion des CSIS. Nous avons participé à une réunion d'échange sur le sujet, organisée le 28-10-2022 par le cabinet. La sortie du nouvel Arrêté du Gouvernement wallon du 2 mai 2024 relatif à la conservation de la nature dans les réserves naturelles et les cavités souterraines d'intérêt scientifique a modifié le cadre légal lié à la protection des milieux souterrains. Une réflexion conjointe par l'ensemble des partenaires de ce projet a été menée afin de proposer des experts pour le comité de gestion des CSIS qui est actuellement en gestation.

6. Caractérisation des activités en surface et identification des menaces qui en découlent

6.1 Accueil et encadrement d'un stagiaire chargé de la réalisation d'un TFE

Une offre de stage a été émise en mai 2022 et largement diffusée vers les étudiants (bachelier ou master) dans les domaines Agronomie, Bio-ingénieur, Environnement, Biologie, Hydrologie, Géologie et équivalent (voir annexe 10).

Nous avons accueilli entre septembre 2022 et février 2023 un stagiaire (François Thirion, HEPL La Reid - Bachelier en agronomie, orientation environnement), qui a par la suite réalisé son TFE en rapport direct avec le projet 8310, TFE finalisé en mai 2023.

Son travail consistait à **décrire, à l'échelle du bassin d'alimentation de chacune des 5 cavités tests, les caractéristiques hydrologiques, écologiques ainsi que la pression anthropique (menace) pesant sur elle**. En particulier, le stagiaire a pris part aux tâches suivantes :

a/ définition des paramètres à prendre en compte pour caractériser la vulnérabilité et les activités à risque présentes dans chacun des 5 bassins (intégration des données d'occupation du sol ou de variables hydrologiques)

b/ extraction des données cartographiques existantes (SIG), complétées par des relevés de terrain permettant une estimation de chaque critère de risque (point a)

c/ synthèse des résultats sous la forme de cartes et d'un indice de vulnérabilité en proposant une quantification et une pondération pour chaque menace / activité à risque pesant sur l'intégrité de la cavité.

Ce travail de compilation cartographique et de recherche sur le terrain devait aboutir au calcul d'un "indice de risque" permettant de quantifier, de pondérer et de "sommer" les menaces pesant sur chaque bassin et de pouvoir comparer les sites entre eux. Cette grille de critères a été conçue pour pouvoir à terme être appliquée à d'autres bassins et sites karstiques s'il y a lieu d'évaluer la pression anthropique pesant sur certaines cavités, notamment en vue de définir des priorités pour la conservation.

L'évaluation du niveau de menace (indice) sur les 5 cavités tests, a nécessité de :

- Délimiter le bassin d'alimentation (eau de percolation) pour chaque grotte-test dans un Système d'information Géographique (QGIS). Cette délimitation a été réalisée de la même manière que pour les bassins versants des cours d'eau, c'est-à-dire sur base des lignes de crêtes et de la topographie (à l'aide des courbes de niveau et/ou du modèle numérique de terrain). Pour les cavités actives alimentées par un cours d'eau souterrain, une deuxième zone d'étude a été dessinée, correspondant à la zone d'alimentation du cours d'eau sur 10 km[5] en amont de la cavité.

[5] *Cette limite de 10 km est relativement subjective et devrait dépendre du débit du cours d'eau en question. Elle a été fixée du fait de l'effet de dilution qui se marque avec la distance.*

- Déterminer, pour chaque périmètre en connexion avec la grotte, l'occupation et l'utilisation du sol à l'aide de la couche Ecotopes (LifeWatch) sur QGIS. Nous avons confronté cette couche "occupation du sol" aux vues aériennes (orthophotoplan) et de différentes couches WalOnMap (Parcellaire agricole anonyme, Walous, Ancienneté des forêts actuelles, …).
- Compléter ces données cartographiques et planimétriques avec l'aide du Contrat Rivière concerné, de l'agent de triage DNF local et d'autres personnes-ressources (commune, naturalistes, associations locales, spéléos,...) pour regrouper des données complémentaires et/ou des informations sur des points noirs particuliers en termes de pollutions et de risques.
- Calculer le pourcentage de la surface de chaque zone d'étude concerné selon le type d'occupation du sol (secteurs agricole, forestier, voirie, résidentiel, etc) en pondérant cette valeur suivant la distance par rapport aux galeries souterraines étudiées.
- Aboutir à un indice global de risque qui intègre, à l'échelle du bassin d'alimentation pour chaque secteur d'activité, sa surface (%), sa proximité avec la grotte, ainsi qu'un niveau de menace (impact environnemental potentiel) de l'activité. La résultante est un indice de risque global pour chaque grotte, qui la classe dans une gamme de "Risque nul" à "Risque élevé".

Cette classification exprime un niveau de risque lié à l'ensemble des activités en surface pour chacune des grottes naturelles concernées. L'indice associé à la grotte permet de donner un aperçu simplifié et semi-quantifié de ces risques. Le calcul proposé reste perfectible et devrait être testé sur un nombre plus important de cavités pour affiner les pondérations de l'impact de chaque activité. Il se base sur l'occupation du sol actuelle et ne prend pas suffisamment en compte l'évolution de celle-ci et l'impact possible d'activités anciennes[6]. Enfin, il n'a pas été possible, pour l'indice risque, dans le cadre de ce TFE (et du projet 8310) de correctement intégrer et pondérer les impacts ponctuels (tels des pollutions - rejets dans la nappe, égouts…). Ceux-ci ont souvent des superficies négligeables, mais des effets concentrés qui peuvent être déterminants quant à l'état de la cavité.

Le TFE complet détaillant cette méthode de calcul de la classe de risque et l'appliquant aux 5 grottes test est repris pour information en annexe 11.

7. Travail de terrain

7.1 Autorisation d'accès aux sites-tests

Une fois les 5 sites test sélectionnés, un travail de prise de contact a été réalisé afin d'obtenir l'autorisation d'accès aux sites tests, d'identifier qui a les clés des différents sites et de nous assurer de la collaboration des différentes parties prenantes concernées par ces cavités.

[6] *Selon le type de cultures et le respect de bonnes pratiques agricoles, une surface cultivée peut avoir une incidence très différente sur la qualité des eaux de percolation et le risque de pollution diffuse. Ce genre de différenciation, si elle s'avère utile, n'a pas pu être réalisée dans le cadre du travail qui nous a été confié.*

7.2 Achat du matériel de terrain

Le matériel requis pour réaliser les mesures des paramètres biotiques et abiotiques a été acquis. Une étude de marché (parfois complexe) a été réalisée en amont pour identifier les alternatives possibles, choisir les meilleures options de matériel et contacter les fournisseurs. Ce matériel a été utilisé lors de la phase de test du protocole et pourra évidemment encore être utilisé par le DNF-DEMNA pour la mise en œuvre ultérieure du protocole d'évaluation de l'état de conservation.

usage	type de matériel	nombre
inventaires biologiques	pots : 20 petits transparents, 20 grands, 20 petits plastique, 10 micro/plat, 100 tubes 30 ml, 200 tubes 10 ml	370
inventaires biologiques	eppendorf avec capuchon qui se clipse	400
inventaires biologiques	kit de dissection, comprenant différents outils dont pinces, aiguilles montées, scalpel, etc	1
inventaires biologiques	pinces de différentes sortes : souples, rigides, léonard, courbées, de microscopie, etc	7
inventaires biologiques	petit berlèse de terrain	1
inventaires biologiques	filet à plancton	1
inventaires biologiques	aspirateurs à bouche : 4 modèles différents	4
inventaires biologiques	pinceaux	3
inventaires biologiques	joints de robinet	3
inventaires biologiques	toile de filet à plancton à maille 100 µm	10 m²
inventaires biologiques	éthanol 80% dénaturé à l'isopropanol (litres)	25
inventaires biologiques	éthanol anhydre 96% (litres)	2,5
suivi température long terme	sondes température niphragus (production IRSNB)	15
mesures ponctuelles de température	thermomètre avec sonde (air et eau)	1
mesures ponctuelles de température	thermomètre à visée infrarouge	1
analyses de la qualité de l'air	capteur portable de terrain avec extracteur d'air pour mesure CO_2, CO, H_2S, O_2, CH_4	1
analyses de la qualité de l'eau	conductimètre portable de terrain	1
analyses de la qualité de l'eau	pipette à volume variable	1
analyses de la qualité de l'eau	embouts de micropipette	100

Tableau 2. Liste du matériel acquis pour la phase test de terrain

En marge des achats réalisés dans le cadre du marché, les partenaires ont mis du matériel propre à disposition pour atteindre les objectifs du marché. On peut notamment citer le spectromètre (CWEPSS) utilisé pour réaliser des analyses de la qualité de l'eau (nitrates), mais aussi des binoculaires et un microscope (Ecofirst) utilisés pour analyser les récoltes de matériel biologique), une sonde permettant de mesurer l'oxygène dissous dans l'eau (CWEPSS) et d'autres outils et équipements (spéléos notamment, via MaSePaS).

7.3 Sorties de terrain

Une visite de reconnaissance de l'environnement en surface (bassin d'alimentation) des 5 cavités retenues pour tester la méthodologie d'évaluation a été réalisée sur 2 jours en 2022.

Ceci a permis de rassembler des observations complémentaires quant à l'occupation du sol et aux pressions anthropiques pouvant affecter ces sites.

Entre février et avril 2023, 2 sorties de terrain ont été organisées dans chacune des 5 grottes tests afin de tester la méthodologie et les équipements, de faire des récoltes de faune. Ces visites s'accompagnent d'un pointage des stations mesurées et des prélèvements effectués sur la topographie de la cavité. L'objectif étant de lier les analyses à la typologie des micro-habitats dans la cavité, afin de définir si la grotte est un ensemble uniforme et/ou si elle présente (comme c'est le cas dans de nombreuses cavités selon la littérature) un ensemble de niches et de micro-habitats aux caractéristiques biologiques et abiotiques différentes. Le report sur les topographies et par ailleurs indispensable pour pouvoir retrouver le matériel (type appâts) laissé sur place lors de la première visite, et pour noter des particularités "locales" qui peuvent avoir une incidence majeure sur la faune présente (ex. zones de piétinement empruntées par les visiteurs, présence de déchets organiques (type bois et feuilles), arrivée d'eau ponctuelle (gours ou stalactite…), présence de guano, ...)

En septembre 2023, deux sorties de terrain dans 2 grottes test (Grotte de Bohon et Grotte des Collemboles / Trou du Lac) ont permis de faire des prélèvements de matériel biologique en vue des analyses ADN. Les données des loggers de température 'niphargus' ont été relevées à cette occasion également (ils ont été sortis des cavités et replacés 2 jours plus tard sur site exactement aux mêmes endroits). Enfin, en fin d'année 2024 / début 2025, une dernière sortie dans les 5 sites tests a été nécessaire pour récupérer tous les loggers de température. Ceux-ci ont permis d'enregistrer les températures avec un pas horaire pendant environ 18 mois. Ces données restent à interpréter pour confirmer la présence de zones de température stables/variables dans ces sites et de les comparer aux fluctuations extérieures.

7.3.1 Mesures abiotiques

La température a été relevée ponctuellement lors de la visite en différents endroits de la cavité, tant dans l'air que sur les parois et dans l'eau. Dans l'air, les différences de température induisent très généralement des flux d'air dans les cavités (du fait de la différence de densité qui en résulte). C'est pourquoi cette mesure mérite d'être répétée en plusieurs endroits dans une même cavité. Le recours à des "pistolets thermiques" (thermomètre à visée infrarouge) a également été testé pour permettre de relever la température dans des plafonds et/ou des fissures autrement difficilement accessibles. L'objectif étant d'identifier la possible présence de dôme d'air chaud ou de piège à froid dans d'autres parties de la cavité.
La pose de 3 de dataloggers de température (modèle 'niphargus' produit par l'IRSNB) dans chaque grotte, avec enregistrement horaire programmé sur plusieurs mois, complète ces mesures ponctuelles avec un suivi dans le temps en vue de déterminer des cycles, des inversions et également d'en déduire les flux d'air.

Atmosphère et gaz : la composition de l'atmosphère dans la cavité (en comparaison avec l'extérieur) a été réalisée en plusieurs endroits avec le dräeger. Cet appareil permet en quelques secondes de disposer de la composition (en % ou en PPM) des gaz suivants : O_2, CO_2, CO et H_2S. Les quelques mesures réalisées entre janvier et mars (pourtant considéré comme la période de l'année où les concentrations en CO_2 sont les plus faibles) était 10 fois plus élevées que dans l'atmosphère extérieure, confirmant les relevés réalisés depuis de nombreuses années par C. Ek et al.

Dans les 5 cavités parcourues, aucune ne présentait des taux en CO pouvant poser problème pour l'homme[7] et le H_2S et CH_4 étaient absents partout. La composition de l'atmosphère est probablement, avec les précipitations, le facteur le plus impacté par la saisonnalité corrélée à l'activité des organismes dans le sol et la respiration des arbres. La date à laquelle les mesures sont réalisées doit donc être prise en compte et impose de relativiser certaines conclusions.

Analyses dans l'eau : la conductivité a été analysée à la fois dans les rivières souterraines (lorsqu'elles étaient présentes - eau courante) mais aussi dans les eaux de percolation formant des vasques d'eau et des gours (eau stagnante). Elle n'indique pas un degré de pollution mais bien de minéralisation de l'eau qui renseigne sur le temps de séjour de l'eau au contact du calcaire.
La présence d'une eau alimentée par les pluies (faiblement conductrice) dans la cavité pourra ainsi être rapidement discriminée et différenciée de celle qui est sous terre depuis longtemps et qui a pu se charger en $CaCO_3$.

La concentration en nitrates n'est pas mesurée directement sous terre. On y prélève un petit volume d'eau qui est ensuite analysé par spectrométrie peu de temps après en laboratoire. La mesure est exprimée en mg/l de NO_3^-. Le nitrate présent en excès dans les eaux peut avoir plusieurs origines, qu'elles soient agricoles (engrais, fumier, élevage) ou provenant des eaux usées.
D'autres intrants (type pesticides / herbicides) sont généralement associés aux nitrates d'origine agricole. Ils ont des conséquences écologiques bien plus impactantes, mais sont complexes à analyser. En mesurant le NO_3^- on dispose d'un indicateur général de l'impact agricole sur l'eau et sur les écosystèmes qui en dépendent.

Les résultats des mesures abiotiques in-situ sont consignés dans un tableau, présenté en annexe 12.

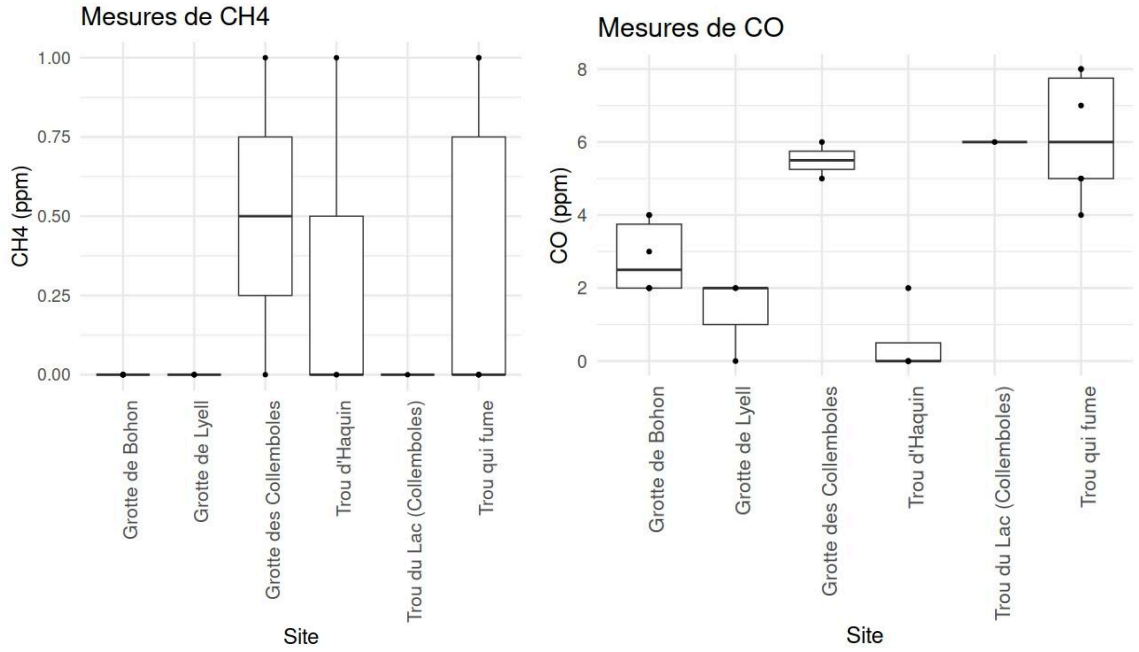
Une analyse de ces données, ainsi que celles récoltées par les dataloggers de température 'niphargus' est proposée ci-dessous sous forme de tableau de synthèse et de graphes.

[7] *Les cavités dont l'atmosphère manque d'oxygène (lié à une concentration trop forte en CO et/ou CO_2) sont relativement peu nombreuses en Belgique. Ce problème est par contre préoccupant sur le pourtour meditérannéen, particulièrement en été, rendant un nombre croissant de grottes inaccessibles pendant une période de l'année. Avec le changement climatique en cours et particulièrement en période estivale, il est possible qu'on puisse être confronté à l'avenir à ce type de problèmes. L'usage d'un détecteur de gaz permet donc de suivre cette variable, mais remplit aussi une fonction de sécurité (imposée dans bien des métiers en milieu confiné) pour les agents en charge de réaliser ces relevés.*

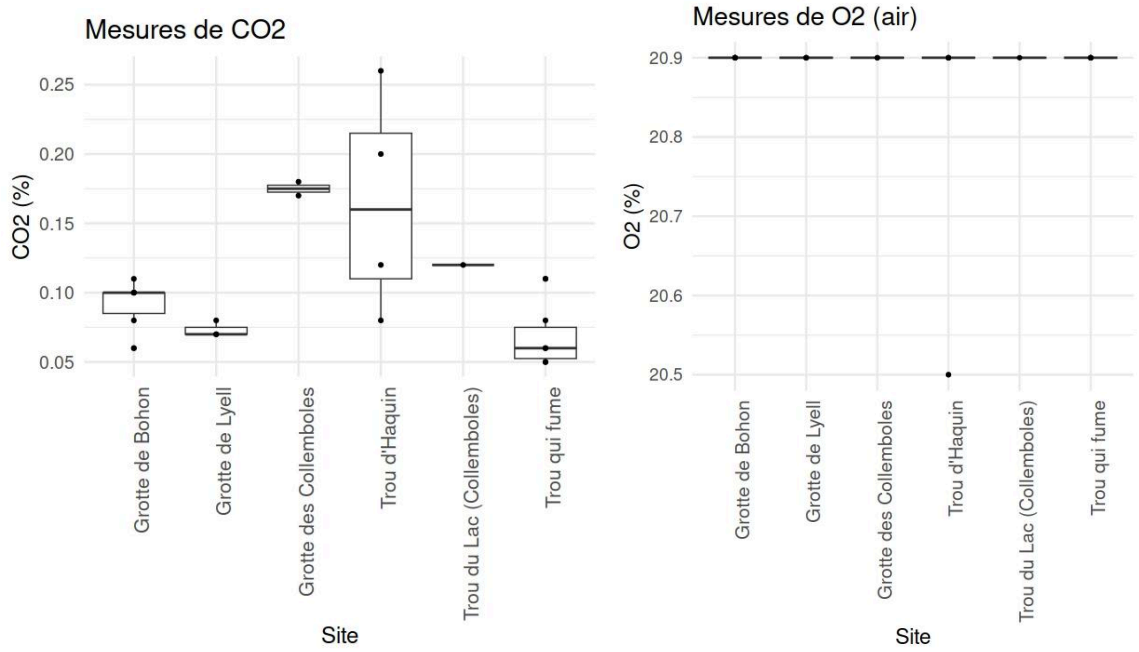
Paramètres abiotiques	Critères de sélection	Mise en œuvre sur le terrain
Température ● Eau ● Air	La stabilité de la température est intrinsèque au milieu souterrain. Il existe des différences nettes de variabilité entre les zones superficielles et profondes. Différencier les sites avec cours d'eau (apport de chaleur et de matière organique par le bas du réseau) ou masse d'eau stagnante souterraine, des cavités sans masse d'eau libre. Les mesures confirment la topographie (compartimentage) qui définit les échanges d'air.	Un monitoring continu en plusieurs points d'un site permettrait de détecter des changements brusques ou une modification durable des flux d'air ou d'eau, se traduisant par une diminution de l'état de conservation. Difficultés : minimum 1 logger / site. S'il est estimé utile de répéter les mesures dans différentes zones pour les grands sites (maximum 5) => investissement matériel et humain important pour disposer le matériel, le relever et analyser les données !
Qualité de l'eau ● Conductivité ● $[O_2]$ ● $[NO_3^-]$	Révèle des impacts provenant de la surface (ea. agricole et pollutions organiques) Différencier les eaux courantes et stagnantes => valeur de veille de pollution en surface Difficulté d'interprétation car sur 2 sites test mesurés, on ne voit pas de différence claire, les valeurs sont >> 70% sauf 1 (vasque) alors qu'une petite flaque est > 90% Les valeurs mesurées sur les 5 sites tests sont < 50 mg/l (seuil d'acceptabilité pour la santé de l'eau de consommation) => valeur de veille de pollution en surface	Il est nécessaire de prendre plusieurs mesures par site pour les différentes zones et types de masses d'eau pour obtenir une vision globale (suffisamment représentative) d'un site. Analyser les résultats en lien avec l'occupation du sol en surface et les flux de transfert.
Qualité de l'air ● $[O_2]$ ● $[CO_2]$ ● [CO] ● $[H_2S]$	Toutes les mesures effectuées sur les sites test donnent la valeur de 20.9% sauf 1 à 20.5%, mais probable impact de la saisonnalité : NE PAS RETENIR a priori. Toutefois, pour des raisons de sécurité de l'opérateur, on pourrait quand même mesurer ce paramètre en même temps que le CO_2 Différentes concentrations allant de 0.05 à 0.25 %[8]. Les seuils d'acceptabilité et l'interprétation des résultats ne sont pas clairs. Concentrations allant de 0 à 8 ppm. Les seuils d'acceptabilité et l'interprétation des résultats ne sont pas clairs. Valeurs nulles dans tous les sites : NE PAS RETENIR	Retenir uniquement les mesures de CO_2 et de CO, notamment pour le caractère toxique (et potentiellement d'O_2). Les seuils déterminant l'état de conservation devraient être définis. NB. absence de corrélation entre ces deux gaz dans les mesures sur site => difficulté d'interprétation.

Tableau 3. Tableau de synthèse concernant les mesures abiotiques

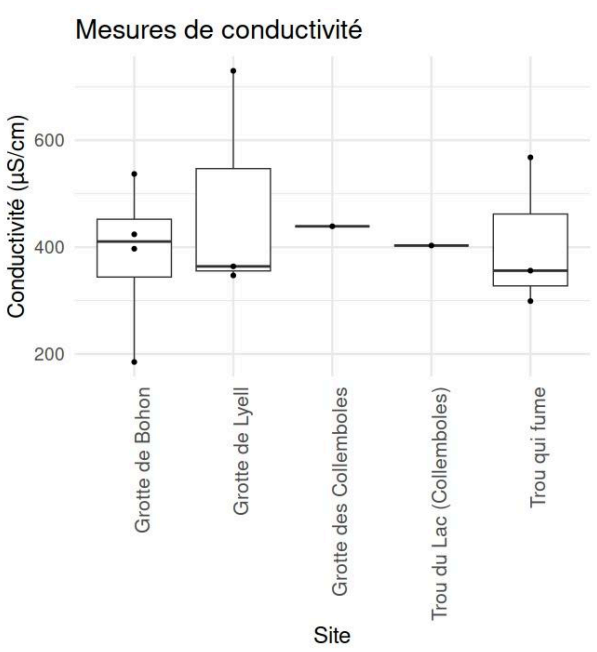
[8] *À titre de comparaison, la valeur atmosphérique "normale" moyenne en Belgique est de 400 ppm soit 0.04 %*

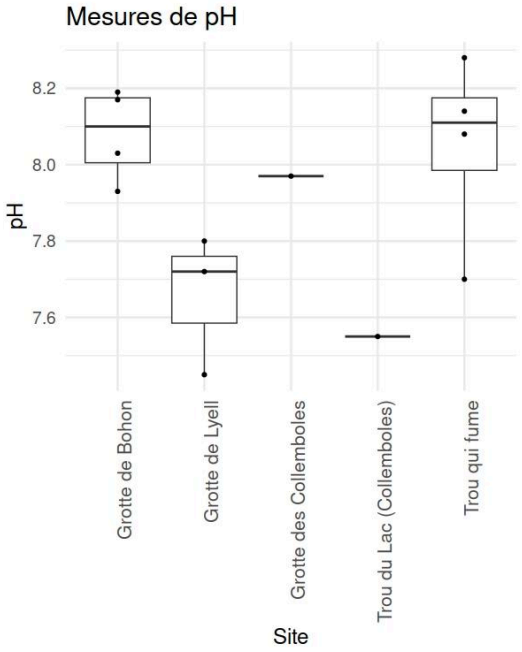


Figures 5 et 6. Mesures manuelles du taux de CH_4 et de CO dans l'air dans les 5 sites test

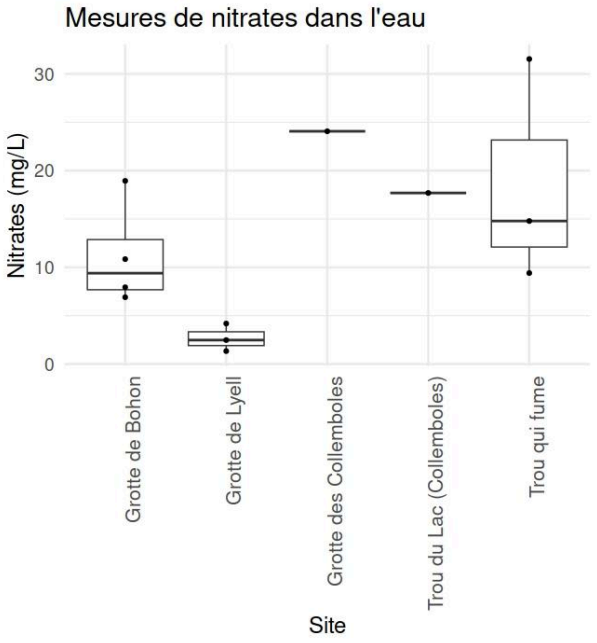


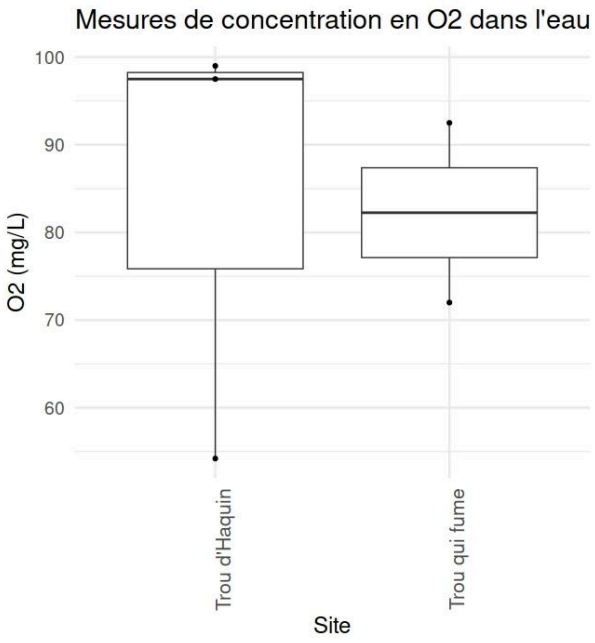
Figures 7 et 8. Mesures manuelles du taux de CO_2 et de O_2 dans l'air dans les 5 sites test. NB. Toutes les mesures de concentration en O_2 donnent exactement la valeur de 20.9% à l'exception d'une mesure (20.5%) qui a été répétée pour donner finalement 20.9%, mais il faut tenir compte de la saisonnalité (toutes nos mesures datent de la fin de l'hiver / début du printemps).



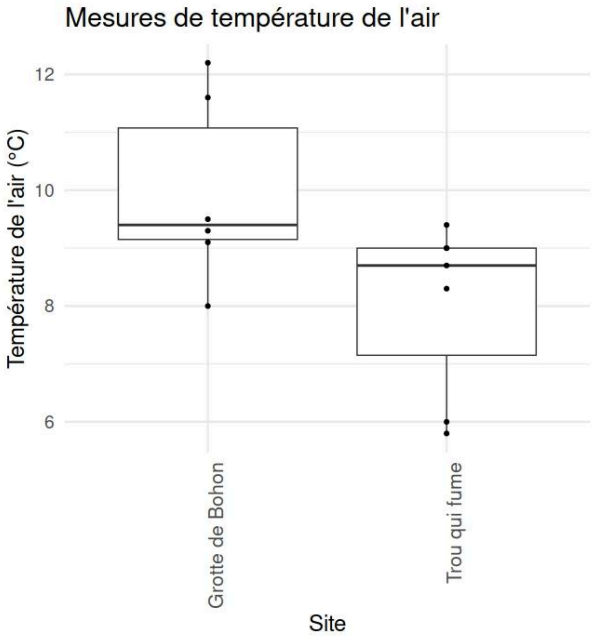


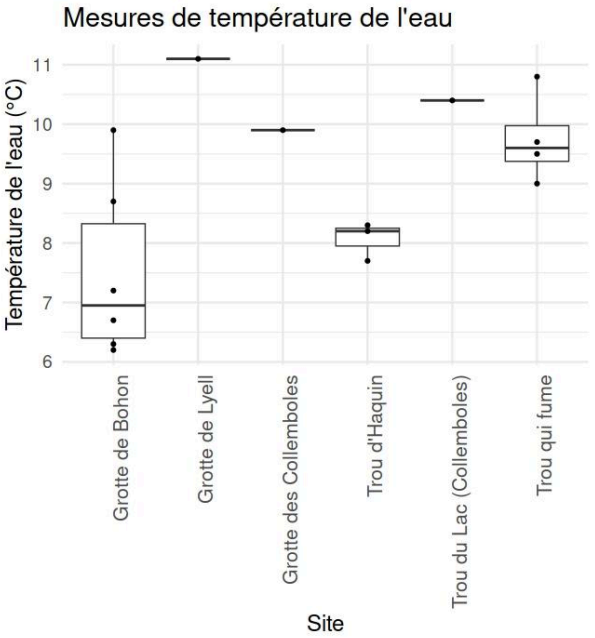
Figures 9 et 10. Mesures manuelles de la conductivité et du pH dans l'eau dans les 5 sites test





Figures 11 et 12. Mesures manuelles de la concentration en NO_3^- et en O_2 dissous dans l'eau dans les 5 sites test





Figures 12 et 13. Mesures manuelles des températures de l'air et de l'eau dans les sites test

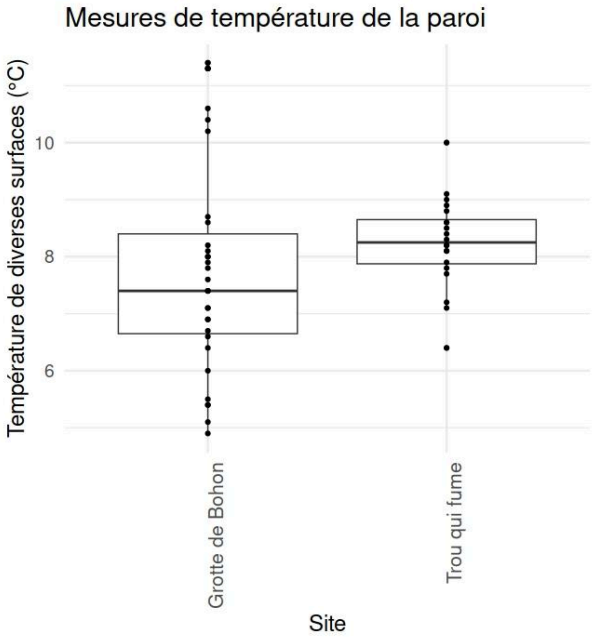


Figure 14. Mesures manuelles des températures des parois dans les sites test

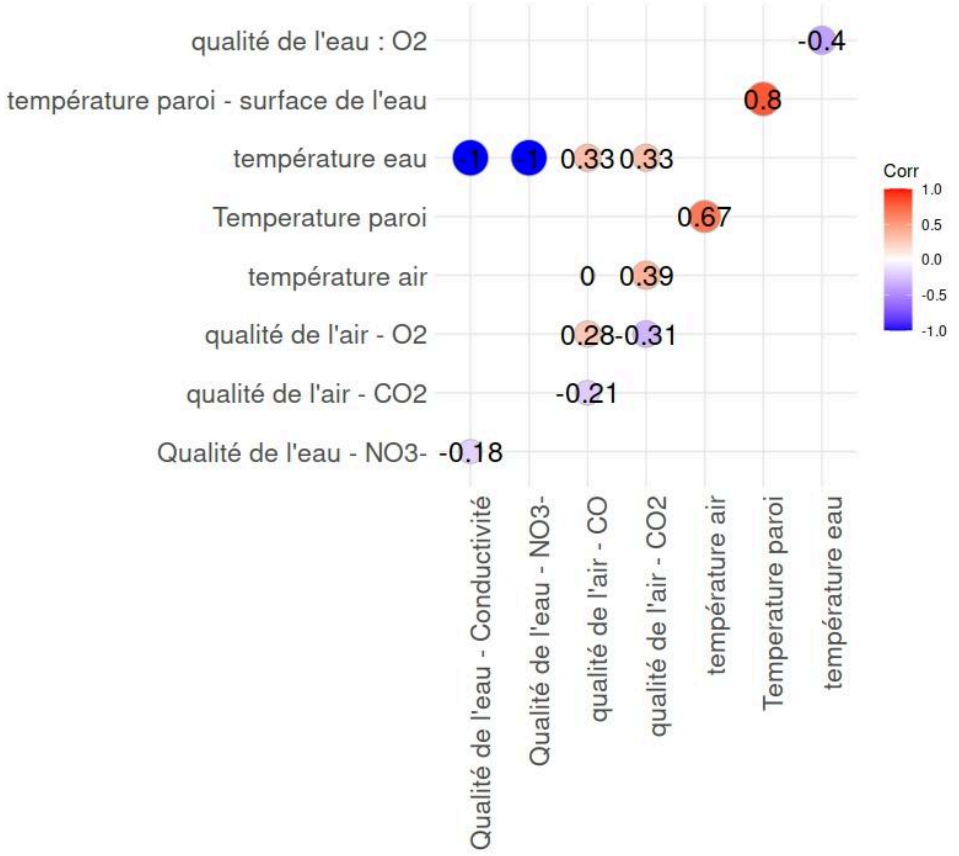
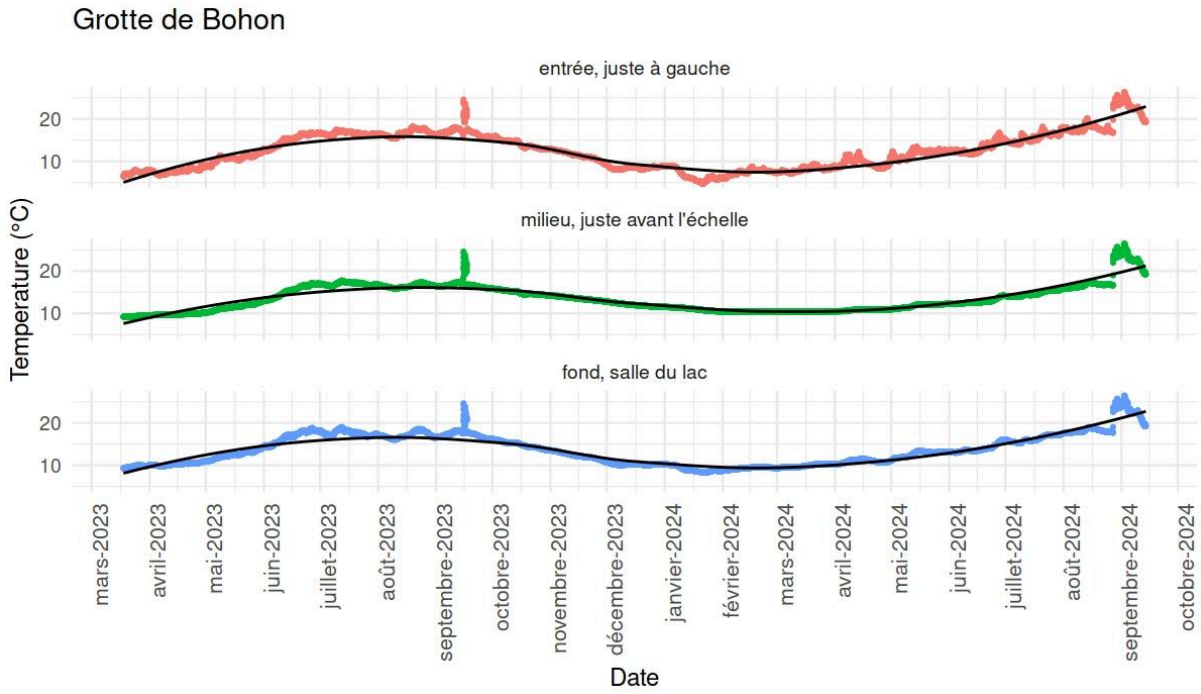


Figure 15. Tableau de corrélation entre les paramètres abiotiques mesurés manuellement dans les sites test



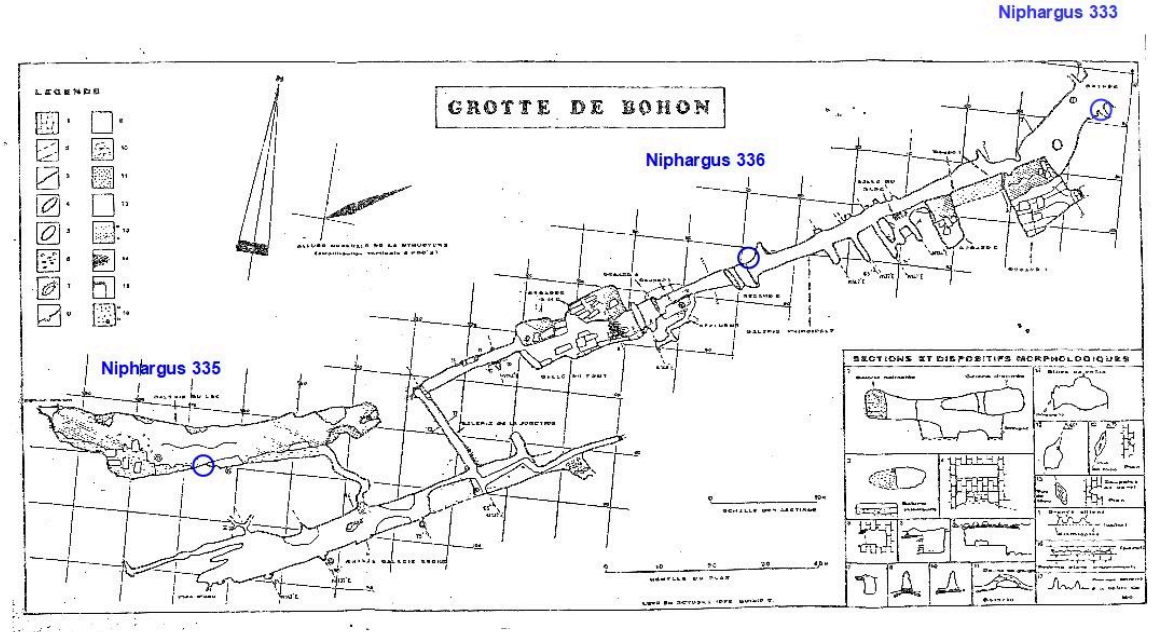


Figure 16. Profils de température à long terme (période de 17 mois) à la Grotte de Bohon : Niphargus 333 en haut (entrée, juste à gauche), 336 au milieu (avant l'échelle) et 335 en bas (salle du lac). Le petit pic mi-septembre 2023 correspond aux deux jours où les thermomètres ont été sortis du site pour récupérer les données ; de même que les données de septembre 2024. Les variations de températures assez similaires dans les 3 zones s'expliquent par la présence de l'Ourthe souterraine qui influence fortement les conditions. La courbe noire surimposée est obtenue par un lissage local des valeurs sur une fenêtre mobile.

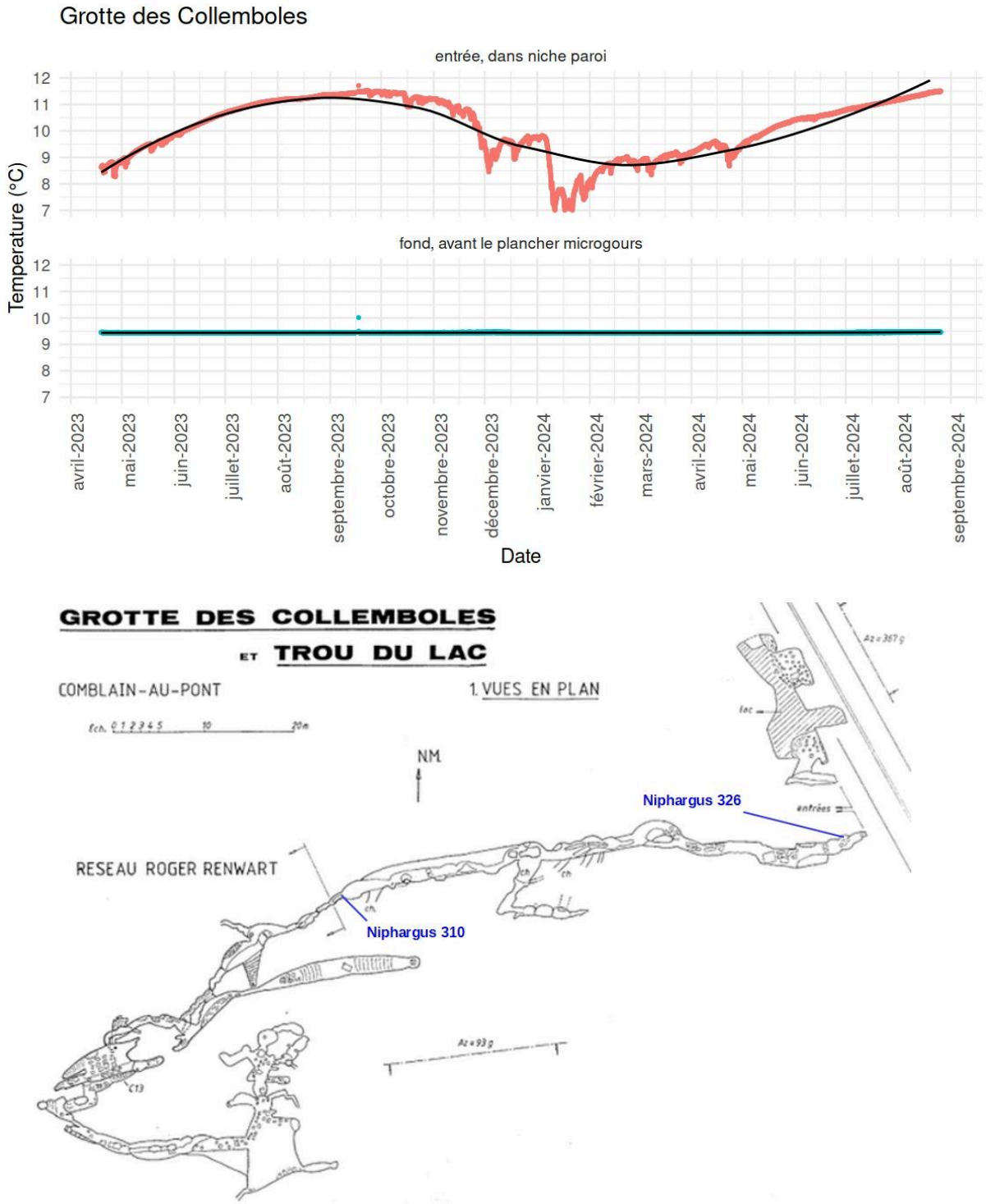


Figure 17. Profils de température à long terme (période de 16 mois) à la Grotte des Collemboles : Niphargus 326 en haut (entrée, dans une niche dans la paroi), 310 en bas (avant le plancher de micro-gours). Les données hors courbe mi-septembre 2023 correspondent aux deux jours où les thermomètres ont été sortis du site pour récupérer les données. La courbe noire surimposée est obtenue par un lissage local des valeurs sur une fenêtre mobile.

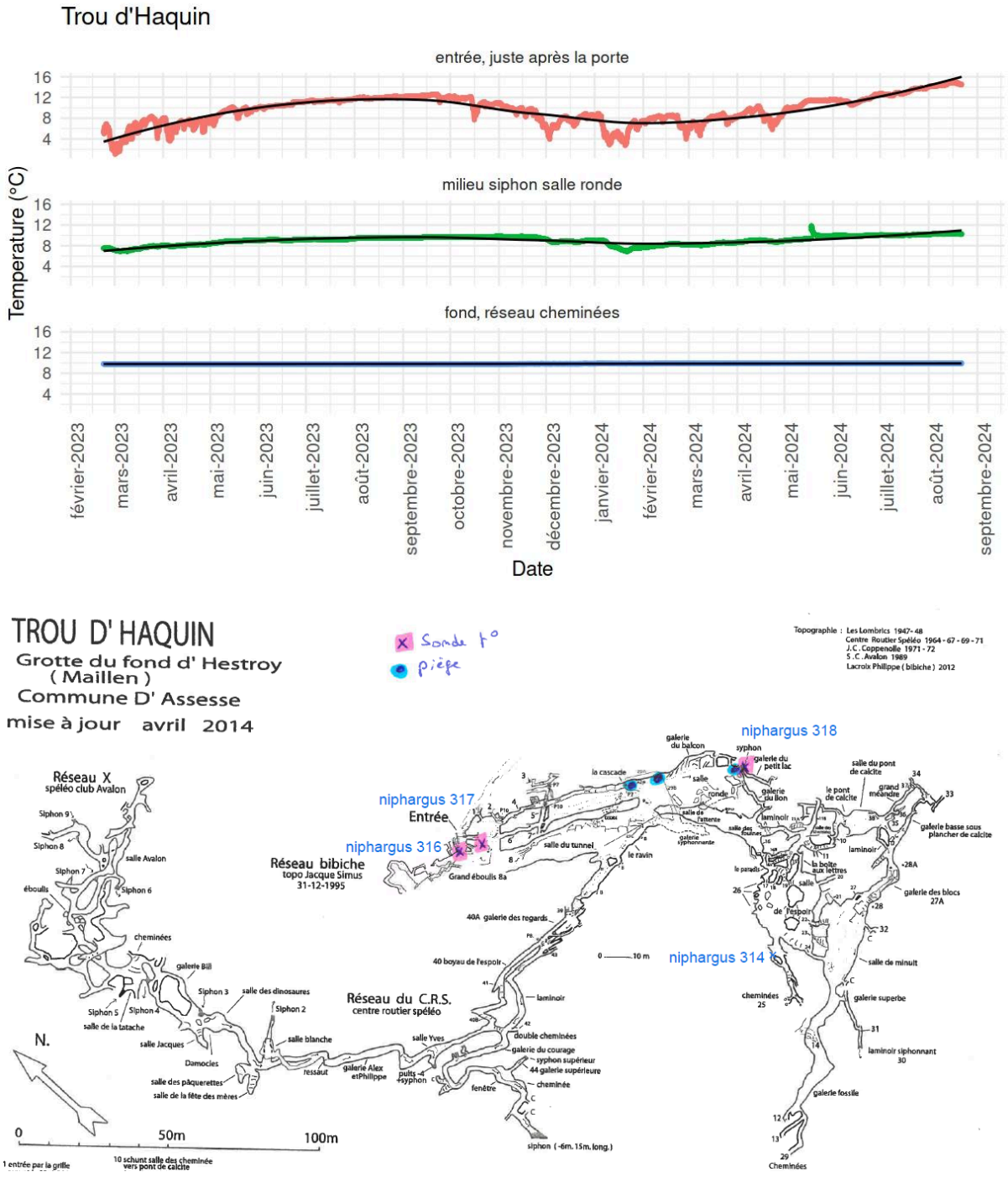


Figure 18. Profils de température à long terme (période de 18 mois) au trou d'Haquin : Niphargus 316 en haut (entrée, juste après la porte), 318 au milieu (siphon salle ronde) et 314 en bas (réseau des cheminées). Le Niphargus 317 (posé au bas du premier éboulis) n'a jamais été retrouvé sur site malgré d'amples recherches, il est considéré comme perdu. La courbe noire surimposée est obtenue par un lissage local des valeurs sur une fenêtre mobile.

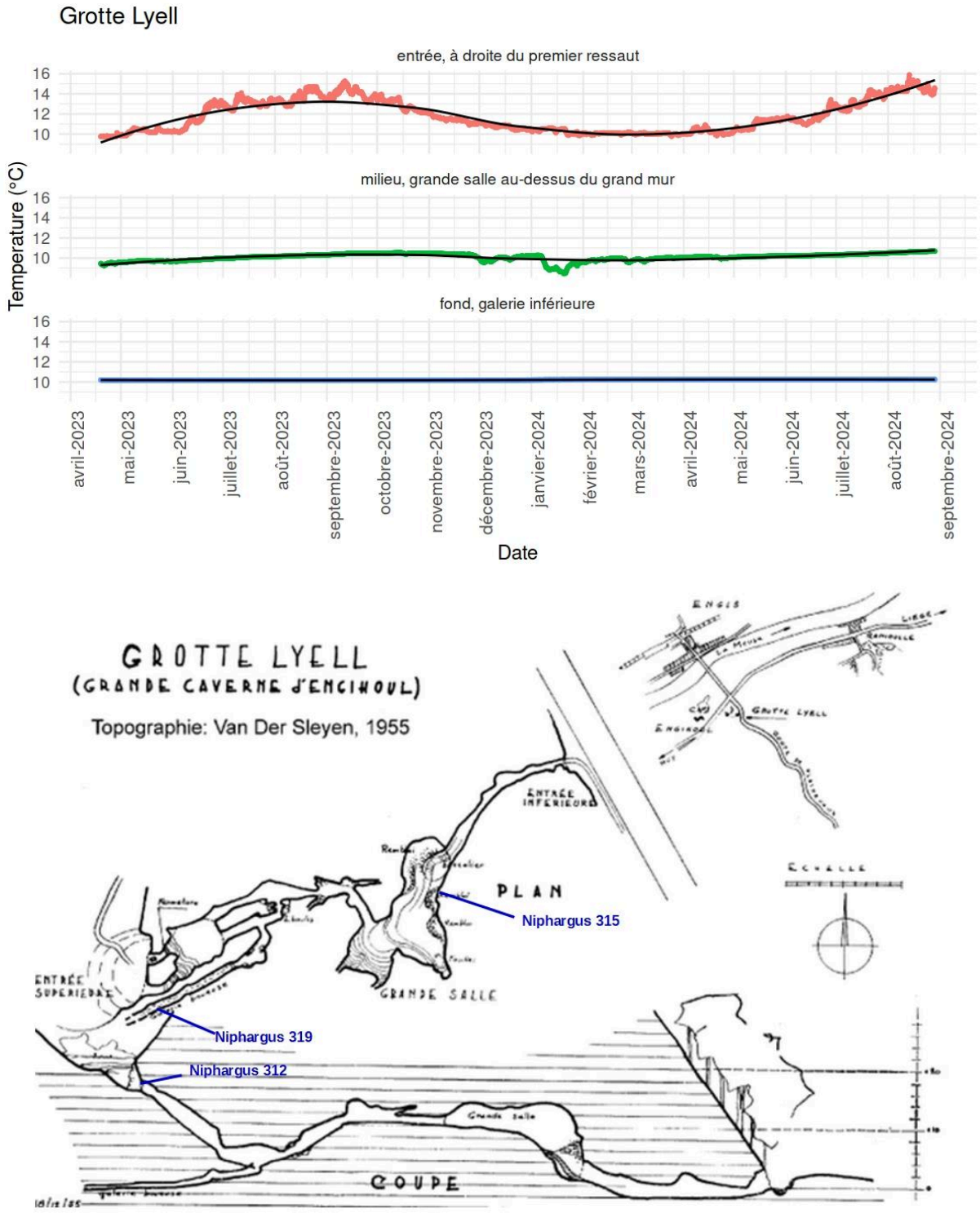


Figure 19. Profils de température à long terme (période de 16 mois) a la Grotte Lyell : Niphargus 312 en haut (entrée, à droite du premier ressaut), 315 au milieu (grande salle au-dessus du grand mur) et 319 en bas (galerie inférieure). La courbe noire surimposée est obtenue par un lissage local des valeurs sur une fenêtre mobile.

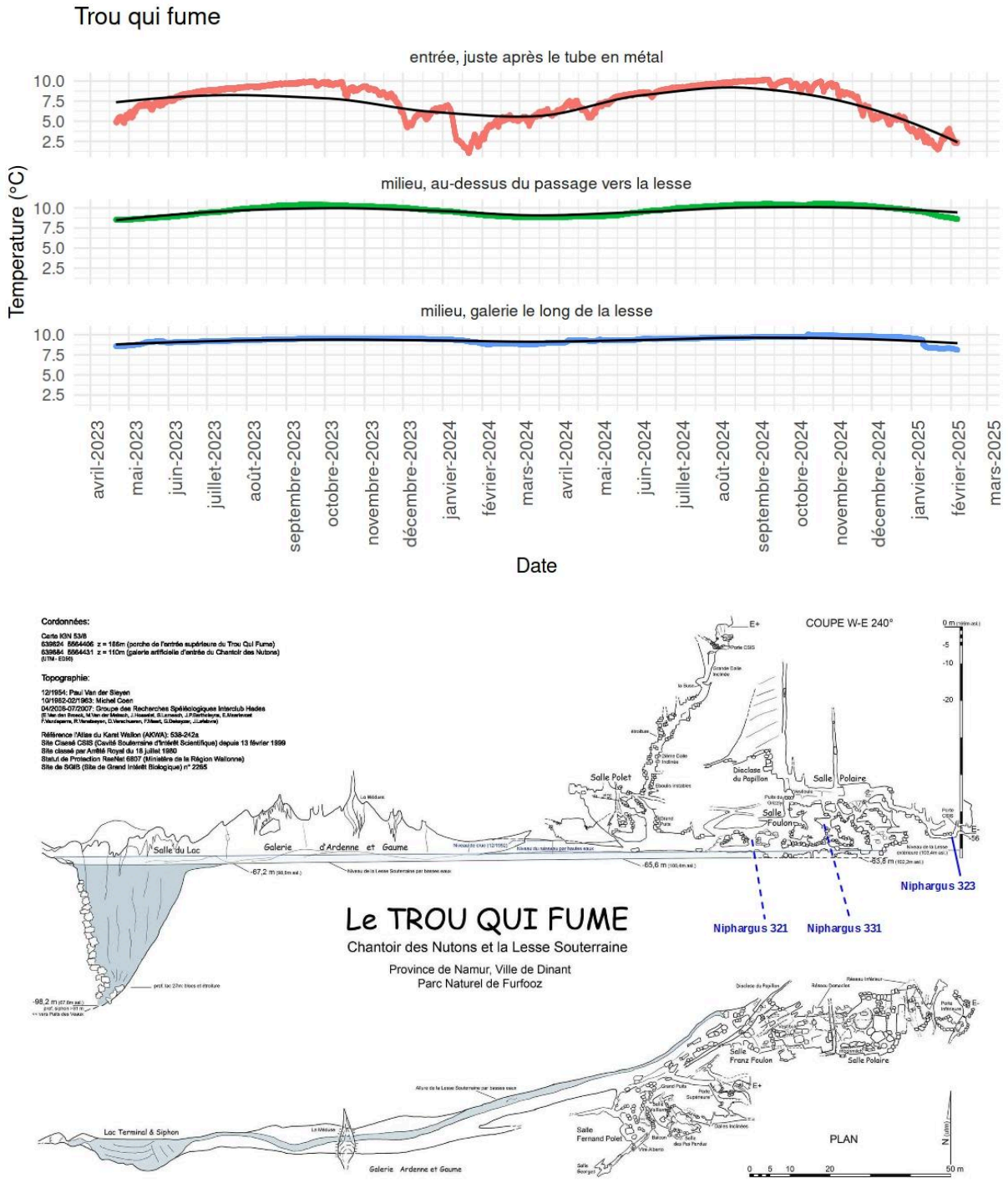


Figure 20. Profils de température à long terme (période de 21 mois) au Trou qui Fume : Niphargus 323 en haut (entrée, juste après le tube en métal), 331 au centre (milieu, au-dessus du passage vers la lesse) et 321 en bas (galerie le long de la Lesse). La courbe noire surimposée est obtenue par un lissage local des valeurs sur une fenêtre mobile.

7.3.2 Prélèvements de faune - mesures biotiques

Les visites souterraines ont été mises à profit pour récolter du matériel biologique (capture à vue, pose d'appâts et de pièges, filtration d'eau et de sédiments), en différents endroits dans les 5 grottes. Le recours aux pièges (terrestres et aquatiques) ainsi que la pose d'appâts nécessitent de retourner sur place dans un délai raisonnable (quelques jours au maximum),

pour récupérer le matériel et surtout pour éviter de provoquer une hécatombe dans la cavité. Pour systématiser le processus et avoir des données comparables entre cavités, nous avons chaque fois utilisé le même genre de pièges et d'appâts laissés en place pendant 3 à 4 jours. Environ 250 échantillons ont été collectés dans les 5 grottes test pour identification morphologique.

Une fois le matériel récolté, nous avons été confrontés à la difficulté de l'identification des spécimens. Les écueils sont multiples : accès à la documentation, disponibilité des spécialistes, taille des spécimens, fiabilité de l'identification par analyse du matériel génétique.
Les spécialistes sur une assez large diversité taxonomique se faisant rare, nous avons pu compter sur une contribution extérieure assez faible, bien que très précieuse ! Toutefois, notre démarche a aussi consisté à explorer notre capacité à identifier un maximum d'échantillons par nous-même. Nous avons aussi testé les analyse ADN pour des prélèvements dans deux grottes test avec plusieurs techniques :

- barcoding : 21 échantillons contenant 1 seule espèce
- metabarcoding : 15 échantillons avec entre 2 et 5 espèces différentes + 5 prélèvements bactériens (technique d'analyse différente)
- ADN environnemental : 5 capsules de filtration d'eau + 5 échantillons de terre/boue/sédiments.

Notre expertise pour des groupes aussi variés que les annélides et les nématodes (embranchements), les arachnides, chilopodes, pauropodes, diplopodes, copépodes, bivalves, collemboles ou insectes (classes) est bien entendu limitée. Nous avons pu réunir une bibliographie abondante et tenter des identifications, uniquement envisageable en utilisant une loupe binoculaire et/ou un microscope et, idéalement, la possibilité de faire de bonnes micro-photographies. Des spécimens ont aussi été envoyés chez certains spécialistes pour certains groupes taxonomiques (araignées, coléoptères, gastéropodes, cloportes, diploures).
Si on considère les identifications obtenues au moins à l'ordre ou mieux, on peut déduire que l'approche "classique" d'identification morphologique peut être complétée par les techniques d'analyse ADN, apportant 24% (7/29) et 43,5% (10/23) des taxons identifiés respectivement à Bohon et aux Collemboles. L'ADN a aussi permis de confirmer quelques identifications morphologiques pour 5 et 1 taxons sur ces mêmes sites (Tableau 3 et figure 21).

Site	Morphologique	Morpho + ADN	ADN
Bohon	17	5	7
Collemboles + Lac	12	1	10
Haquin	33		
Lyell	10		
Trou qui fume	6		

Tableau 3. Nombre de taxons identifiés aux rangs d'espèce, genre, famille et ordre selon les méthodes morphologiques et d'analyse ADN pour les grottes de Bohon et des Collemboles. Les 3 autres sites n'ont fait l'objet que d'identifications morphologiques.

L'ensemble des données liées aux échantillons récoltés et identifiés sur base morphologique dans les 5 grottes test est fournie en annexe 13. Les données récoltées dans les deux grottes lors du stage de biospéologie organisé par J. Lips sont fournis en annexe 14. Une évaluation de la fiabilité des résultats des analyses ADN sur base de nos prélèvements est proposée en

annexe 15. Enfin, une synthèse des données biologiques (identification par ADN + morphologique) est fournie en annexe 16. Ces résultats sont également commentés et illustrés ci-dessous.

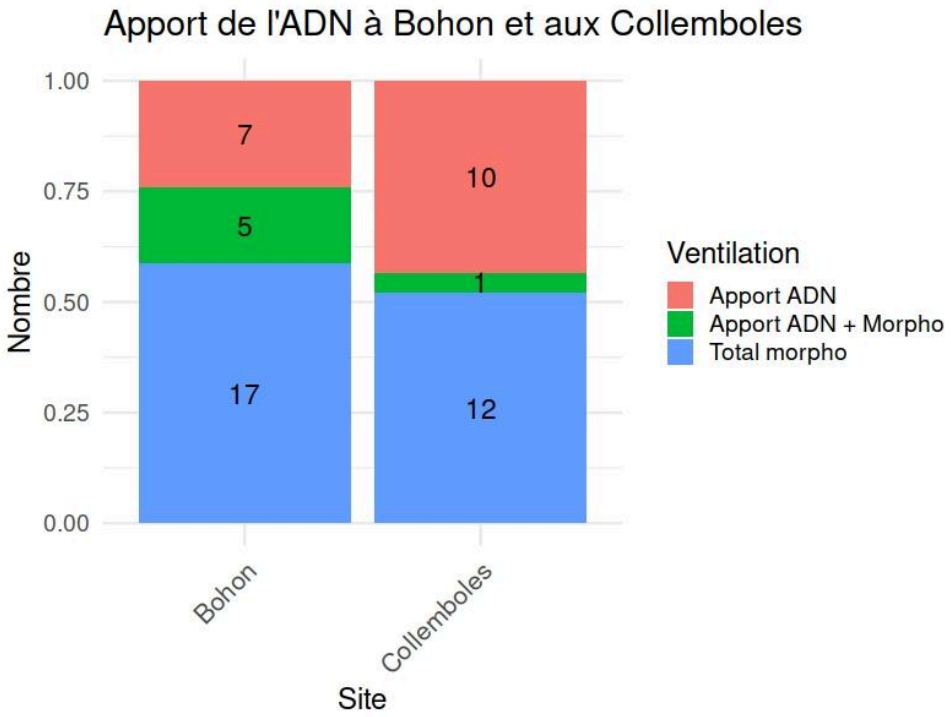


Figure 21. Proportion des taxons identifiés à l'espèce, au genre, à la famille ou à l'ordre par les méthodes morphologiques et/ou d'analyse ADN (barcoding et metabarcoding) pour les grottes de Bohon et des Collemboles.

Au total, entre 6 (Trou qui fume) et 65 (grotte du Fayt) taxons ont été identifiés à l'ordre ou jusqu'à l'espèce dans les 5 grottes test ainsi que les deux grottes visitées durant le stage de biospéologie (Fayt et Eprave. Figure 22).

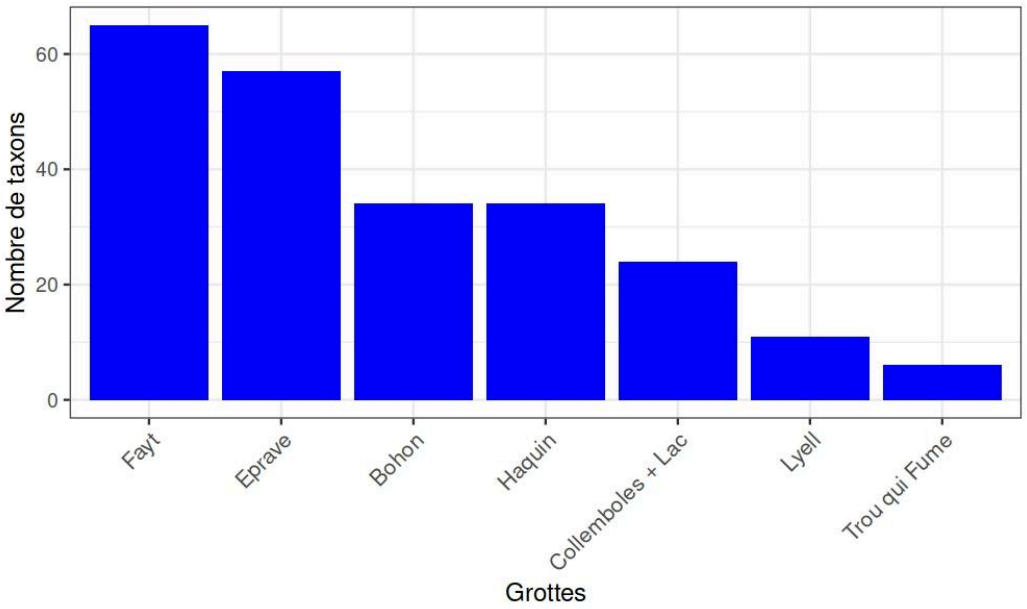


Figure 22. Nombre total de taxons identifiés (voir texte) dans 7 sites (5 grottes test + 2 grottes inventoriées en marge).

On a voulu distinguer le “niveau de troglobitude”, ou niveau d’association de l’organisme à l’habitat souterrain, pour chacun de ces taxons. Malgré la récolte d’une littérature abondante sur le sujet, de nombreux taxons ont un statut inconnu, soit parce que la littérature ne statue pas, soit parce que l’information n’est pas disponible car les taxons sont introuvables dans les listes (Figure 23). Ceci étant, on trouve, sans surprise, un nombre réduit d’espèces troglobies, à savoir :

- *Porrhomma rosenhaueri* (Arachnida) dans la grotte de l’Haquin
- *Litocampa hubarti* (Diplura) dans la grotte Lyell

La liste complète des taxons et de leurs statuts se trouve en annexe 16.

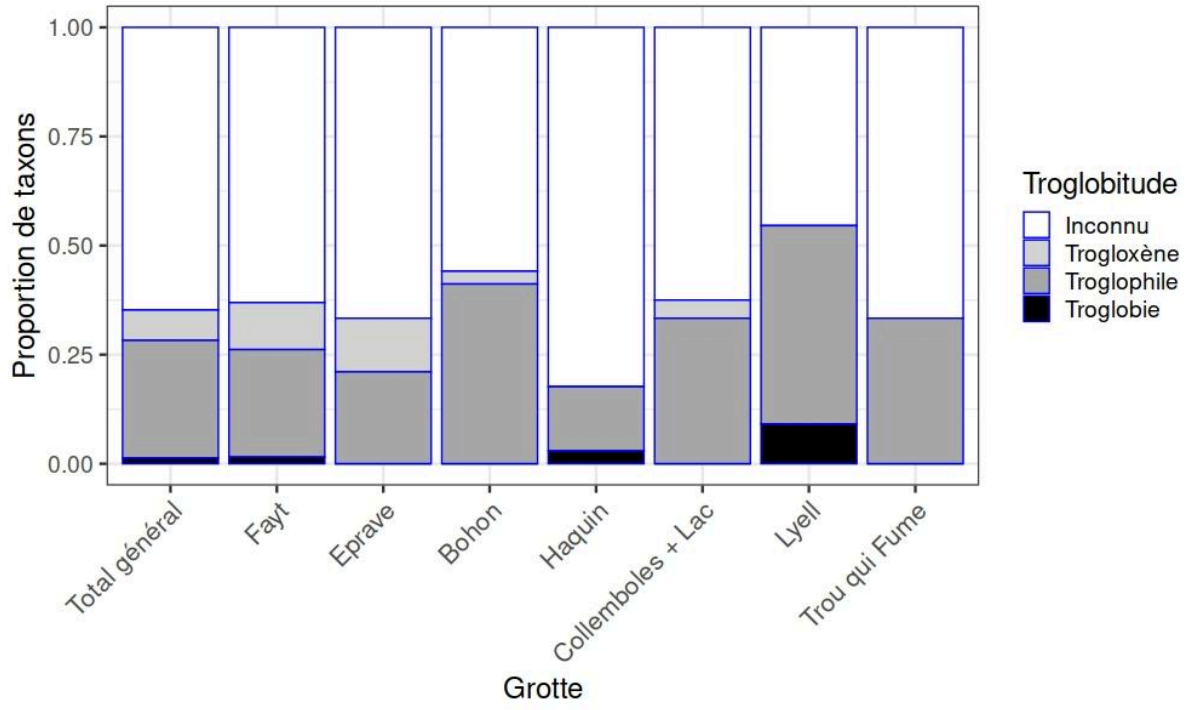


Figure 23. Proportions des niveaux de troglobitude associés aux taxons identifiés pour l’ensemble des sites et chaque grotte considérée individuellement. Une grande majorité des taxons n’ont pas de statut identifié (voir texte).

Plus de détails sur les résultats des analyses ADN sont à trouver dans l’annexe 15 ainsi que dans le petit article de synthèse de Nyssen et al. (2024) dans l’Eco Karst.

En conclusion, les analyses ADN des individus vivants récoltés sur site fonctionnent mieux que la tentative de trouver des traces d’ADN dans l’environnement (eau, terre, etc). Ce qui relativise fortement les perspectives de faciliter les inventaires par des prélèvements rapides sur site et analyse subséquente en laboratoire. On ne doit pas exclure cette option dans le futur lorsque les bases de données de correspondance entre les séquences ADN et les taxons seront plus étoffées.

En revanche, la capacité d’identification à l’aide de séquences ADN est intéressante. Les résultats pour des petits groupes assez méconnus tels que les archéognathes (lépismes), certains mollusques, des araignées, mais aussi différents groupes d’insectes ou encore des cloportes nous invitent à penser que cette technique pourrait être une aide substantielle aux identifications complexes et pour lesquelles il manque de spécialistes (ou de leur disponibilité!). Néanmoins, pour un tiers des échantillons, soit l’analyse ne donne aucun

résultat (pas d'ADN amplifié) soit le résultat n'est pas probant (trop faible certitude d'identification ou espèce identifiée qui ne correspond pas à celle récoltée).

Même si les explorations de techniques d'analyse d'ADN s'avèrent mitigées, on ne peut que souhaiter que des études et des récoltes de matériel biologique en Belgique et dans les régions limitrophes continuent à alimenter les bases de données pour ouvrir de meilleures perspectives d'étude des grottes dans le futur.

8. Méthodologie d'évaluation de l'état de conservation de l'habitat 8310

L'aire de répartition (Range) peut être facilement calculée sur base de la localisation géographique (shapefile) de l'ensemble des sites qui correspondent à la définition de l'habitat (voir début du point 8.1 ou partie 2 de l'annexe 4). La surface de l'habitat (Area) est estimée en multipliant par 4 le développement de chaque site (voir partie 2 de l'annexe 4 pour le détail).

La méthodologie décrite ci-dessous est une proposition de procédure standardisée pour l'évaluation de la partie "Structure et fonctions" de l'habitat 8310. La grotte est considérée dans son ensemble (écosystème, faune, géologie, relation à la surface etc). Les facteurs qui composent le schéma d'évaluation sont concrétisés autant que nécessaire et autant que possible.

Pour faciliter la mise en œuvre concrète, nous suggérons que le DEMNA développe un formulaire de saisie numérique uniforme dans lequel les listes de référence proposées sont prédéfinies.

8.1 Sélection de l'échantillon

Font partie de l'habitat 8310 toutes les cavités d'origine naturelle dans l'écorce terrestre, largement entourées de roche solide et remplies d'air, de sédiments ou d'eau, qui doivent avoir une taille minimale de cinq mètres de développement et permettre un accès humain. Les parties non exploitées des grottes touristiques peuvent également être considérées si de grandes portions du réseau ne sont pas accessibles aux visiteurs. La partie de la grotte aménagée pour les visiteurs doit être évaluée comme une pression, le cas échéant. Par conséquent, les cavités créées par les animaux (cavités d'arbres, terriers) et toutes les cavités créées par l'homme, comme les galeries de mines, les glacières, les carrières ou les puits, ne sont pas considérées comme faisant partie de l'habitat 8310. Néanmoins, elles peuvent présenter des conditions de vie identiques à celles des grottes naturelles et sont considérées, étudiées et documentées comme quasiment équivalentes dans la biospéologie moderne.

Dans l'idéal, au vu des échantillonnages menés dans les pays / régions voisines, une trentaine de grottes devraient être évaluées en Wallonie pour chaque période de rapportage de 6 ans. La sélection de l'échantillon (quels sites sont suivis) ne devrait pas se faire sur la base d'un simple tirage au sort, afin d'obtenir une image la plus diversifiée possible des types de grottes. Différents critères de sélection ont été proposés (voir point 5.1.2.) :

développement, présence d'eau, statut de protection, fermeture, technicité / difficulté d'accès, paysage environnant, infos biologiques pré-existantes (dont chauves-souris), fréquentation, proximité de la surface, géologie.

Les grottes devraient dans tous les cas posséder au moins une zone de transition, ou mieux encore, une région profonde, dans laquelle on peut s'attendre à trouver des espèces cavernicoles. Les abris-sous-roche sont donc exclus de l'étude également, ne correspondant pas à l'habitat 8310.

8.2 Schéma d'évaluation

Ce schéma d'évaluation a été élaboré au regard de l'expérience acquise tout au long de notre travail dans le cadre de ce marché. Il s'appuie sur les éléments rassemblés dans la littérature et synthétisés dans les différents chapitres de la synthèse bibliographique voir(annexe 4) ainsi que sur nos expérimentations propres dans les 5 grottes test. Malgré notre souhait de proposer d'emblée un outil d'évaluation "clé sur porte", il semble clair qu'une réévaluation de certains seuils et/ou des certains critères considérés sera nécessaire une fois que le nombre de sites évalués aura augmenté !

Le schéma d'évaluation que nous proposons se base sur 5 volets, à évaluer séparément pour chaque grotte et à chaque période de rapportage :

- Volet 1 : évaluation des paramètres abiotiques et structures (micro-habitats)
- Volet 2 : évaluation des paramètres biotiques (faune) - espèces animales cavernicoles hors chiroptères
- Volet 3 : évaluation des paramètres biotiques (faune) - inventaire des espèces de chauves-souris
- Volet 4 : évaluation des menaces liées aux activités en surface
- Volet 5 : évaluation des menaces liées aux activités en souterrain

Ces 5 volets sont ensuite agrégés pour donner un état de conservation final (A, B ou C) pour chaque site.

Volet 1 : évaluation des paramètres abiotiques et structures (micro-habitats)

Ce volet est évalué selon 2 critères, un critère de structure et un critère visant à mesurer la stabilité de la température (dont la modification de la variabilité exprimerait une modification majeure du fonctionnement de la grotte). Les deux critères sont évalués séparément pour donner une évaluation finale : A, B ou C. En cas de différence entre les critères, on gardera la moins bonne des deux notes comme note finale.
Nous avons considéré hasardeux de déterminer des valeurs seuil pour les paramètres physico-chimiques sans une étude préalable sur de nombreux sites. Trois paramètres (conductivité et concentration en nitrates dans l'eau, ainsi que le taux d'oxygène atmosphérique) sont considérés dans le volet 5 "menaces".

1A : Structure micro-habitat

Les micro-habitats retenus pour la méthodologie sont subdivisés en deux parties : la zonation et les micro-habitats proprement dits. Pour la première partie, les 3 zones potentiellement

rencontrées sont caractérisées par 3 niveaux de présence d'eau (soit 9 combinaisons). La seconde partie reprend 2 ou 3 sous-catégories pour les types de roche, d'éboulis, de sédiment, de spéléothème, d'eau stagnante et d'eau courante, soit potentiellement 16 micro-habitats distincts. La combinaison de ces deux parties pourrait donc porter à 25 éléments de structure (tableau 4) au total.

La note du volet 1 (première partie) est déterminée comme suit :

- A : > 15 micro-habitats
- B : 10-15 micro-habitats
- C : < 10 micro-habitats

Partie I: zonation	
Zones	**Présence d'eau** (hors eau stagnante et courante)
E: Entrée I: Intermédiaire (= Transition) P: Profonde	1: Sec 2: Humide 3: Détrempé
Partie II: micro-habitats	
Roche	A: Lisse B: Poreuse / avec aspérités C: Fissurée
Eboulis	A: Cailloux < dm^3 B: Blocs > dm^3
Sédiment	A: Argile B: Gravier fin / sable C: Gravier grossier
Spéléothème	A: Stalagmite / Stalactite / Colonne B: Coulée C: Plancher
Eau stagnante	A: Regard sur la nappe phréatique B: Bassin/Flaque (minimum 1 m^2 de surface cumulée) C: Gour (retenue d'eau avec calcification)
Eau courante	A: Ruissellement B: Ruisseau / Rivière souterraine

Tableau 4. Liste des éléments de micro-habitats du volet 1 de la méthodologie.

1B : Paramètres physico-chimiques : modification des profils de température

Afin de mesurer objectivement une éventuelle modification de la structure d'une grotte, outre des menaces considérées au volet 5, nous proposons de mesurer l'évolution de la stabilité des conditions de température de la zone profonde, laquelle a pour caractéristique intrinsèque d'être d'une très grande stabilité. La méthode consiste donc à comparer des profils de température mesurés au moyen de loggers de mesures en continu entre deux années de mesure, consécutives ou non. Une série de mesures doit être effectuée durant une année complète en, minimum, une localisation dans la grotte toujours au même endroit. L'opérateur déterminera une localisation adéquate dans la zone profonde (càd suffisamment accessible et, par définition, pas directement influencée par les conditions extérieures) ou à défaut dans la zone intermédiaire. On calcule la moyenne et l'écart-type de la distribution de toutes les valeurs de température sur l'année pour en déduire le coefficient de variation.

Le coefficient de variation est calculé selon la formule suivante :

$$CV\% = (SD/M)*100$$

où :

- SD = écart-type de la distribution des valeurs de température sur une année complète
- M = moyenne de la distribution des valeurs de température sur une année complète.

La note attribuée est basée sur la différence entre le coefficient de variation calculé pour l'année 1 et le coefficient de variation calculé de l'année 2 :

- A : différence de moins de 5%
- B : différence entre 5 et 10 %
- C : différence de plus de 10 %

Si la température est mesurée à plusieurs endroits (dans les zones intermédiaires et profondes) d'une grotte, on évalue la différence du coefficient de variation sur chaque point de mesure et on garde la note la moins bonne.

Exemple :
La série de mesures de températures obtenues dans la grotte Lyell (Figure 19) dans la zone profonde (nommée "fond, galerie inférieure") est comparée à celle de la zone intermédiaire ("milieu, grande salle au-dessus du grand mur") à titre d'illustration de la méthode.

Zone profonde
Moyenne = 10.21349 °C
Ecart-type : 0.02040796
CV_1% = 0.20%

Zone intermédiaire
Moyenne = 9.799415 °C
Ecart-type = 0.4377961
CV_2% = 4.47%

La différence entre CV_1 et CV_2 est inférieure à 5% => **la note est "A"** dans ce cas de figure.

En option : Il pourrait être décidé de vérifier selon la même procédure la variabilité des mesures de CO_2. On travaillera alors aussi avec des loggers qui prennent automatiquement des mesures sur le long terme, aux mêmes endroits. On comparera la variabilité de la même manière que pour la température.

Volet 2 : évaluation des paramètres biotiques (faune) - espèces animales cavernicoles hors chiroptères

L'évaluation de ce volet s'appuie sur le nombre d'espèces (ou de taxons) présentes pendant la période de rapportage dans le site. Le degré de liaison aux grottes (statut troglobie/phile/xène) des espèces animales cavernicoles identifiées peut être déterminé au moyen de la liste des animaux cavernicoles (annexe 5), qui pourra être complétée avec le temps et l'amélioration des connaissances. Étant donné qu'un certain nombre d'espèces ne se trouvent pas dans la liste ou ne comporte pas de statut troglobie/phile/xène dans cette liste ou encore que celui-ci est inconnu au moment de l'évaluation et qu'un certain nombre d'échantillons n'auront pas pu être identifiés jusqu'à l'espèce (ce qui empêche de donner un statut à ce taxon supra-spécifique), le dernier critère compte le nombre de taxons sans statut ou identifiés uniquement à un niveau supra-spécifique. Cet indicateur vise à évaluer la biodiversité globale du site. Il est de ce fait important de noter qu'on ne compte ici que les

taxons supra-spécifiques pour lesquels aucune espèce ou aucun autre taxon n'en fait partie. Par exemple, on ne comptera le taxon "famille des Arrhopalitidae" que si aucun genre ou espèce de cette famille n'a été également observé dans le site". De même les taxons déjà comptés dans les autres critères n'entrent pas en ligne de compte ici.

L'inventaire des espèces de fougères et de plantes à fleurs, ainsi que des mousses et des lichens à l'entrée de la grotte n'a aucune influence sur l'habitat, ces espèces ne sont pas considérées. Les champignons, les bactéries et les organismes unicellulaires ne sont pas non plus pris en compte, bien qu'ils puissent naturellement avoir un lien direct avec l'habitat "grotte". Toutefois, la détermination précise des espèces est très difficile et ne peut guère être maîtrisée dans le cadre de ce monitoring. De même, étant donné que les chiroptères sont évalués à part dans le volet 3, ils ne sont pas considérés ici.

Inventaire des espèces (espèces cavernicoles hors chiroptères)	**A**	**B**	**C**
Espèces trogloxènes A : ≥ 8 espèces B : 4 – 7 espèces C : < 4 espèces		X	
Espèces troglophiles A : ≥ 8 espèces B : 4 – 7 espèces C : < 4 espèces			X
Espèces troglobies A : > 1 espèce B : 1 espèce C : aucune			X
Espèce endémique présente A : Oui			
Nombre de taxons au statut inconnu (ou supra-spécifique) A : ≥ 20 espèces B : 10-19 espèces C : < 10 espèces		X	
Nombre d'évaluations A, B, C	0	2	2
Évaluation globale volet 2 : on retient la catégorie A, B ou C qui a le plus grand score. En cas d'égalité, l'expert choisit (parmi les plus grands scores) la catégorie qui correspond le mieux selon les définitions ci-contre.	B	A : Habitat particulièrement riche en espèces avec micro-habitats diversifiés et/ou présence d'espèces rares ou endémiques. B : Présence d'espèces représentatives de ce type de cavité C : Peu d'espèces spécifiques à ce type de grotte	

Tableau 5. Tableau d'évaluation du volet 2 : ce qui est écrit en bleu est un exemple.

Volet 3 : évaluation des paramètres biotiques (faune) - inventaire des espèces chauves-souris

L'évaluation de ce volet s'appuie sur le nombre d'espèces, le nombre d'individus observés dans le site pendant la période de rapportage et sur l'utilisation (pendant la même période du site) comme site de reproduction. Le nombre total d'individus est le nombre maximum d'individus observés pendant un comptage dans le site en période hivernale.

Inventaire des espèces (chauves-souris)	**A**	**B**	**C**
Nombre d'espèces de l'annexe II A : > 2 espèces B : 1-2 espèce C : 0 espèce			X
Nombre d'espèces hors annexe II A : > 3 espèces B : 1 - 3 espèces C : 0 espèce			X
Nombre total d'individus A : > 10 individus B : 3 - 10 individus ou preuve indirecte (par exemple crottes) C : < 3 individus		X	
Utilisation avérée du site comme gîte de reproduction estival A : oui			
Nombre d'évaluations A, B, C	0	1	2
Évaluation globale volet 3 : on retient la catégorie A, B ou C qui a le plus grand score. En cas d'égalité, l'expert choisit (parmi les plus grands scores) la catégorie qui correspond le mieux selon les définitions ci-contre.	C	A : Gîte à chauves-souris d'importance supérieure et durable - riche en espèces, en nombre d'individus et/ou présence d'espèces rares à l'échelle locale, gîte de reproduction. B : Gîte de chauves-souris d'importance moyenne ou faible - présence d'espèces représentatives de ce type de cavité C : Présence de chauves-souris inférieure à la moyenne par rapport au potentiel de la cavité - peu d'espèces spécifiques à ce type de grotte	

Tableau 6. Tableau d'évaluation du volet 3 : ce qui est écrit en bleu est un exemple.

Volet 4 : évaluation des menaces en surface

Dans le cas de l'habitat 8310, il semble vraiment incontournable de prendre en compte l'ensemble des menaces extérieures au site dans l'évaluation de son état de conservation. Nous avons travaillé dans ce cadre tout à fait exploratoire avec un mémorant, F. Thirion, qui a testé une série d'hypothèses et exploré pas mal de pistes pour finalement proposer une méthodologie d'évaluation, détaillée en annexe 11 et décrite en résumé ci-dessous. La lecture des résultats sur les 5 grottes tests laisse toutefois penser que cet essai va devoir être affiné à l'usage et testé sur un plus grand nombre de sites en vue d'affiner la méthode, (peut-être de la simplifier) pour que les résultats reflètent au mieux le degré réel de menace. Une des pistes d'amélioration pourrait être de voir si le fait de travailler sur une surface différente (plus petite ?) pour une grotte qui n'est pas traversée par de l'eau courante serait meilleure. Une autre piste à essayer serait de paramétrer autrement certains coefficients, de supprimer certains critères ou d'en rajouter (par exemple, si une forêt n'a pas ou peu d'impact, son exploitation peut, elle, être un élément très perturbant... même pour le milieu souterrain. En tenir compte dans le calcul pourrait être pertinent). Ce volet 4 doit donc plus être lu comme un outil d'aide à la décision que comme une méthodologie réellement éprouvée.

L'analyse des menaces potentielles qui se trouvent en surface des grottes étudiées se base sur une approche en trois étapes.

1. Délimitation de la zone d'étude reprenant la totalité de la zone de percolation ou d'alimentation de la cavité. Au départ d'un schéma des galeries géoréférencé et des courbes de niveau, on dessine le bassin d'alimentation de l'ensemble du site en coupant sur les lignes de partage d'eau (lignes de crête), avec pour point bas le développement de la cavité. Dans le cas où la grotte est traversée par un cours d'eau, une deuxième zone d'étude prend en compte le bassin d'alimentation du cours d'eau jusqu'à 10 km en amont de la cavité.

2. Analyse de l'occupation du sol et des menaces au sein de la zone d'étude : on se base pour cela sur différentes couches cartographiques existantes, dont "Ecotope", et d'autres sources de données potentielles et on vérifie ensuite manuellement l'exactitude et la complétude de l'information. L'objectif est d'obtenir un shapefile avec l'ensemble de la zone d'étude cartographiée et une classe d'occupation du sol attribuée à chaque polygone. Pour les menaces ponctuelles, un shapefile avec un point pour chaque élément est nécessaire.
Ces classes sont regroupées en 4 secteurs :

- **agricole** : champs (Ch), prairies de fauche (Pr1), prairies pâturées (Pr2) (ou prairies indéterminées (Pr)), cultures de sapin de Noël (SN)
- **forestier** : tout type de forêts confondues (F)
- **industriel** : présence d'une usine, carrière, site de pompage des eaux souterraines, zone de dépôts
- **urbain** : résidences et voiries (routes, chemins de fer, chemins)

Pour les secteurs agricoles et forestiers, ainsi que pour les voiries, on calcule la surface occupée par chaque secteur reportée à la surface totale du bassin d'alimentation (pour obtenir un pourcentage surfacique). Pour les secteurs industriels et pour les résidences, on analyse la distance entre l'activité et la partie de la grotte la plus proche.

3. Calcul du niveau de risque lié à l'activité en surface : l'indice de risque de chacun des 4 secteurs est calculé à l'aide d'une formule qui prend en compte l'importance de l'activité (superficie et impact environnemental) ou la situation géographique de l'activité par rapport à la grotte (proximité et impact environnemental). L'indice de risque global d'une cavité correspond à la somme des indices de chaque secteur.

Formule générale de caractérisation de l'indice de risque pour une grotte :

Indice de risque (bassin d'alimentation de la grotte) = Secteur agricole + Secteur forestier + Secteur industriel + Secteur urbain

Lorsqu'une rivière traverse la grotte, une deuxième analyse de l'activité est réalisée à l'échelle du bassin versant du cours d'eau, de la même manière que pour le bassin d'alimentation de la grotte. L'indice final du bassin versant est multiplié par un coefficient basé sur la qualité de l'eau : 0,5 si elle est bonne, 1 si elle est moyenne et 1,5 si elle est mauvaise. Ces valeurs de qualité de l'eau sont disponibles notamment auprès des contrats rivières. La formule à appliquer pour le bassin versant est donc la suivante :

Indice de risque (bassin versant cours d'eau) = (Secteur agricole + Secteur forestier + Secteur industriel + Secteur urbain) x coefficient de la qualité de l'eau.

Dans ce cas, l'indice de risque final pour la grotte la moyenne des deux, soit
Indice de risque (grotte) = (Indice de risque du bassin d'alimentation de la grotte + Indice de risque du bassin versant cours d'eau) / 2

L'interprétation de l'indice de risque est le suivant :

Risque nul	Risque faible	Risque modéré	Risque élevé
[0 - 0.5[	[0.5 - 1.5[	[1.5 - 2.5[	≥ 2.5
A	A	B	C

Tableau 7. Interprétation de l'indice de risque évalué dans le volet 4, avec note finale à considérer pour chaque valeur d'indice.

Le calcul de chacun des secteurs est détaillé ci-dessous.

1. **Secteur agricole** = $(5 \times \%SCh)+(P \times \%SP)+(5 \times \%SSN)$

avec

- %SSN le pourcentage de la surface du bassin d'alimentation occupé par les cultures de sapins de Noël
- %SCh le pourcentage de la surface du bassin d'alimentation occupé par les cultures
- %SP pourcentage de la surface du bassin d'alimentation occupé par les prairies (tout type de prairies confondues)
- La formule prairie (P) se calcule comme suit : $P=(2 \times \%SPr1)+(3 \times \%SPr2)+(2 \times \%SPr)$ avec %SPri la proportion de surface occupée par les prairies de type Pri par rapport à la surface totale des praires dans la zone d'étude (Pr1 = prairie de fauche, Pr2=prairie pâturée, Pr=prairie indéterminée).

2. **Secteur forestier** = $(1 \times \%SF)$

avec %SF la proportion totale de forêts dans le bassin d'alimentation.

3. **Secteur industriel** = où $5 \times \sum_{i=1}^{N} \frac{Ni \times Coefi}{N}$

avec

- Ni chaque d'infrastructure industrielle telle que les sites de pompage (captages), les sites de l'industrie extractive (carrières en activité et anciens sites d'extraction),
- N le nombre total d'infrastructures industrielles
- Coef i défini comme suit :
    - Coef1 = 1, lorsque l'infrastructure industrielle se trouve à une distance de 0 à 150m du développement de la cavité
    - Coef2 = 0.7, lorsque l'infrastructure industrielle se trouve à une distance de 150 à 300m du développement de la cavité
    - Coef3 = 0.5, lorsque l'infrastructure industrielle se trouve à une distance plus de 300m du développement de la cavité

4. **Secteur urbain =** $V + R$

où R est la formule résidences et V est la formule voiries.

La formule voiries se calcule comme suit : $V = (2 \times \%SV)$
avec $\%SV$ le pourcentage de la surface du bassin d'alimentation occupé par voiries (chemins, routes, chemins de fer).

La formule résidences se calcule comme suit : $R = \sum_{x=1}^{N} N \times Rx$

avec

- N le nombre de villages
- Rx l'indice de risque associé au xième village, calculé comme suit Rx = Ri x Rh x Rd
  avec
  - Ri = 2 dans le cas de la présence d'un assainissement collectif dans le village concerné et Ri = 3 dans le cas de l'assainissement autonome/transitoire
  - Rh = 0.5 lorsque l'ensemble des habitations compte un nombre d'équivalents habitants inférieur ou égal à 2000, Rh = 0.7 lorsque l'ensemble des habitations compte un nombre d'équivalents habitants compris entre 2000 et 10000 et Rh = 0.8 lorsque l'ensemble des habitations compte un nombre d'équivalents habitants supérieur ou égal à 10000.
  - Rd = 1 lorsque les habitations se trouvent à une distance de moins de 50 mètres du développement de la grotte, Rd = 0.8 lorsque les habitations se trouvent à une distance entre 50 et 200 mètres du développement de la grotte, Rd = 0.6 lorsque les habitations se trouvent à une distance de plus de 200 mètres du développement de la grotte.

Volet 5 : évaluation des menaces en souterrain

Le tableau 8 fournit la méthodologie à suivre pour évaluer les menaces. Pour chaque ligne de ce tableau, si pertinent, on évalue quel est le statut A, B ou C selon que (A), la menace est absente ou qu'aucune atteinte au milieu n'est constatée en lien avec la pression évaluée, (B) qu'une faible atteinte à l'habitat découle de la pression évaluée ou (C) que cette pression / menace gènre une forte atteinte sur l'habitat. Une fois ces évaluations individuelles effectuées, on retient la catégorie A, B ou C qui a été obtenue le plus souvent. En cas d'égalité, l'expert choisit la catégorie qui correspond le mieux à son appréciation.

Concernant les mesures abiotiques, dans l'idéal ces paramètres sont à mesurer à minimum 3 points différents du site mais ce nombre doit être adapté en fonction de la taille du site (il s'agit de multiplier les points de mesure si le réseau est grand) et des micro-habitats présents.

Évaluation des menaces et pressions sur le milieu	**A** Menace absente ou aucune atteinte constatée	**B** Faible atteinte à l'habitat	**C** Forte atteinte sur l'habitat
Impact de la fréquentation humaine de la grotte (en été et en hiver)	X		
Foyer, bivouac, urbex, geocaching		X	
Travaux souterrains, fouilles actives, aménagements (béton, escaliers, lampes …), remblais			
Dépôts de déchets, apports anthropiques, apport de polluants, graffitis		X	

Exploitation, prélèvement de matériaux (dont minéraux, concrétions), prélèvements importants de faune	X		
Présence d'espèces exotiques envahissantes			X
Mesure d'au moins 1 valeur inadéquate de paramètres abiotiques : conductivité de l'eau, nitrates dans l'eau (courante, de percolation, stagnante), ou proportion d'oxygène dans l'air Conductivité de l'eau ● C : > 900 µS Nitrates dans l'eau (courante, de percolation, stagnante) : ● A : < 15 mg/l ● B : 15 - 35 mg/l ● C : > 35 mg/l Proportion d'Oxygène gazeux : ● A : >20% ● B : 17-20% ● C : < 17% Cote finale : Si au moins 1 C => C, si au moins 1 B => B si uniquement des A => A.		X	
Présence d'un balisage spéléo, d'aménagements visant à protéger le milieu, existence de règles de visites, d'un système de fermeture bien réalisé … A : oui B : partiellement C : non			X
Présence d'un statut de protection A : CSIS ou Réserve Naturelle B : Natura 2000 ou site classé C : aucun	X		
Nombre d'évaluations A, B, C	3	3	2
Évaluation globale volet 5 : on retient la catégorie A, B ou C qui a le plus grand score. En cas d'égalité, l'expert choisit (parmi les plus grands scores) la catégorie qui correspond le mieux selon les définitions ci-contre.	B	A = pressions en grande partie inexistantes B = pressions modérées sans impact significatif C = pressions très prononcées avec un impact significatif (p. ex. forte perturbation, dépôts, …)	

Tableau 8. Tableau d'évaluation du volet 5 : ce qui est écrit en bleu est un exemple.

Attribution de la note finale, sur base des notes des 5 volets

Une fois les 5 volets évalués, on trie les 5 notes (A, B ou C correspondant aux 5 volets) et on en déduit une note finale pour chaque grotte, selon le tableau ci-dessous.

Note des 5 volets	nombre de A	nombre de B	nombre de C	Note finale
AAAAA	5	0	0	A
AAAAB	4	1	0	A
AAAAC	4	0	1	A
AAABB	3	2	0	A
AAABC	3	1	1	A
AAACC	3	0	2	B
AABBB	2	3	0	B
AABBC	2	2	1	B

AABCC	2	1	2	B
AACCC	2	0	3	C
ABBBB	1	4	0	B
ABBBC	1	3	1	B
ABBCC	1	2	2	C
ABCCC	1	1	3	C
ACCCC	1	0	4	C
BBBBB	0	5	5	B
BBBBC	0	4	1	B
BBBCC	0	3	2	B
BBCCC	0	2	3	C
BCCCC	0	1	4	C
CCCCC	0	0	5	C

Tableau 9. Méthode pour agréger les résultats des 5 volets en une note finale pour le site.

8.3 Application de la méthodologie d'évaluation aux 5 grottes test

La méthodologie d'évaluation a été appliquée aux 5 grottes test. Le détail des calculs et des espèces considérées pour les volets 1, 2, 3 et 5 peut être consulté dans l'annexe 17. Le détail du calcul pour le volet 4 se trouve dans l'annexe 11.

	Collemboles (+Lac)	Trou d'Haquin	Grotte de Lyell	Grotte de Bohon	Trou-Qui-Fume
Volet 1 : paramètres abiotiques	B	A	B	A	A
Volet 2 : paramètres biotiques hors chiros	B	A	B	C	C
Volet 3 : paramètres biotiques chiros	B	C	A	A	A
Volet 4 : menaces en surface	C	C	C	B	B
Volet 5 : évaluation des menaces en souterrain	A	B	A	B	A
Note globale	**B**	**B**	**B**	**B**	**A**

Tableau 10. Application de la méthodologie aux 5 grottes test.

9. Agenda du projet

Les étapes-clés suivantes attestent de la progression de la mission tout au long du projet.

- 20211026 - 20211030 : participation au 6th EuroSpeleo Protection Symposium (DE) "*Assessing, monitoring and protecting cave biotopes and geotopes through Natura 2000 or similar programs in Europe*"
- 20211111- 20211114 : participation au stage de bio-spéologie, organisé par l'UBS à Rochefort
- 20220118 : réunion de lancement du marché DNF - DEMNA - Partenaires (MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst)
- 20220124 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20220225 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20220307 : réunion avec les responsables du rapportage article 17 pour la France (MC. Lankester, D. Caillohl)
- 20220309 : réunion avec les responsables du rapportage article 17 pour le Luxembourg (A. Weigand)
- 20220310 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20220319 : présentation du travail en cours et appel à témoignages/retours d'expériences lors des rencontres chiroptérologiques de Bourges (FR)
- 20220328 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20220328 : mail d'état des lieux de la mission envoyé au DEMNA - SPW
- 20220428 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20220506 : réunion avec le responsable du rapportage article 17 pour la Flandre (S. De Saeger)
- 20220617 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20220816 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20220915 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- du 20220919 au 20230113 : stage de François Thirion sur la caractérisation de caractérisation des sites en surface et identification des menaces qui en découlent
- 20221006 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20221011 : visite sur le terrain (en surface uniquement) des sites test pour évaluer la situation en surface : Haquin, Lyell, Collemboles et Bohon.
- 20221020 : visite sur le terrain (en surface uniquement) des sites test pour évaluer la situation en surface : Trou-Qui-Fume.
- 20221027 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20221028 : réunion d'échange organisée par le cabinet Tellier sur les statuts de protection des sites souterrains
- 20221129 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230104 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230118 : première visite de la grotte de Bohon dans le contexte de l'inventaire chauves-souris
- 20230131 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230201 : première visite de la grotte de Lyell dans le contexte de l'inventaire chauves-souris
- 20230203 : rencontre de Michel Dethier pour discuter de la partie analyses biotiques
- 20230209 : réunion avec l'équipe de l'ULB spécialisée dans l'étude du milieu souterrain (JF. Flot, C. Chauveau, D. Weber) pour évaluer la possibilité d'une collaboration pour les analyses ADN
- 20230210 : rencontre avec Johan Michaux (ULg) pour évaluer la possibilité d'une collaboration pour les analyses ADN (analyses biotiques)
- 20230217 : première sortie de terrain en équipe au Trou d'Haquin
- 20230220 : comité d'accompagnement 8310 DEMNA-DNF-Partenaires du projet
- 20230221 : sortie de terrain Trou d'Haquin
- 20230227 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230317 : sortie de terrain Grotte de Bohon
- 20230320 : sortie de terrain Grotte de Bohon
- 20230329 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230414 : sortie de terrain Grotte Lyell et Grotte des Collemboles
- 20230418 : sortie de terrain Grotte Lyell et Grotte des Collemboles
- 20230420 : sortie de terrain Trou qui Fume
- 20230425 : sortie de terrain Trou qui Fume
- 20230427 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230509 : réunion avec J. Michaux pour affiner les questions d'analyses ADN

- 20230516 : remise du TFE de François Thirion
- 20230517 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230609 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230619 : présentation défense du TFE de François Thirion
- 20230809 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230823 : journée de tri des échantillons récoltés en grotte en équipe
- 20230824 : réunion avec J. Michaux pour envisager les aspects pratiques des analyses ADN
- 20230907 : comité d'accompagnement 8310 DEMNA-DNF-Partenaires du projet
- 20230908 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20230911 : récupération du matériel de collecte pour les analyses ADN au laboratoire de l'ULg
- 20230915 : sortie de terrain Grotte de Bohon et Grotte des Collemboles/Trou du Lac
- 20230917 : sortie de terrain Grotte de Bohon et Grotte des Collemboles/Trou du Lac
- 20231006 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20231110 : réunion de travail des partenaires MaSePaS - CWEPSS - Ecofirst
- 20240822 : sortie de terrain Trou d'Haquin
- 20240827 : sortie de terrain Grotte de Bohon et Grotte des Collemboles
- 20240830 : sortie de terrain Grotte de Lyell
- 20240912 : sortie de terrain Trou d'Haquin
- 20250207 : sortie de terrain Trou qui Fume
- 20250217 : réunion avec le DEMNA - restitution finale des délivrables, formation, échanges

10. Annexes

Les annexes sont toutes téléchargeables ici :
https://drive.google.com/drive/folders/1SANH5cVYfgBn-ByNxtbl6frSyBc_fDut?usp=sharing

- Annexe 1 : liste complète des références dans la base de données bibliographique en date du 03-02-2025
- Annexe 2 : Document de prise en main de l'outil Zotero (tutoriel)
- Annexe 3 : Compte-rendus des réunions bilatérales avec la France, le Luxembourg, et la Flandre au sujet du monitoring article 17.
- Annexe 4 : Compilation des synthèses bibliographiques
- Annexe 5 : liste taxonomique complète des espèces cavernicoles potentiellement observables en Belgique
- Annexe 6 : Base de données biologiques, en date du 03-02-2025
- Annexe 7 : Tableau de correspondance entre les cavités citées par LERUTH 1939 et l'Atlas du Karst Wallon
- Annexe 8 : Carnet des Espaces Naturels n°18 : Grottes, Carrières et Autres cavités, publication Ardenne & Gaume
- Annexe 9 : Tableau présentant les différents critères de sélection pour les 5 cavités tests
- Annexe 10 : Offre de stage visant la caractérisation du paysage autour de 5 grottes en Wallonie, identification des menaces sur le milieu souterrain
- Annexe 11 : Travail de fin d'étude de François Thirion - Caractérisation de l'activité en surface des cavités souterraines naturelles afin d'évaluer leur impact sur l'état de conservation de ces grottes en Wallonie
- Annexe 12 : Mesures abiotiques réalisées dans les grottes test
- Annexe 13 : Donnes biologiques récoltées dans les 5 grottes tests, avec identification morphologique
- Annexe 14 : Données biologiques récoltées dans le cadre du stage de biospéologie donné par J. et B. Lips

- Annexe 15 : détail est résultats des analyses ADN réalisées sur les prélèvements dans 2 grottes test.
- Annexe 16 : Synthèse des données de faune (ADN + morpho) dans les 7 sites étudiés
- Annexe 17 : Détail de l'application de la méthodologie aux grottes test