UCLouvain

AGRO LOUVAIN

Faculté des bioingénieurs

Proposition d'un protocole simplifié pour le programme de sciences participatives Lichens GO

Autrice : Héléna Snoeck

Promoteurs : Yannick Agnan (ELIE) & Hugo Counoy (ELIE)

Lecteur·ices : Caroline Michellier (ELIE) & Guillaume Lobet (ELIA)

Année académique 2025-2026

Mémoire de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de Bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement

Remerciements

Je souhaite, avant tout, remercier tout particulièrement mon promoteur, Yannick Agnan, pour son accompagnement tout au long de cette année. Grâce à lui, j'ai pu découvrir un sujet passionnant et, grâce à sa disponibilité, ses conseils et sa bienveillance, j'ai pu mener à bien ce travail qui marque la fin de mon parcours académique à l'UCLouvain.

Je remercie également mon co-promoteur, Hugo Counoy, pour son aide précieuse, notamment dans la préparation des tests, sa présence lors des premiers appels avec les participants ainsi que son implication dans la réalisation du scénario de référence.

Un grand merci à toute l'équipe gravitant autour du programme Lichens GO qui a pris le temps d'échanger avec moi au début du projet et de me sensibiliser au contexte et aux enjeux de ce travail, en particulier Laure Turcati et Emma Verron (Sorbonne Université) ainsi que Vincent Chassany et Simon Benateau (VNE).

Merci également à l'équipe de Scienceinfuse : Sandrine Kivits et Adèle De Bont, d'une part pour le grand intérêt qu'elles ont porté à mon travail et, d'autre part, pour l'opportunité qu'elles m'ont offerte de pouvoir animer avec elles une activité Lichens GO dans un cadre scolaire.

Je suis également reconnaissante envers Françoise Peyrissat et Cécile Lambert pour le temps consacré à nos échanges, leurs avis et propositions éclairés en tant que grandes contributrices au programme Lichens GO, ainsi que leur participation aux tests des scénarios simplifiés. J'en profite pour remercier l'ensemble des testeurs ayant pris part aux essais à distance notamment Cécile Bramoullé, Murielle Lestang, Yves Cordon, ainsi que les testeurs à Louvain-la-Neuve : Morgane Clicque, Thomas Schoonjans, Maud Uhoda Lomry, Aude Mahy, Amandine Raucq, Maxime Buron, Joachim Van Hauwaert, Fabien Dierckx, Noémie Chaineux, Charlotte Chantraine, Cédric de Vinck, Robert Hermans, Félix Mormino, Aude Polmans, Guillaume Monseu, Marine Lefebvre, Nicolas Scauflaire, Noah Trenchant, Mélinda Afram, Gwenaëlle Moray, Emeline Lombardo, ainsi que les étudiants de BAC 2 AESI sciences de la classe de Madame Feys.

Je remercie également toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, au bon déroulement de ce projet, notamment celles qui ont partagé leur expérience à travers les enquêtes et les réunions.

Merci à Caroline Michellier et Guillaume Lobet d'avoir accepté de faire partie de mon jury.

Merci enfin à tous mes amis pour tous les moments partagés durant ces années, qui ont rendu ce parcours académique plus enrichissant. Une pensée particulière pour Laure et Alexia, dont les échanges et le soutien m'ont aidée à avancer tout au long de la rédaction de ce mémoire.

Enfin, je souhaite remercier ma famille pour son soutien constant. Mes parents, pour leur écoute, leurs encouragements, leurs relectures attentives et leur participation aux tests du protocole. Mes grands-parents, qui répondent toujours présents pour m'envoyer un article intéressant. Et ma sœur, Salomé, pour qui les sciences sont obscures, mais qui a toujours cherché un moyen de me soutenir et de m'aider, notamment en RGPD et en français.

CRediT

CRediT	Héléna Snoeck	Contributeur·ices*	Intelligence artificielle
Conceptualisation	X	YA, HC, LT, VC, SB, EV	
Méthodologie	X	YA, HC, LT, FP, CL	
Investigation	X	HC, Scienceinfuse (SK, AD)	
Analyse formelle	X		X
Validation	X	HC	
Rédaction – version originale	X		
Rédaction – révision et édition	X	YA, HC	X
Visualisation	X		X
Supervision		YA, HC	

*Yannick Agnan (YA), Hugo Counoy (HC), Laure Turcati (LT), Vincent Chassany (VC), Simon Benateau (SB), Emma Verron (EV), Françoise Peyrissat (FP), Cécile Lambert (CL), Sandrine Kivits (SK), Adelaïde De Bont (AD)

La conceptualisation de l'idée de recherche principale ainsi que la formulation des objectifs ont été réalisées conjointement avec Yannick Agnan et Hugo Counoy, superviseurs de ce travail, mais également grâce à l'intervention, lors d'un appel vidéo, d'autres personnes impliquées dans le programme Lichens GO : Laure Turcati et Emma Verron (Sorbonne Université), ainsi que Vincent Chassany et Simon Benateau (Muséum national d'histoire naturelle).

La méthodologie a également pu être discutée avec plusieurs contributeurs, notamment en ce qui concerne la conception d'enquêtes revues par Yannick Agnan, Hugo Counoy et Laure Turcati, mais aussi les choix de simplification et la conception de scénarios, pour lesquels l'avis de Françoise Peyrissat et Cécile Lambert (participantes actives au programme) a été précieux. Finalement, l'aide de l'équipe de Scienceinfuse, composée de Sandrine Kivits et d'Adelaïde De Bont, a permis d'avoir l'opportunité de faire tester le protocole simplifié à une classe d'étudiants.

Les différentes intelligences artificielles utilisées dans ce mémoire sont les suivantes, par ordre d'importance d'utilisation : ChatGPT (OpenAI), Copilot (Microsoft), Elicit (Ought), Picolo (UCLouvain), NotebookLM (Google), ResearchRabbit (ResearchRabbit Inc.). ChatGPT et Copilot ont principalement été utilisés comme outils d'assistance pour le code et l'amélioration des figures. Copilot a également contribué à l'application de certaines analyses statistiques, tandis que ChatGPT a été utilisé pour optimiser la formulation et corriger l'orthographe de certaines parties du texte préalablement rédigées. Picolo, bien que moins utilisé, a également permis d'aider à la reformulation ainsi qu'à la compréhension de certains documents et concepts. Enfin, Elicit et NotebookLM ont été utilisés ponctuellement afin de soutenir la recherche bibliographique sur des sujets spécifiques, tandis que ResearchRabbit a servi d'outil de cartographie bibliographique.

Table des matières

Remerciements ..... **II**

CRediT ..... **III**

Table des matières ..... **IV**

Liste des figures ..... **VI**

Liste des tableaux ..... **XI**

Liste des abréviations ..... **XII**

1. Introduction **1**

2. État de l'art **3**

2.1. La qualité de l'air et sa mesure 3

2.1.1. État de la qualité de l'air 3

2.1.2. Impacts de la qualité de l'air 6

2.1.3. Mesure de la qualité de l'air 8

2.1.4. La biosurveillance et ses approches 9

2.2. Bioindication par les lichens 11

2.2.1. Biologie et morphologie des lichens 11

2.2.2. La bioindication par les lichens 13

2.2.3. Protocole de bio-indication par les lichens 14

2.3. Apport des sciences participatives dans la biosurveillance 15

2.3.1. Les sciences participatives 15

2.3.2. Intérêts et enjeux des sciences participatives 16

2.3.3. Risques et difficultés des sciences participatives 17

2.3.4. Exemples d'applications des sciences participatives 18

2.3.5. Lichens GO : un exemple de programme de sciences participatives. 20

3. Objectifs et démarche **21**

4. Matériels et méthodes **23**

4.1. Enquête auprès des participants de Lichens GO 23

4.1.1. Conception de l'enquête 23

4.1.2. Analyse des réponses de l'enquête 24

4.2. Évaluation de scénarios de simplification à partir de jeux de données 24

4.2.1. Dégradations de jeux de données d'observations de lichens 25

4.2.2. Analyse statistique et visualisation des écarts induits par la dégradation 26

4.3. Évaluation de scénarios de simplification à partir de tests de terrain 28

4.3.1. Conception et mise en place des tests de scénarios du protocole simplifié 28

4.3.2. Analyse des résultats des tests 31
5. Retours des participants 33
5.1. Données recueillies auprès des participants 33
5.1.1. Caractéristiques des répondants et organisation des groupes 33
5.1.2. Aspect temporel et réalisation des phases du protocole 35
5.1.3. Difficultés rencontrées 39
5.2. Données recueillies auprès des non-participants 41
5.3. Prise en considération des retours dans les changements : création de scénarios 42
6. Impacts des propositions de changements 46
6.1. Dégradation des jeux de données 46
6.1.1. Représentativité de la sélection de taxa pour le protocole simplifié 46
6.1.2. Indices d'évaluation de la qualité de l'air 47
6.2. Tests réalisés par des participants 54
6.2.1. Perception des scénarios 54
6.2.2. Relevés de terrain 58
7. Conclusion et perspectives 62
8. Références 64
9. Annexes 77
ANNEXE A : Enquête : difficultés et facilités rencontrées dans Lichens GO 77
ANNEXE B : Fiche taxa (« Fiches espèces ») adaptée aux simplifications proposées 88
ANNEXE C : Fiches de relevés de terrain adaptées aux simplifications proposées 92
ANNEXE D : Fiches explicatives des scénarios de tests 96
ANNEXE E : Formulaire de retours sur les tests de scénarios du protocole simplifié 102
ANNEXE F : Analyse des réponses obtenues par l'enquête — graphes et tableaux complémentaires 105
ANNEXE G : Taxa lichéniques considérés dans Lichens GO et leurs caractéristiques . 117
ANNEXE H : Analyse de la dégradation des jeux de données — graphes et tableaux complémentaires 121
ANNEXE I : Analyse du nombre de taxa retenus dans le protocole simplifié 123
ANNEXE J : Analyse des résultats des tests sur Louvain-la-Neuve — graphes et tableaux complémentaires 125

Liste des figures

Figure 1 : Évolution des émissions de polluants atmosphériques dans l'Union européenne (UE) entre 1990 et 2022, avec les niveaux de 1990 normalisés à 100 (Our World in Data, 2024). .. 4
Figure 2 : Exposition à la pollution par les particules fines (PM2,5) dans le monde en 2019 (Our World in Data & World health organisation, 2025). 5
Figure 3 : Pourcentage de stations de surveillance dont les concentrations moyennes annuelles en 2023 sont inférieures aux valeurs limites applicables de l'UE et aux recommandations de l'OMS (European environment agency, 2025)..... 6
Figure 4 : Évolution du nombre annuel estimé de décès attribuables à l'exposition aux particules fines (PM2,5) dans le monde et par continent (IHME, 2024; Our World in Data, 2021). 7
Figure 5 : Répartition des stations européennes de surveillance de la qualité de l'air (gauche) et répartition de ces stations en Belgique par province (droite). 9
Figure 6 : Les quatre approches de la biosurveillance selon la visibilité de leurs effets et leur niveau d'organisation biologique (Garrec & Haluwyn, 2002). 10
Figure 7 : Structure hétéromère d'un lichen (biogeoscience.be, n.d.). 11
Figure 8 : Les trois principales formes de thalle chez les lichens (Sachin et al., 2018). 12
Figure 9 : Principales structures morphologiques des lichens : (a) cils (Kirschbaum & Wirth, 1997) ; (b) pseudocyphelles (Lindsey, n.d.) ; (c) pruine (Sharnoff, n.d.) ; (d) rhizines (Haleigh, 2023) ; (e) isidies (Ohio Plants, n.d.) ; (f) soralies (Haleigh, 2023) ; (g) apothécies (Gonnet, n.d.) 13
Figure 10 : Évolution de la fréquence de différentes espèces de lichens en fonction du degré de pollution atmosphérique en SO2 (Kirschbaum & Wirth, 1997). 14
Figure 11 : Catégories de sciences participatives selon le degré d'implication des participants et le rôle qui leur est attribué (Bonney, Ballard, et al., 2009; Marks et al., 2022). 16
Figure 12 : Évolution de l'implication du public dans un programme de sciences participatives, ainsi que des motivations et des freins qui l'influencent (Asingizwe et al., 2020). 18
Figure 13 : Répartition de 178 projets français de sciences participatives par domaine (Merilhou-Goudard et al., 2016). 19
Figure 14 : Organisation de la démarche méthodologique visant à répondre aux deux questions de recherche, structurée en deux phases : phase d'enquête (bleu) et phase de scénarios et d'analyses (rouge)..... 22
Figure 15 : Localisation des différents sites de relevés répertoriés dans la base de données de Wallonie. 25
Figure 16 : Localisation des sites de relevés Lichens GO répertoriés dans la base de données du programme au sein de Clermont Auvergne Métropole. 26
Figure 17 : Localisation du site de test à Louvain-la-Neuve : (a) localisation du site dans la commune d'Ottignies–Louvain-la-Neuve ; (b) localisation du site sur orthophotographie par rapport à la Faculté des bioingénieurs (AGRO) ; (c) identification des trois arbres retenus pour les tests et de leur numéro d'identification. 31

Figure 18 : Niveau de connaissance et de sensibilité à différents aspects du programme Lichens GO (nature, sciences participatives, qualité de l'air et lichens) en fonction du pourcentage de répondants parmi les participants (n = 48). 34
Figure 19 : Distribution du temps consacré à chaque phase du protocole, exprimée en pourcentage des répondants ayant effectivement réalisé la phase correspondante (n, indiqué dans la légende). 36
Figure 20 : Répartition du protocole complet selon le nombre de jours sur lesquels il a été réalisé, en fonction du cadre de participation, exprimée en pourcentage pour chaque groupe et comparée à la distribution globale. 37
Figure 21 : Proportion de participants n'ayant pas réalisé les différentes phases du protocole, pour l'ensemble des participants ainsi que selon le cadre de participation (scolaire et non scolaire) 38
Figure 22 : Principaux ressentis négatifs des participants au programme Lichens GO (n = 47) à l'égard des différentes phases du protocole, exprimés en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « non concerné·e » (NC). Le nombre de répondants pris en compte pour chaque item est indiqué (n). 39
Figure 23 : Ressenti de confort des participants au programme Lichens GO (n = 47) lors de l'observation de différentes structures lichéniques, exprimé en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « ne voit pas ce dont il s'agit » (NSP), avec indication du nombre de répondants hors NSP pour chaque item (n). 40
Figure 24 : Raisons de non-participation au programme Lichens GO, exprimées en nombre de citations par les répondants de la catégorie « non-participants » (n = 40). 42
Figure 25 : Les dix taxa retenus dans la liste restreinte, considérée dans le processus de simplification, réparties par morphotype de thalle (bleu = crustacé, orange = foliacé, mauve = fruticuleux) (©Hugo Counoy). 44
Figure 26 : Classes de l'échelle de recouvrement des taxa par arbre (<1 %, 1 – <10 %, 10 – <50 %, ≥50 %) 45
Figure 27 : Modalités des deux scénarios de protocole concernant le nombre de taxa considérés et la méthode d'évaluation de l'abondance, les autres éléments du protocole étant identiques. 45
Figure 28 : Représentation NMDS des taxa lichéniques du jeu de données de Wallonie, basée sur la distance de Bray-Curtis. Les polygones délimitent les groupes identifiés par un clustering *k*-means (*k* = 7). Les taxa retenus dans le protocole simplifié sont surlignés en rouge. La couleur des points indique la fréquence d'occurrence des taxa (nombre de sites), reflétant leur abondance relative dans le jeu de données. 47
Figure 29 : Distribution du nombre de taxa observés par site après réduction du nombre de taxa et moyennes (μ), pour le jeu de données de Wallonie (n = 159) et le jeu de données de Clermont-Ferrand (n = 102) 48
Figure 30 : Comparaison des valeurs de LDV calculées à partir de 35 et de 10 taxa en Wallonie (W ; n = 159) et à Clermont-Ferrand (CF ; n = 102). (a) Relation entre les valeurs de LDV obtenues avec 35 et 10 taxa. (b) Conservation relative des valeurs de LDV, exprimée par le rapport LDV_{10}/LDV_{35}. (c) Relation entre les valeurs de LDV obtenues avec 35 taxa et avec 10

taxa après correction. Les lignes pointillées représentent les régressions linéaires et les statistiques associées. La ligne pointillée grise représente la relation 1:1. 50
Figure 31 : Comparaison des valeurs des différents indices écologiques et de pollution calculés à partir des protocoles à 35 et à 10 taxa pour les sites de Wallonie (n = 159) et de Clermont-Ferrand (n = 102). Les coefficients de corrélation (r) et les biais moyens (b) sont indiqués pour chaque indice. Les lignes pointillées représentent les régressions linéaires avec leur pente (p). La ligne pointillée grise représente la relation 1:1..... 52
Figure 32 : Distribution des scores d'erreur globale obtenus pour 10 000 combinaisons de 10 taxa parmi les 35 taxa du protocole complet Lichens GO. La ligne noire indique le score associé à la sélection de taxa retenue..... 53
Figure 33 : Distribution des estimations de recouvrement (%) obtenues lors des tests à Louvain-la-Neuve pour chaque taxon et chaque scénario (S1 et S2). Les losanges indiquent le recouvrement moyen observé et la significativité des différences entre scénarios est précisée ($p < 0,05$; ns = non significatif). 59
Figure 34 : Écart entre les estimations moyennes de recouvrement obtenues par les testeurs et les valeurs de référence relevées par Hugo Counoy (présentées au-dessus de chaque colonne) pour le scénario 1 (n = 7) et le scénario 2 (n = 6)..... 60
Figure 35 : Répartition des répondants à l'enquête selon leur pays de résidence. La catégorie « Autre » regroupe le Royaume-Uni, la Suisse et l'Italie. 105
Figure 36 : Fréquence de participation des répondants participant à Lichens GO (n = 48) à des programmes d'étude ou d'observation de la nature..... 105
Figure 37 : Répartition des répondants (n = 48) selon leur cadre de participation : enseignement/scolaire, associations ou éducation à l'environnement, et cadre personnel. 106
Figure 38 : Historique de participation à Lichens GO des répondants à l'enquête, indiquant les années de première et de dernière participation. Le nombre de participations est représenté par la couleur des barres et le cadre de participation est précisé pour chaque répondant. En parallèle sont indiquées les années de lancement de différentes ressources utiles à la participation..... 106
Figure 39 : Distribution des âges des participants selon le cadre de participation. (a) Distribution des âges des participants à Lichens GO dans les cadres scolaire et non scolaire. (b) Répartition des participants par classe d'âge au sein de chaque cadre de participation, exprimée en pourcentage..... 107
Figure 40 : Milieux scolaires des répondants. (a) Répartition des niveaux d'enseignement concernés dans le cadre scolaire. (b) Répartition des niveaux de classe au lycée (Seconde = quatrième secondaire, Première = cinquième secondaire, Terminale = sixième secondaire ; NP = non précisé). (c) Répartition des types d'enseignement au lycée. 107
Figure 41 : Structures associatives pratiquant Lichens GO citées par les participants du cadre associatif et de l'éducation à l'environnement..... 107
Figure 42 : Distribution du nombre de participants par activité Lichens GO selon le cadre de participation. (a) Distribution du nombre de participants par activité dans les cadres scolaire et non scolaire. (b) Répartition des activités selon des classes de nombre de participants. 108

Figure 43 : Distribution du nombre moyen de participants par arbre selon le cadre de participation. (a) Distribution du nombre moyen de participants par arbre dans les cadres scolaire et non scolaire. (b) Répartition des répondants par classe de nombre moyen de participants par arbre au sein de chaque cadre de participation, exprimée en pourcentage. 108
Figure 44 : Distribution de la durée des différentes phases du protocole pour les cadres scolaire et non scolaire, exprimée en pourcentage des participants. 110
Figure 45 : Distribution de la durée totale du protocole pour l'ensemble des répondants ainsi que pour les cadres scolaire et non scolaire, exprimée en pourcentage des participants. Les durées correspondent à la somme des temps moyens déclarés pour chaque phase du protocole..... 110
Figure 46 : Répartition des participants selon le nombre de jours sur lesquels la phase de terrain a été réalisée, en fonction du cadre de participation et comparée à la distribution globale. 111
Figure 47 : Facilités et difficultés rencontrées par les participants au programme Lichens GO (n = 47) lors des différentes phases du protocole, exprimées en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « non concerné·e » (NC). 111
Figure 48 : Ressentis des participants au programme Lichens GO (n = 47) à l'égard des différents aspects des quatre phases du protocole, exprimés en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « non concerné·e » (NC)..... 112
Figure 49 : Pourcentage de participants ayant rencontré des difficultés dans les différentes phases du protocole selon le cadre de participation. Les valeurs de p correspondent aux tests exacts de Fisher bilatéraux, ajustés pour comparaisons multiples selon la méthode FDR de Benjamini–Hochberg. 113
Figure 50 : Pourcentage de participants ayant rencontré des difficultés lors de l'observation de différentes structures et caractéristiques morphologiques des lichens selon le cadre de participation. Les valeurs de p correspondent aux tests exacts de Fisher bilatéraux, ajustés pour comparaisons multiples selon la méthode FDR de Benjamini–Hochberg. 113
Figure 51 : Représentation NMDS des taxa lichéniques du jeu de données de Clermont-Ferrand, basée sur la distance de Bray-Curtis. Les polygones délimitent les groupes identifiés par un clustering k-means (k = 2). Les taxa retenus dans le protocole simplifié sont surlignés en rouge. La couleur des points indique la fréquence d'occurrence des taxa (nombre de sites), reflétant leur abondance relative dans le jeu de données. 121
Figure 52 : Corrélations de Pearson entre les espèces de lichens retenues dans le protocole simplifié pour les jeux de données de Wallonie (gauche) et de Clermont-Ferrand (droite). Les corrélations positives sont représentées en rouge et les corrélations négatives en bleu. Les astérisques indiquent le niveau de significativité statistique (*: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$)..... 122
Figure 53 : Distribution de la perte de taxa lichéniques par site étudié pour les deux jeux de données. 122
Figure 54 : Comparaison des réponses des groupes de participants aux quatre premières questions de la fiche de relevés (ombre permanente, lichens juvéniles, lichens nécrosés et

mousses) avec les réponses de référence, pour chaque face de chaque arbre du scénario 1. 125
Figure 55 : Comparaison des réponses des groupes de participants aux quatre premières questions de la fiche de relevés (ombre permanente, lichens juvéniles, lichens nécrosés et mousses) avec les réponses de référence, pour chaque arbre du scénario 2. 126
Figure 56 : Comparaison des valeurs des différents indices écologiques calculés à partir des estimations de recouvrement obtenues dans les scénarios 1 et 2 pour le site de Louvain-la-Neuve. Les coefficients de corrélation (r) et les biais moyens sont indiqués pour chaque indice. 127

Liste des tableaux

Tableau 1 : Modalités des séances de test des protocoles à Louvain-la-Neuve (S1 = scénario 1 ; S2 = scénario 2). 30
Tableau 2 : Principaux avantages et inconvénients rapportés par les testeurs à distance et à Louvain-la-Neuve pour chacun des scénarios, classés selon leur fréquence de citation..... 54
Tableau 3 : Comparaison des erreurs absolues moyennes (MAE) et des biais entre les estimations des testeurs à Louvain-la-Neuve et les valeurs de référence pour les deux scénarios étudiés. 61
Tableau 4 : Types de thématiques et de notions illustrées par Lichens GO dans les secteurs de l'enseignement et de l'éducation à l'environnement. 109
Tableau 5 : Difficultés exprimées par les participants dans les questions ouvertes, classées par catégorie et selon le cadre de participation (non scolaire [NS], n = … ; scolaire [S], n = …). Les difficultés sont distinguées entre celles personnellement rencontrées et celles identifiées comme susceptibles d'être rencontrées par d'autres participants. 114
Tableau 6 : Propositions d'améliorations formulées par les participants, classées par catégorie et selon le cadre de participation (non scolaire, n = 10 ; scolaire, n = 11). 116
Tableau 7 : Taxa lichéniques considérés dans le protocole complet Lichens GO, avec leurs principales confusions possibles, leur type de thalle, leurs structures reproductrices, leur fréquence d'occurrence et les types de climat auxquels elles sont associées. Les dix taxa retenus dans le protocole simplifié sont mis en évidence en gris. 117
Tableau 8 : Taxa lichéniques considérés dans le protocole complet Lichens GO, avec leur sensibilité au dioxyde de soufre, aux oxydes d'azote et à l'ammoniac, ainsi que leur caractère toxitolérant, eutrophe et acidophile. Les dix taxa retenus dans le protocole simplifié sont mis en évidence en gris. 119
Tableau 9 : Exploration de l'impact d'ajout de taxa dans le protocole. La ligne grisée représente les résultats obtenus avec la proposition de sélection de taxa utilisée dans ce travail..... 123
Tableau 10 : Exploration de l'impact de retrait de taxa dans le protocole. La ligne grisée représente les résultats obtenus avec la proposition de sélection de taxa utilisée dans ce travail 124

Liste des abréviations

AAQD	Directive sur la qualité de l'air ambiant (*Ambient Air Quality Directive*)
AFNOR	Association française de normalisation
CEN	Comité Européen de Normalisation (*European Committee for Standardization, ECS*)
CF	Clermont-Ferrand
CRIE	Centres Régionaux d'Initiation à l'Environnement
CV	Coefficient de variation
EN	Norme européenne (*European Standard*)
EEA	Agence Européenne de l'environnement (*European environment agency*)
FDR	Taux de fausses découvertes (*False Discovery Rate*)
GES	Gaz à effet de serre
LDV	Indice de diversité lichénique (*Lichen Diversity Value*)
MAE	Erreur moyenne absolue (*Mean Absolute Error*)
MNHN	Muséum national d'histoire naturelle
NMDS	Positionnement multidimensionnel non métrique (*Non-metric Multidimensional Scaling*)
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques (*Organisation for Economic Co-operation and Development, OECD*)
OMS	Organisation mondiale de la Santé (*World Health Organisation, WHO*)
PM	Particules fines (*Particulate Matter*)
QRM	Question à réponses multiples
QRU	Question à réponse unique
RGPD	Règlement général sur la protection des données
UE	Union Européenne (*European Union, EU*)
VNE	VigieNature École
W	Wallonie

1. Introduction

Avec plusieurs millions de décès prématurés attribués chaque année à la pollution atmosphérique, la surveillance de la qualité de l'air constitue un enjeu majeur de santé publique et d'environnement (European environment agency, 2025; World health organisation, 2024). Celle-ci est conventionnellement mesurée par l'intermédiaire de stations de mesure fixes qui permettent un suivi précis des concentrations atmosphériques (Targa et al., 2025). Cependant, ces mesures sont à la fois coûteuses et ponctuelles, réduisant la représentativité des données.

Face à ces limites, des approches complémentaires ont été développées et mises en avant, notamment autour de la biosurveillance, utilisant des organismes biologiques vivants comme témoins des pollutions environnementales (Matthews et al., 1982). Ce type d'approche peut être exploité dans l'étude de la qualité de l'air, entre autres par les méthodes de bioindication en observant la présence ou l'état d'un ou plusieurs organismes sur un site. Parmi ces organismes, les lichens épiphytes apparaissent comme des bioindicateurs particulièrement intéressants en raison de leur sensibilité spécifique aux différents polluants atmosphériques et de leur capacité à intégrer les conditions environnementales sur le long terme (Richardson, 1992). Leur présence sur une grande variété de sites parfois dépourvus de stations de mesure permet également d'obtenir une information sur la qualité de l'air avec une couverture spatiale potentiellement plus fine que celle offerte par les réseaux classiques. En pratique, l'étude des communautés de lichens permet d'estimer la qualité de l'air en s'appuyant sur les tolérances connues des différentes espèces aux polluants atmosphériques. Cependant, les lichens sont souvent petits et difficiles à identifier, nécessitant généralement l'intervention d'un expert. Cette dépendance à une expertise spécialisée peut limiter le déploiement de suivis à grande échelle, tant sur le plan spatial que temporel.

Dans ce contexte, les sciences participatives, qui reposent sur la collaboration entre scientifiques et citoyens, offrent une opportunité d'étendre la collecte de données environnementales à grande échelle tout en favorisant des bénéfices mutuels pour la recherche et les participants. Elles permettent ainsi d'élargir les couvertures spatiale et temporelle des données, tout en sensibilisant le public aux enjeux environnementaux (Sauermann & Franzoni, 2015; Wiggins & Crowston, 2011). Cependant, les sciences participatives nécessitent un cadre et des adaptations afin de proposer une recherche accessible et attrayante pour le public. Dans le cas de la bioindication de la qualité de l'air par les lichens, cela passe par la proposition d'un protocole adapté et la mise à disposition d'outils ou de formations.

Dans cette optique, le programme de sciences participatives Lichens GO a été développé afin de proposer une approche participative autour de la bioindication de la qualité de l'air par les lichens. Lichens GO propose aux participants de réaliser des relevés de taxa sur des sites près de chez eux, parmi une liste restreinte, afin de les traduire en informations relatives à la qualité de l'air. Le programme, actif depuis 2017, avait déjà permis de rassembler en 2025, plus de

579 relevés, essentiellement en France et en Belgique (Lichens GO, 2025). Cependant, malgré les améliorations apportées en 2022 au protocole et à la clé d'identification, ceux-ci demeurent trop complexes pour certains publics, en particulier les participants novices et le secteur scolaire, qui font face à des contraintes spécifiques (Counoy et al., 2023; Perron, 2025). Pourtant, ces publics manifestent un intérêt pour la participation au programme, et leur contribution pourrait représenter un apport significatif pour celui-ci.

Dans ce contexte, ce travail vise à explorer les possibilités de simplification du protocole, visant à faire co-exister une version simplifiée et la version complète. L'objectif est d'ouvrir le programme à un public plus large tout en conservant des résultats aussi comparables que possible entre les deux protocoles et en ouvrant une porte d'entrée vers le protocole complet. La réflexion s'articulera en deux temps : (1) une évaluation des difficultés réelles rencontrées par les participants ainsi que des éléments qui freinent les personnes qui bien que connaissant le programme, n'y ont jamais participé, et (2) une identification, à partir d'analyses de données et de tests pratiques, des modifications réalisables pour répondre à ces problématiques tout en conservant des résultats exploitables.

2. État de l'art

2.1. La qualité de l'air et sa mesure

2.1.1. État de la qualité de l'air

La qualité de l'air représente aujourd'hui un enjeu majeur pour la qualité de vie sur Terre tant pour l'humain que pour les écosystèmes. Elle est directement en lien avec la concentration en polluants atmosphériques (European environment agency, 2018). C'est une pollution complexe de par sa diversité de sources, de formes ou encore de modes de formation. Certains polluants sont directement émis dans l'atmosphère que ce soit de sources anthropiques telles que les véhicules motorisés ou les industries (spécialement via les processus de combustion) mais également de sources naturelles comme certains feux ou bien l'activité volcanique (World health organisation, 2024). Ces polluants sont dits primaires et regroupent notamment les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO_2), le monoxyde de carbone (CO), l'ammoniac (NH_3), le méthane (CH_4), certains composés organiques volatils ainsi que certaines particules fines (PM, *Particulate Matter*), classées selon leur diamètre aérodynamique équivalent maximal en micromètres (< 2,5 µm : $PM_{2,5}$, < 10 µm : PM_{10}) (European environment agency, 2018). D'autres polluants sont cependant formés directement dans l'atmosphère à partir de polluants précurseurs et sont alors dit secondaires. L'exemple le plus connu est celui de l'ozone (O_3) issu de réactions photochimiques (Dewan et al., 2024; Maghirang, 2019) mais en font également partie les particules secondaires, le dioxyde d'azote (NO_2), certains composés organiques volatils oxydés ainsi que certaines particules fines (European environment agency, 2018). Les polluants atmosphériques se présentent sous deux formes majoritaires (Jiménez et al., 2015; Ravindiran et al., 2023) : la forme gazeuse comme par exemple les composés organiques volatils non-méthaniques (COVNM) ou l'O_3 et la forme particulaire.

Variabilités temporelles

La qualité de l'air peut être étudiée à plusieurs niveaux dans le temps, en raison de l'évolution des émissions et de la formation de polluants atmosphériques. À l'échelle pluri-décennale, des tendances nettes peuvent être observées dans les quantités de polluants atmosphériques émis (European environment agency, 2025). Au niveau de l'Union européenne, un déclin des émissions de ces polluants (mis à part pour le carbone organique et le NH_3) peut être observé sur les dernières décennies (Figure 1) (Hoesly et al., 2024; Our World in Data, 2024). Des tendances similaires sont également observables aux Etats-Unis, démontrant une tendance à la baisse dans les pays riches (Ritchie & Roser, 2022).

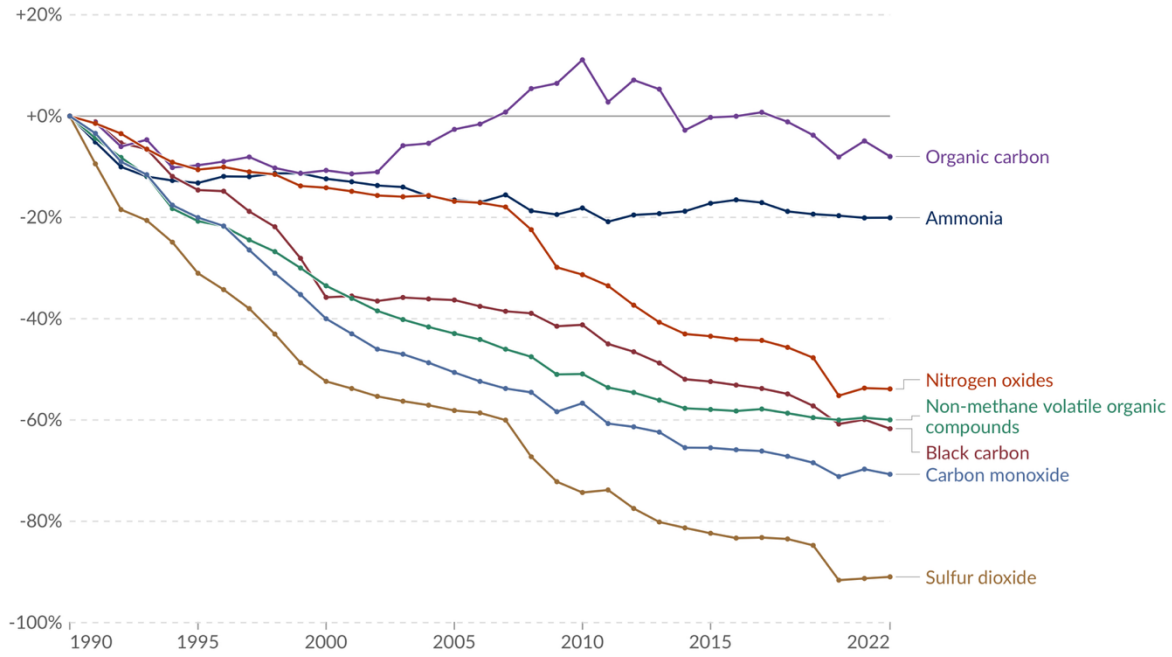


Figure 1 : Évolution des émissions de polluants atmosphériques dans l'Union européenne (UE) entre 1990 et 2022, avec les niveaux de 1990 normalisés à 100 (Our World in Data, 2024).

En plus des tendances générales, des fluctuations intra-annuelles et intra-journalières sont également observées pour différents polluants en raison de l'hétérogénéité temporelle des sources d'émissions. Des pics de concentration en polluants tels qu'en NO_2 ou en PM peuvent par exemple être observés à des périodes où le transport est dense, la combustion en étant une source importante (Cheng et al., 2018; Fioletov et al., 2025; Irceline, 2025). D'autres fluctuations de concentration en polluants peuvent également apparaître en raison des variations des conditions climatiques. C'est par exemple le cas de l'O_3 dont les concentrations dépendent des radiations solaires et qui seront maximales à la période de l'année où les jours sont plus longs ainsi qu'à la période du jour où le soleil irradie le plus (Ionel, 2009).

Variabilités spatiales

Si la temporalité est un facteur déterminant de la qualité de l'air, celle-ci dépend également fortement de la dimension spatiale. Certaines régions du monde présentent une exposition plus élevée à certains polluants en raison notamment de processus atmosphériques différents (Lawrence et al., 2007), de niveaux de revenus plus faibles (Ritchie & Roser, 2022), de réglementations environnementales moins strictes (Cole & Gray, 2015), de contrôles moins fréquents et de sources d'émissions plus importantes (Maghirang, 2019). Dans le cas des $PM_{2,5}$, les concentrations moyennes annuelles varient d'un ordre de grandeur entre certains pays (**Figure 2** ; Ritchie & Roser, 2022).

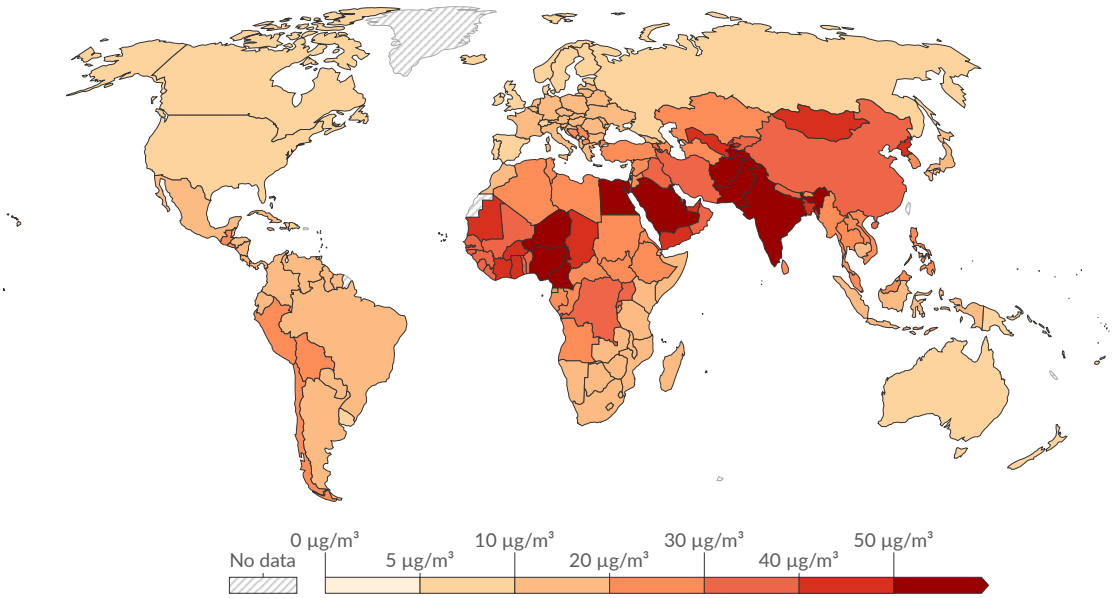


Figure 2 : Exposition à la pollution par les particules fines (PM2,5) dans le monde en 2019 (Our World in Data & World health organisation, 2025).

La qualité de l'air varie également à une échelle plus locale, notamment au sein d'une même région, en fonction des sources d'émissions et des conditions météorologiques (Han et al., 2023). Des contrastes apparaissent ainsi entre zones plus ou moins urbanisées. En général, une intensification du trafic routier s'accompagne d'une augmentation des concentrations de polluants issus de la combustion, tels que les NO_x (Derwent & Hjellbrekke, 2013). À l'inverse, les milieux ruraux caractérisés par un trafic plus faible, présentent généralement des concentrations moyennes en O_3 plus élevées, en raison d'une moindre dégradation de celui-ci par réaction avec le NO (Derwent & Hjellbrekke, 2013; Han et al., 2023; SPW, 2024).

Seuils et limites

Différentes institutions ont développé des outils afin d'évaluer la qualité de l'air, reposant sur la définition de seuils et de normes pour certains polluants atmosphériques clés. Ces seuils tiennent notamment compte de leur nature, de leurs dynamiques temporelles (persistance dans l'atmosphère, fréquence des pics de concentration et durée des expositions) ainsi que de leurs potentiels d'impacts (Targa et al., 2025; World health organisation, 2021). Cependant, ces seuils diffèrent selon les organisations, tant par les méthodes utilisées pour les définir que par les niveaux de concentration jugés acceptables.

L'Organisation mondiale de la Santé (OMS) propose des lignes directrices principalement axées sur la protection de la santé, sous forme de seuils guides indicatifs non-contraignants visant à réduire l'exposition de la population aux polluants (World health organisation, 2021). Certaines autres institutions définissent des limites juridiquement contraignantes, généralement moins strictes que celles recommandées par l'OMS.

Au sein de l'Union européenne (UE), le cadre réglementaire est notamment structuré par les directives relatives à la qualité de l'air ambiant (*Ambient Air Quality Directives* ou AAQD), élaborées avec l'appui de l'Agence Européenne de l'Environnement (European environment

agency ou EEA). La révision de la directive adoptée en 2024 vise à renforcer les exigences établies par la directive de 2008, avec un objectif de mise en conformité à l'horizon 2030 (Conseil de l'Union européenne, 2024; Targa et al., 2025). Ces différences de sévérité se traduisent par des variations dans les niveaux de dépassement observés ainsi que dans l'évaluation globale de la qualité de l'air (**Figure 3**).

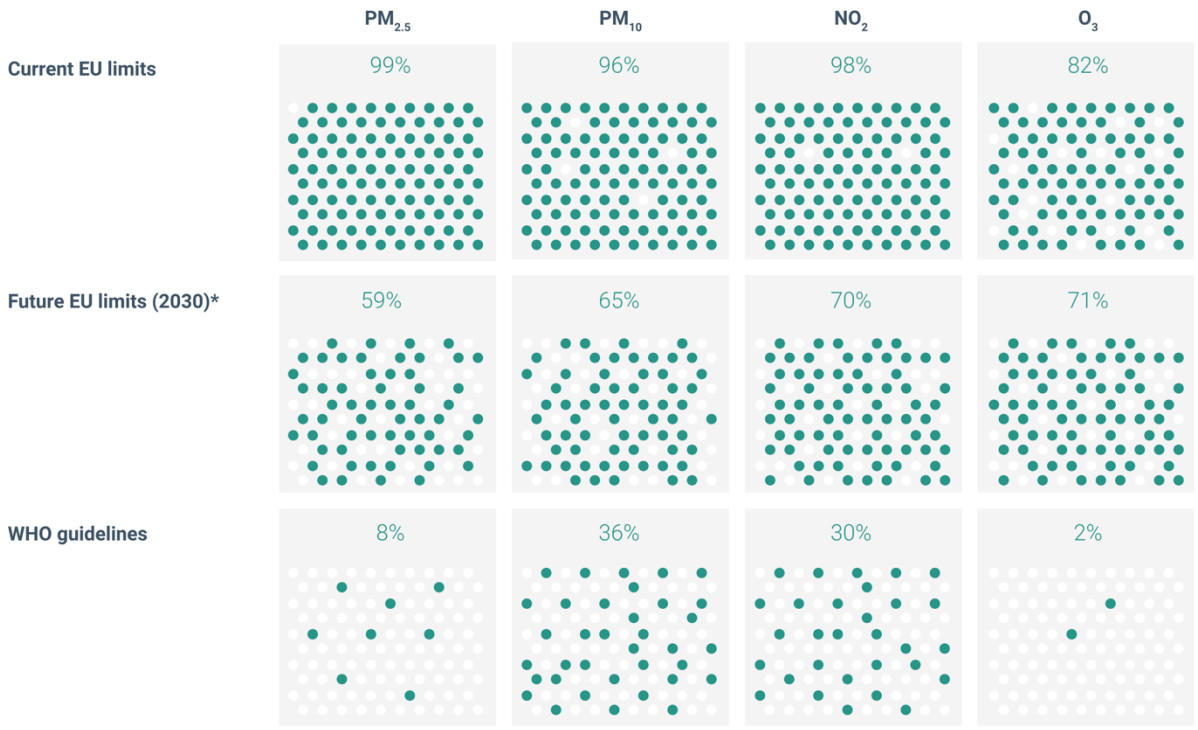


Figure 3 : Pourcentage de stations de surveillance dont les concentrations moyennes annuelles en 2023 sont inférieures aux valeurs limites applicables de l'UE et aux recommandations de l'OMS (European environment agency, 2025).

En Europe, les valeurs recommandées par l'OMS sont fréquemment dépassées (**Figure 3**), indiquant une exposition de la population à des niveaux de pollution nocifs pour la santé (European environment agency, 2025). Cependant, ces mêmes concentrations dépassent peu les normes européennes actuelles, ce qui met en évidence un décalage entre les recommandations sanitaires et les cadres réglementaires. Toutefois, la révision des normes européennes traduit une volonté de s'aligner davantage avec les lignes directrices de l'OMS, bien que celles-ci demeurent moins strictes (Conseil de l'Union européenne, 2024).

2.1.2. Impacts de la qualité de l'air

Impacts sur la santé

La qualité de l'air constitue une problématique majeure à l'échelle mondiale. Selon l'OMS, en 2016, 90 % de la population mondiale était exposée à un air extérieur présentant des risques pour la santé, entraînant environ 4,2 millions de morts prématurées (World health organisation, 2024), dont près de 0,5 million au sein de l'UE (Sicard et al., 2021). Le nombre annuel de décès lié à la qualité de l'air à l'échelle mondiale demeure en hausse (**Figure 4**). Les régions les plus touchées correspondent principalement à des pays à revenus intermédiaires,

caractérisés par une industrialisation accrue, mais aux mesures de contrôle de la qualité de l'air et aux systèmes de santé insuffisamment développés (Ritchie & Roser, 2022). En Europe, malgré son amélioration globale, la pollution de l'air reste la principale cause environnementale de mortalité chaque année (Erickson & Brase, 2020; European environment agency, 2025).

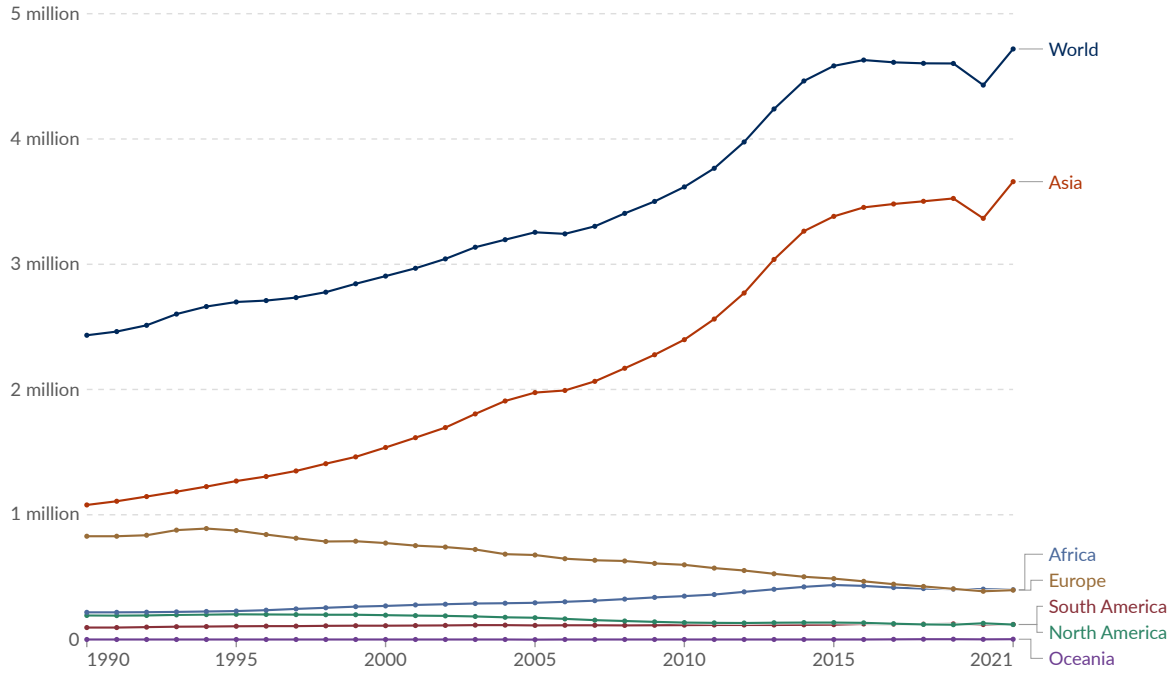


Figure 4 : Évolution du nombre annuel estimé de décès attribuables à l'exposition aux particules fines (PM2,5) dans le monde et par continent (IHME, 2024; Our World in Data, 2021).

Les décès liés à la pollution atmosphérique résultent principalement de pathologies respiratoires, suivies des maladies cardiovasculaires et ensuite des accidents vasculaires cérébraux (World health organisation, 2019). Les particules fines, en particulier les $PM_{2,5}$, sont considérées comme les polluants les plus nocifs en raison de leur capacité à pénétrer profondément dans le système respiratoire (Erickson & Brase, 2020; Sicard et al., 2021). Cependant, d'autres polluants contribuent également aux effets sanitaires observés, couvrant un spectre plus large de pathologies (Erickson & Brase, 2020; World health organisation, 2024). Au sein de la population, certains groupes présentent une vulnérabilité accrue, notamment les personnes âgées, les jeunes enfants et les femmes enceintes (IHME, 2024; World health organisation, 2024).

Impacts sur l'environnement

La qualité de l'air affecte également l'environnement, notamment les écosystèmes forestiers, les masses d'eau, les cultures et la vie sauvage en général (Jiménez et al., 2015). Ces impacts s'observent à différentes échelles et à différents niveaux d'actions.

À l'échelle globale, certains polluants atmosphériques, tels que le CO_2, l'O_3, le CH_4, le N_2O et les composés fluorés, sont considérés comme des gaz à effet de serre (GES), lesquels contribuent de manière significative aux changements climatiques (Jiménez et al., 2015). Ils participent donc notamment, par ce biais, à l'augmentation de la fréquence des événements climatiques

extrêmes, à la dégradation des habitats naturels ainsi qu'à la perturbation générale des communautés (déplacements d'espèces, prolifération d'espèces invasives, *etc.*) (Field et al., 2014).

À des échelles plus locales, les polluants atmosphériques exercent également des effets directs sur la faune et la flore (European environment agency, 2018). La nature des impacts dépend du type de pollution. Par exemple, les dépôts azotés favorisent l'eutrophisation des milieux, tandis que les émissions de SO_2 ou de NO_x sont à l'origine des pluies acides (European environment agency, 2018). La pollution à l'O_3 est, quant à elle, reconnue pour ses effets néfastes sur la végétation et la biodiversité (Agathokleous et al., 2020; Emberson, 2020; Sicard et al., 2016). Ainsi, les impacts locaux dépendent à la fois des niveaux de pollution et des conditions environnementales et climatiques propres à chaque territoire (Sicard et al., 2016). Cette variabilité rend leur évaluation à grande échelle difficile dans la mesure où ils sont la conséquence d'interactions plus complexes.

Impacts sur l'économie

Les impacts de la qualité de l'air sur la santé et l'environnement se traduisent également par des conséquences économiques à l'échelle mondiale. Les coûts associés à la pollution atmosphérique concernent principalement la mortalité prématurée, la désutilité, les dépenses de santé et les pertes de productivité du travail ainsi que les diminutions de rendement agricole (OECD, 2016). Selon Erickson et al. (2017), cela représenterait un coût social annuel de plus de 4 300 milliards d'euros. Dans les pays membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), en 2015, le coût économique de la pollution de l'air extérieur dépassait 1 000 € par habitant (OCDE, 2019). Ce coût pourrait encore augmenter au cours des prochaines décennies et pourrait représenter jusqu'à 5 % du revenu moyen, soit plus de 2 500 € par personne d'ici 2060 (OCDE, 2019).

2.1.3. Mesure de la qualité de l'air

Dans un contexte où la pollution atmosphérique a des impacts significatifs et où elle est encadrée par des seuils guides ou contraignants, sa mesure s'avère indispensable. Elle est généralement réalisée à l'aide d'un réseau de stations de surveillance, positionnées de manière à capturer différentes sources de pollution (Targa et al., 2025). Ces stations sont communément divisées en trois catégories : industrielles (émissions des industries), de route (trafic automobile) et de fond (représentant l'exposition générale, éloignée de toute source de pollution). D'autres classifications tiennent compte du type de zone : urbaine, suburbaine ou rurale (Targa et al., 2025). En Europe, le nombre de stations urbaines et suburbaines a fortement augmenté passant de 1 300 en 1990 à 5 000 en 2020, soit une hausse de 285 % (Sicard et al., 2021). Chaque point bleu de la Figure 5 représente une station de mesure européenne (European environment agency, 2019). Cependant, une station ne mesure pas tous les polluants, ce qui implique que la couverture effective varie selon le polluant étudié (Targa et al., 2025). De plus, la distribution de ces stations n'est pas uniforme sur le territoire, laissant certaines zones peu couvertes, comme l'illustre la Figure 5. Ainsi, si on prend l'exemple

de la Belgique, les stations se concentrent majoritairement dans les grandes zones urbaines, tandis que de larges portions de territoire restent dépourvues de mesures locales.

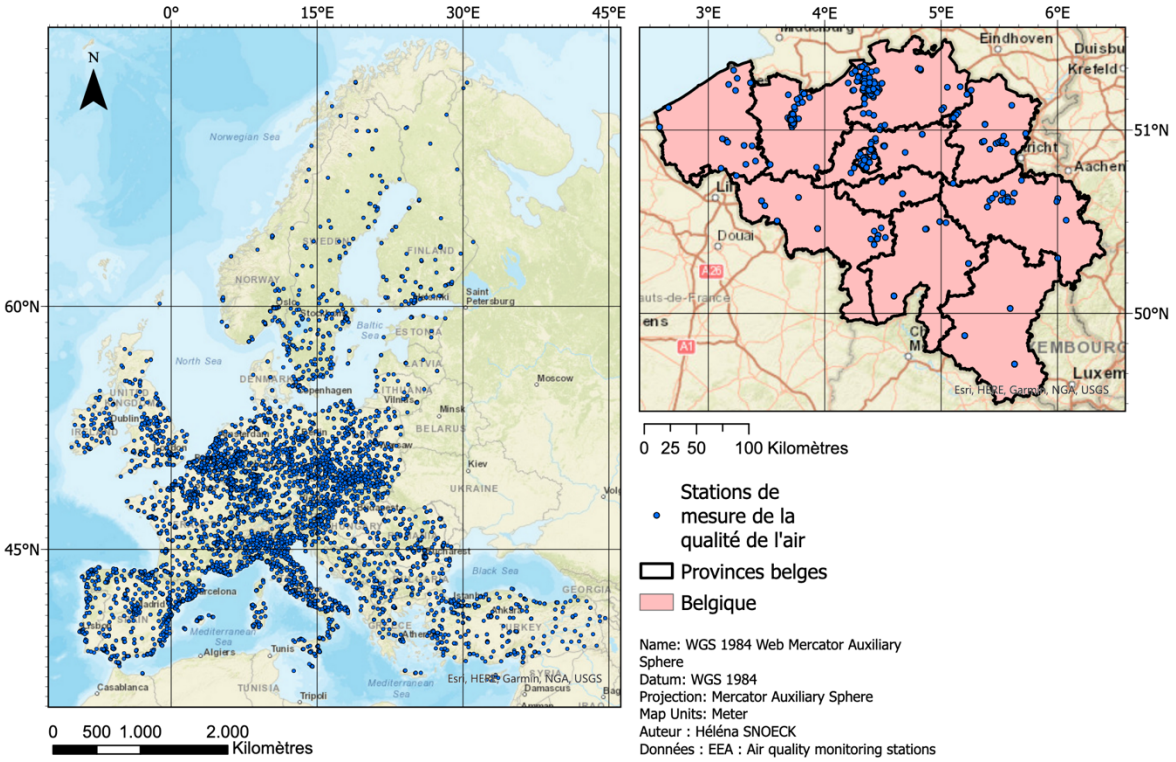


Figure 5 : Répartition des stations européennes de surveillance de la qualité de l'air (gauche) et répartition de ces stations en Belgique par province (droite).

2.1.4. La biosurveillance et ses approches

Parallèlement aux méthodes classiques de mesure de la qualité de l'air, d'autres approches complémentaires permettent de fournir des données additionnelles. C'est notamment le cas de la biosurveillance qui consiste à évaluer la qualité de l'air à partir des réponses biologiques d'organismes exposés à la pollution atmosphérique (Matthews et al., 1982). La biosurveillance se décline en quatre grandes approches (**Figure 6**) : les biomarqueurs, la bioindication, la biointégration et la bioaccumulation (Garrec & Haluwyn, 2002). Chacune se distingue principalement par le niveau d'organisation biologique considéré ainsi que par la nature et la lisibilité des effets observés.

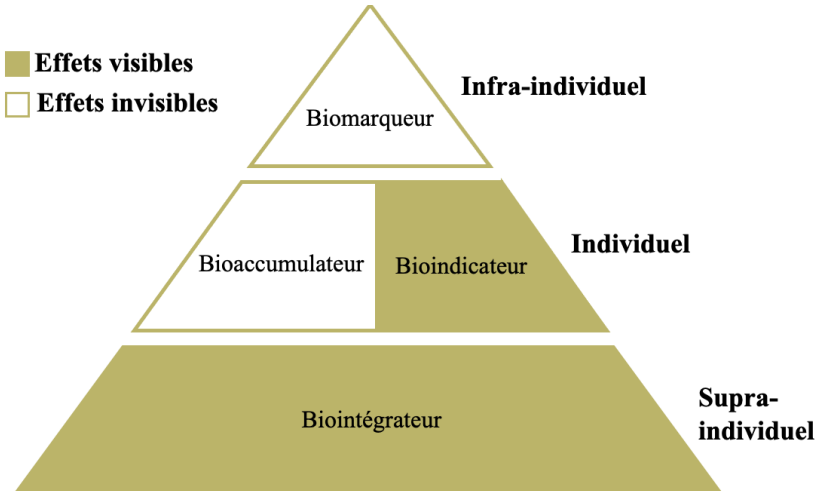


Figure 6 : Les quatre approches de la biosurveillance selon la visibilité de leurs effets et leur niveau d'organisation biologique (Garrec & Haluwyn, 2002).

Certaines méthodes de biosurveillance reposent sur des réponses biologiques observées à des niveaux infra-individuels, correspondant à des altérations non-visibles à l'œil nu et se manifestant au niveau cellulaire, moléculaire, biochimique ou physiologique (Garrec & Haluwyn, 2002; Weeks, 1995). Ces réponses, regroupées sous le terme de biomarqueurs, traduisent l'exposition d'un organisme à des composés chimiques ou toxiques, qu'elle soit actuelle ou passée (Depledge & Fossi, 1994). Selon l'information qu'ils fournissent, les biomarqueurs sont classés en trois catégories : biomarqueurs d'exposition, d'effet et de sensibilité (Depledge & Fossi, 1994; Garrec & Haluwyn, 2002).

À l'échelle individuelle, la biosurveillance mobilise des approches de nature différentes mais complémentaires. La bioaccumulation permet d'évaluer l'exposition d'un organisme aux polluants à travers l'accumulation d'un élément, d'un composé ou d'un ensemble de substances, en surface ou à l'intérieur de l'organisme, à des concentrations supérieures à celles présentes dans l'air ambiant (Garrec & Haluwyn, 2002; Markert et al., 2003; Ramade, 1993). Cette approche ne se traduit pas nécessairement par des effets directement observables. À cette même échelle, la bioindication repose sur l'observation de réponses biologiques visibles, telles que des altérations morphologiques, physiologiques ou tissulaires liées à la sensibilité des organismes aux polluants (Garrec & Haluwyn, 2002). Ces réponses peuvent inclure des modifications de fonctions vitales spécifiques (Kirschbaum & Wirth, 1997). La bioindication peut également s'appuyer sur des changements de composition des communautés biologiques, allant de la disparition d'espèces sensibles à l'apparition d'espèces tolérantes, ce qui permet ainsi d'évaluer la qualité du milieu (Garrec & Haluwyn, 2002).

Enfin, la biosurveillance peut s'étendre à des niveaux supra-individuels, tels que la population ou l'écosystème, notamment via la biointégration, qui est un concept proche de celui de bioindication avec lequel il est parfois regroupé (Garrec & Haluwyn, 2002). La biointégration met en relation la présence de polluants avec la diminution, voire la disparition, d'une espèce dans un environnement donné, en termes de densité. Dans ce travail, l'appellation de bioindication sera utilisée pour décrire une approche supra-individuelle basée sur les compositions de communautés.

2.2. Bioindication par les lichens

2.2.1. Biologie et morphologie des lichens

Les lichens sont des associations symbiotiques entre un champignon (mycobionte) et un ou plusieurs organismes photosynthétiques (photobiontes), généralement des algues et/ou des cyanobactérie (Ahmadjian, 1993; Richardson, 1992). Dans certains cas, les deux types de photobiontes peuvent coexister au sein d'un même lichen. Le champignon est dominant dans la structure et forme la structure principale du lichen, appelée thalle, au sein duquel se trouvent les organismes photosynthétiques (**Figure 7** ; Ahmadjian, 1993). Une couche fongique, appelée cortex supérieur, protège les cellules photosynthétiques situées en dessous (Richardson, 1992), lesquelles sont intégrées dans la médulle, une couche médiane, constituée d'un réseau lâche d'hyphes fongiques (Büdel & Scheidegger, 2008; Richardson, 1992). Cette structure facilite les échanges gazeux grâce à la porosité du réseau mycélien. Un cortex inférieur peut également être présent chez certaines espèces, ainsi que des rhizines assurant la fixation au substrat (Büdel & Scheidegger, 2008; Richardson, 1992).

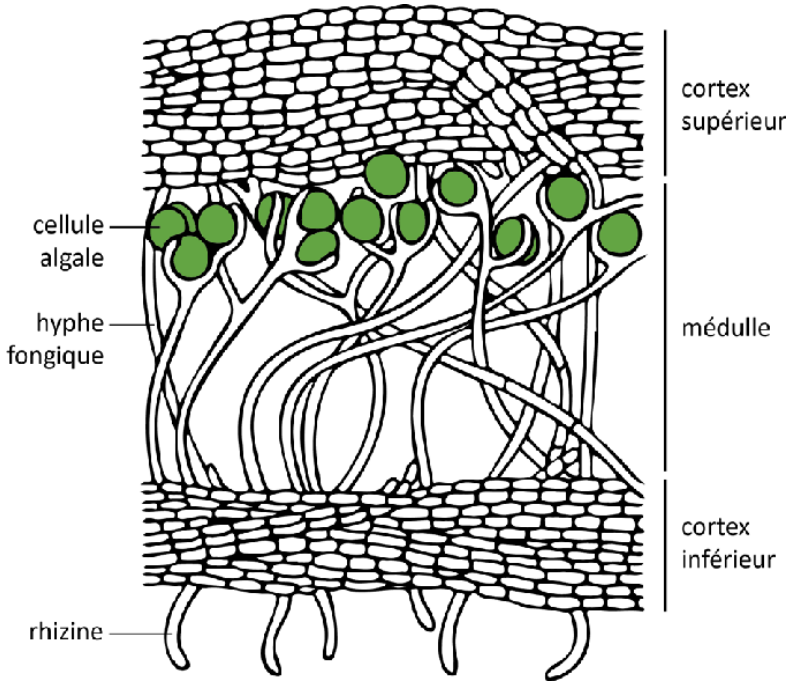


Figure 7 : Structure hétéromère d'un lichen (biogeoscience.be, n.d.).

Selon Lücking & Leavitt (2016), 19 387 espèces de lichens étaient reconnues, réparties en 995 genres. Chaque espèce présente des exigences écologiques et environnementales spécifiques (Lebbaz et al., 2025). Les lichens sont présents à l'échelle mondiale, dans des environnements très variés, allant des régions tropicales aux zones arctiques, ainsi qu'à de grandes différences d'altitude (Richardson, 1992). Leur croissance est très lente (en moyenne 5 mm par an) mais ils présentent généralement une longévité élevée, pouvant atteindre plusieurs dizaines voire centaines d'années (Richardson, 1992).

Parmi cette diversité, certaines espèces peuvent être différenciées sur base de caractères morphologiques observables. Les lichens présentent principalement trois types de thalle : fruticuleux, crustacé et foliacé (**Figure 8** ; Ahmadjian, 1993). D'autres caractéristiques morphologiques du thalle varient également selon les espèces. La structure des lobes (**Figure 9** (a) ; Kirschbaum & Wirth, 1997) par exemple ou bien la couleur. Cette dernière dépend de pigments spécifiques ou d'incrustations présentes dans le cortex (Hawksworth & James, 1974) allant de teintes ternes (brun, gris, gris blanc ou noir) à des couleurs plus vives (vert, jaune, orange) (Kirschbaum & Wirth, 1997; McCune & Yang, 2024).

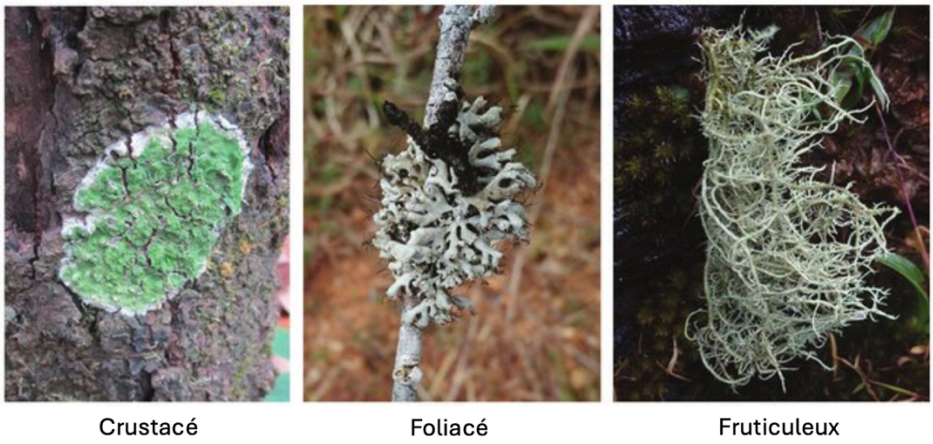


Figure 8 : Les trois principales formes de thalle chez les lichens (Sachin et al., 2018).

De nombreux types d'organes et de structures différents peuvent être retrouvés chez les lichens. La présence ou non de ces structures, leur combinaison, leur emplacement, leur forme, leur couleur, *etc*. sont autant de facteurs qui permettent l'identification des espèces. Parmi ces structures peuvent être citées : les pseudocyphelles, des ouvertures corticales favorisant les échanges gazeux (**Figure 9** (b) ; Hale, 1977; Truong et al., 2009) ; la pruine dépôt blanchâtre et farineux d'oxalate de calcium à la surface du thalle (**Figure 9** (c) ; Büdel & Scheidegger, 2008; Giordani et al., 2003; Heiđmarsson & Heidmarsson, 1996) ; le mode de fixation tel que les rhizines (**Figure 9** (d) ; Hawksworth & James, 1974) ainsi que les différentes structures de reproduction. Dans le cadre de la reproduction végétative (asexuée), les lichens peuvent produire des isidies, excroissances situées sur la face supérieure du thalle (**Figure 9** (e)), ou des soralies, structures poudreuses apparaissant à la surface ou aux ruptures du thalle (**Figure 9** (f)). La reproduction sexuée s'effectue quant à elle, par la production de spores dans des structures discoïdes appelées apothécies, présentes à la surface du thalle (**Figure 9** (g) ; Kirschbaum & Wirth, 1997).

Il convient toutefois de noter que les critères morphologiques ne suffisent pas toujours à différencier les espèces de lichens. Il est alors nécessaire de recourir à des approches microscopique (spores), chimique ou génétique (Lumbsch, 1998).

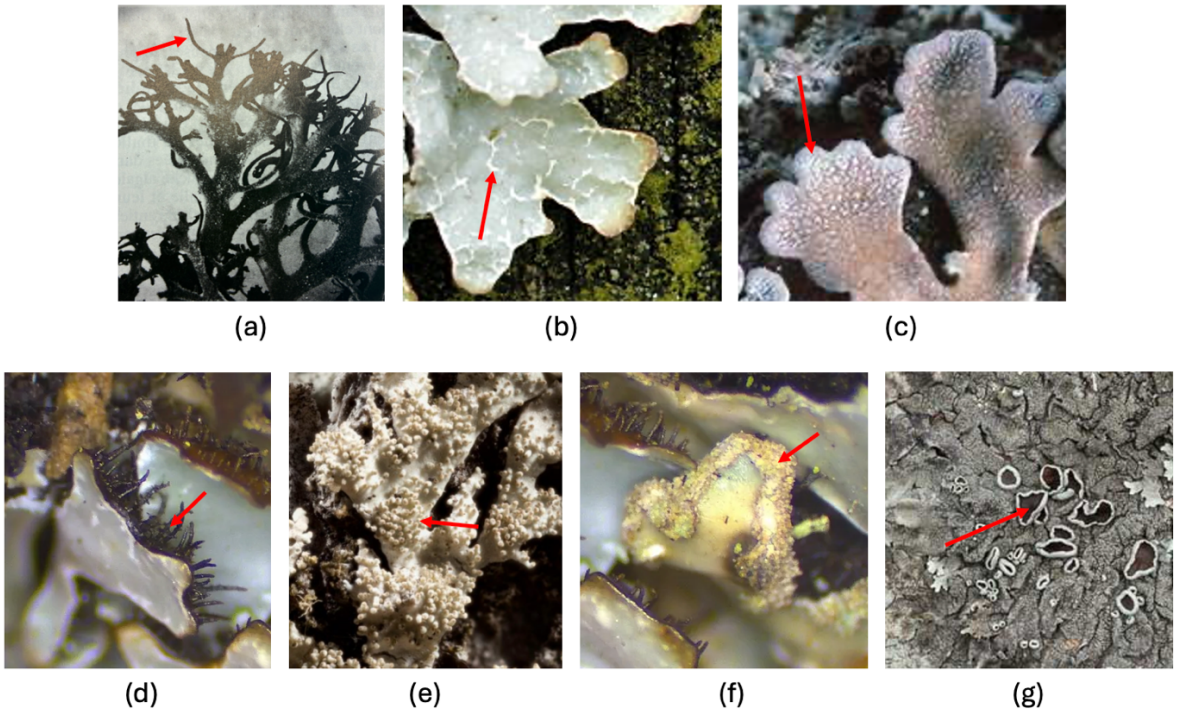


Figure 9 : Principales structures morphologiques des lichens : (a) cils (Kirschbaum & Wirth, 1997) ; (b) pseudocyphelles (Lindsey, n.d.) ; (c) pruine (Sharnoff, n.d.) ; (d) rhizines (Haleigh, 2023) ; (e) isidies (Ohio Plants, n.d.) ; (f) soralies (Haleigh, 2023) ; (g) apothécies (Gonnet, n.d.)

2.2.2. La bioindication par les lichens

Les lichens peuvent être utilisés dans le cadre de la biosurveillance (Richardson, 1992) notamment en bioindication, biointégration et bioaccumulation (Garrec & Haluwyn, 2002). La bioindication lichénique s'appuie sur la variabilité des communautés de lichens en fonction des espèces présentes, de leur distribution spatiale et des conditions environnementales.

Les lichens sont particulièrement adaptés à la bioindication, car ne possédant pas de racines, ils absorbent leurs nutriments directement dans l'air via la surface du thalle. Les éléments accumulés dans celui-ci proviennent dès lors majoritairement de l'air ambiant (Bergamaschi et al., 2007; Rola et al., 2016). Par ailleurs, ils ne disposent pas non plus de structures permettant de réguler leurs échanges avec l'atmosphère, telles qu'une cuticule, un épiderme ou des stomates. Ils absorbent ainsi directement les substances présentes dans l'air, ce qui les rend particulièrement sensibles à sa qualité (Bergamaschi et al., 2007; Stolte et al., 1993). Selon les espèces, les lichens peuvent présenter d'importantes capacités d'accumulation (Rola et al., 2016) et une sensibilité variable aux polluants ou aux conditions stationnelles (Kirschbaum & Wirth, 1997). Ainsi, l'analyse de la composition spécifique des communautés lichéniques peut fournir des informations sur les types de pollution présents sur un site (**Figure 10**).

Afin d'évaluer la qualité de l'air d'un site à partir des espèces qui y sont retrouvées, plusieurs indices et indicateurs ont été développés. Ces derniers transposent les espèces ainsi que leur abondance en valeur numérique permettant d'évaluer différents types de pollution de manière chiffrée. Tel est par exemple le cas du Nitrophytic Indicator Value (NIW) qui évalue

l'enrichissement en azote, de l'Acidophytic Indicator Value (AIW) qui indique le degré d'acidité du milieu, de la Lichen Diversity Value (LDV) basée sur le nombre et la diversité des espèces présentes ou encore diverses échelles de sensibilité au NH_3, au NO_2, à l'O_3, *etc*. (Garrec & Haluwyn, 2002; Ishikawa & Vasconcelos, 2021).

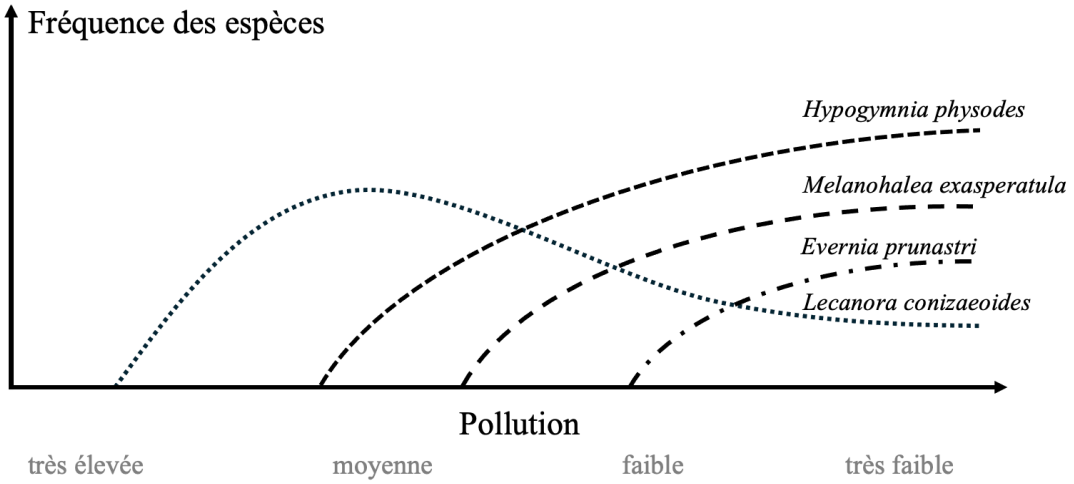


Figure 10 : Évolution de la fréquence de différentes espèces de lichens en fonction du degré de pollution atmosphérique en SO2 (Kirschbaum & Wirth, 1997).

Cette capacité de bioindication est renforcée, par la longévité importante des lichens qui permet de reconstituer l'évolution temporelle de la pollution atmosphérique. Leur fonctionnement métabolique continu, même en période hivernale, permet en outre, un suivi continu et régulier des conditions environnementales (Kirschbaum & Wirth, 1997).

2.2.3. Protocole de bio-indication par les lichens

La mise en place d'une biosurveillance lichénique à large échelle nécessite une harmonisation des méthodes afin d'assurer la comparabilité des résultats entre études (Cristofolini et al., 2014). En l'absence de standardisation, le croisement des données et leur interprétation demeurent, en effet, complexe. Afin de répondre à cette problématique, un groupe d'experts européens s'est réuni dans le but d'élaborer et d'adopter une méthode harmonisée. Le Comité européen de normalisation (CEN) a ainsi publié en 2014 la norme EN 16413 visant à garantir la standardisation, la reproductibilité et l'objectivité des études portant sur la diversité des lichens épiphytes dans le cadre de l'évaluation de la qualité de l'air (AFNOR, 2014).

Cette méthode repose sur plusieurs recommandations méthodologiques principales :

- Sélection des arbres supports : les arbres sélectionnés pour l'étude doivent appartenir à des espèces présentant une écorce subacide, neutre ou basique. Les écorces exfoliantes doivent être évitées, car elles présentent un substrat instable pour l'installation de lichens. La circonférence du tronc mesurée à 1,30 m du sol doit être comprise entre 50 cm et 250 cm. L'inclinaison de l'arbre doit également être inférieure à 20°, quelle que soit la face considérée.

- **Échantillonnage** : l'unité d'échantillonnage correspond soit à une zone de 30 m de rayon, lorsque la densité d'arbres est suffisante, soit à un arbre individuel. Une grille d'observation (10 × 50 cm), subdivisée en cinq mailles de 10 × 10 cm, est placée sur le tronc à 1 m du sol, successivement selon les quatre points cardinaux (N, S, E, O). Les espèces présentes dans chaque maille sont identifiées et le nombre de mailles occupé par chaque espèce est relevé.
- **Identification des lichens** : l'identification est généralement réalisée sur le terrain à partir d'observations directes en s'aidant de clefs d'identification ou de listes d'espèces. Des tests chimiques peuvent également être utilisés sur le terrain. Le prélèvement est limité autant que possible, mais peut être effectué si nécessaire pour des analyses complémentaires en laboratoire (microscopie, tests chimiques).

Bien que cette norme permette d'obtenir des relevés standardisés et comparables, sa mise en œuvre requiert un niveau d'expertise important. Cette contrainte limite ainsi le nombre de personnes susceptibles de réaliser les relevés et, par conséquent, la couverture spatiale et temporelle des données collectées. Elle est d'autant plus importante que l'un des principaux intérêts de la bioindication réside dans sa capacité à documenter la qualité de l'air sur un grand nombre de sites. Une solution à cette problématique peut être d'intégrer ces méthodes dans une approche de sciences participatives.

2.3. Apport des sciences participatives dans la biosurveillance

2.3.1. Les sciences participatives

Malgré l'absence de consensus sur leur définition (Auerbach et al., 2019), les sciences participatives sont généralement définies comme des programmes dans lesquels citoyens et scientifiques collaborent afin de produire des connaissances scientifiques (MacPhail & Colla, 2020). La mobilisation de volontaires non-professionnels, encadrés par des scientifiques, permet la récolte et/ou l'analyse de grands volumes de données générant des bénéfices mutuels.

Les sciences participatives, apparues dans les années 1990, connaissent une expansion rapide et couvrent aujourd'hui un large éventail de disciplines (Eitzel et al., 2017; MacPhail & Colla, 2020). Elles s'inscrivent par ailleurs dans une dynamique plus large de promotion de la transparence des politiques publiques et de la science ouverte (Marks et al., 2022), entendue comme une production de connaissances accessible, transparente et collaborative (Vicente-Saez & Martinez-Fuentes, 2018).

L'implication du public peut varier suivant les niveaux et modalités de participation (MacPhail & Colla, 2020; Marks et al., 2022). Selon Bonney et al. (2009), les sciences participatives se déclinent en trois catégories, en fonction du rôle des participants : contributives, collaboratives et cocréées (**Figure 11**).

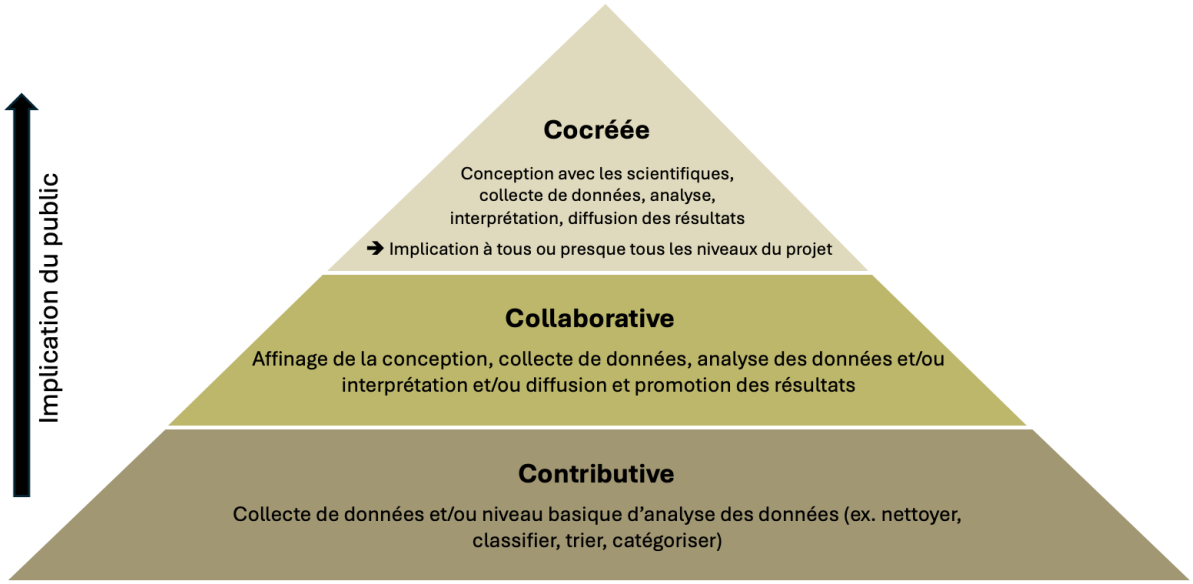


Figure 11 : Catégories de sciences participatives selon le degré d'implication des participants et le rôle qui leur est attribué (Bonney, Ballard, et al., 2009; Marks et al., 2022).

2.3.2. Intérêts et enjeux des sciences participatives

Les sciences participatives présentent de nombreux intérêts, tant pour la recherche scientifique que pour les participants et les politiques de gestion (MacPhail & Colla, 2020). Les bénéfices de ces programmes dépassent généralement le cadre de la recherche traditionnelle et incluent la production de connaissances, les échanges entre acteurs ainsi que la diffusion des résultats (Merilhou-Goudard et al., 2016).

Pour la recherche scientifique

D'un point de vue scientifique, la participation d'un grand nombre de volontaires à la collecte de données dans le cadre de sciences participatives permet d'accélérer significativement une partie du travail de recherche (Sauermann & Franzoni, 2015). Les données ainsi collectées, peuvent être combinées à celles produites par des professionnels, contribuant à l'enrichissement des jeux de données, à l'amélioration des connaissances et à la réduction des lacunes existantes (MacPhail & Colla, 2020). Cette dynamique collective favorise non seulement l'augmentation du volume de données, mais également l'élargissement de leur couverture spatiale en raison de la diversité géographique des participants (Franzoni & Sauermann, 2014; Pimm et al., 2014). Au-delà de ces gains quantitatifs et spatiaux, les sciences participatives présentent également des avantages économiques. En effet, les participants, souvent motivés par des facteurs non-financiers, contribuent bénévolement, permettant une allocation des ressources à d'autres aspects de la recherche (Franzoni & Sauermann, 2014).

Par ailleurs, le recours à un large public permet de mobiliser des compétences diversifiées, parfois absentes de la formation scientifique traditionnelle (Franzoni & Sauermann, 2014). Dans les projets collaboratifs ou cocréés, cette diversité de profils favorise la production d'idées nouvelles et stimule les processus d'innovation (Knippenberg et al., 2004; Sauermann & Franzoni, 2015).

Enfin, les sciences participatives contribuent également à la promotion et à l'enseignement de la science (Wiggins & Crowston, 2011). En rendant visibles les méthodes et les processus de validation propres à la recherche, elles participent à la lutte contre la désinformation et au renforcement de la confiance du public envers la science (Watson & Floridi, 2018).

Pour les volontaires

La participation à des programmes de sciences participatives permet aux volontaires de répondre à diverses motivations, telles que le défi intellectuel, l'intérêt pour un domaine scientifique particulier ou le désir de contribuer à la recherche (Franzoni & Sauermann, 2014). Elle favorise également l'acquisition de nouvelles connaissances et compétences, ainsi qu'une sensibilité accrue aux thématiques étudiées (Wiggins & Crowston, 2011). Dans le cas de programmes liés à l'environnement, les participants peuvent notamment développer une conscience environnementale renforcée et y puiser une source d'inspiration pour leurs choix personnels et professionnels. Par ailleurs, l'implication active dans des démarches de recherche contribue à une meilleure compréhension de la méthode scientifique, renforçant la capacité à distinguer les informations fiables des fausses croyances (Watson & Floridi, 2018). De manière générale, les sciences participatives peuvent influencer les perceptions et le comportement des participants, amenant des répercussions potentielles sur leurs actions futures (MacPhail & Colla, 2020).

Pour les politiques de gestion

Les sciences participatives contribuent à l'amélioration des politiques de gestion en renforçant leur base scientifique, notamment par l'intégration de connaissances locales. Elles facilitent la prise de décision et favorisent l'acceptation des mesures par les citoyens (Hecker et al., 2019). Elles participent également au renforcement de la transparence et de l'engagement démocratique. Enfin, elles peuvent influencer les processus décisionnels en lien avec les thématiques étudiées et contribuer à l'intégration des résultats scientifiques dans les débats publics (Van Brussel & Huyse, 2019).

2.3.3. Risques et difficultés des sciences participatives

Dans la mesure où la participation citoyenne constitue le pilier des sciences participatives, l'un des principaux défis réside dans la capacité à recruter et à fidéliser les participants (Asingizwe et al., 2020). Dans la plupart des programmes, une part importante des personnes participe en réalité de manière ponctuelle et peu fréquente, et une majorité d'entre eux cessent leur engagement peu de temps après leur inscription (Franzoni & Sauermann, 2014).

La pérennité de ces programmes dépend fortement de l'intérêt du public et de la continuité de sa contribution en données (Sauermann & Franzoni, 2015). Plusieurs facteurs peuvent freiner, voire empêcher, la participation à de tels programmes, et ce, à différents niveaux (Figure 12). Parmi ceux-ci figurent notamment le statut socio-économique, la disponibilité temporelle, l'accès aux transports ou encore la perception des sciences (MacPhail & Colla, 2020). Dans ce contexte, la conception des programmes de sciences participatives doit concilier les objectifs scientifiques avec les attentes et contraintes des participants (Shirk et al., 2012).

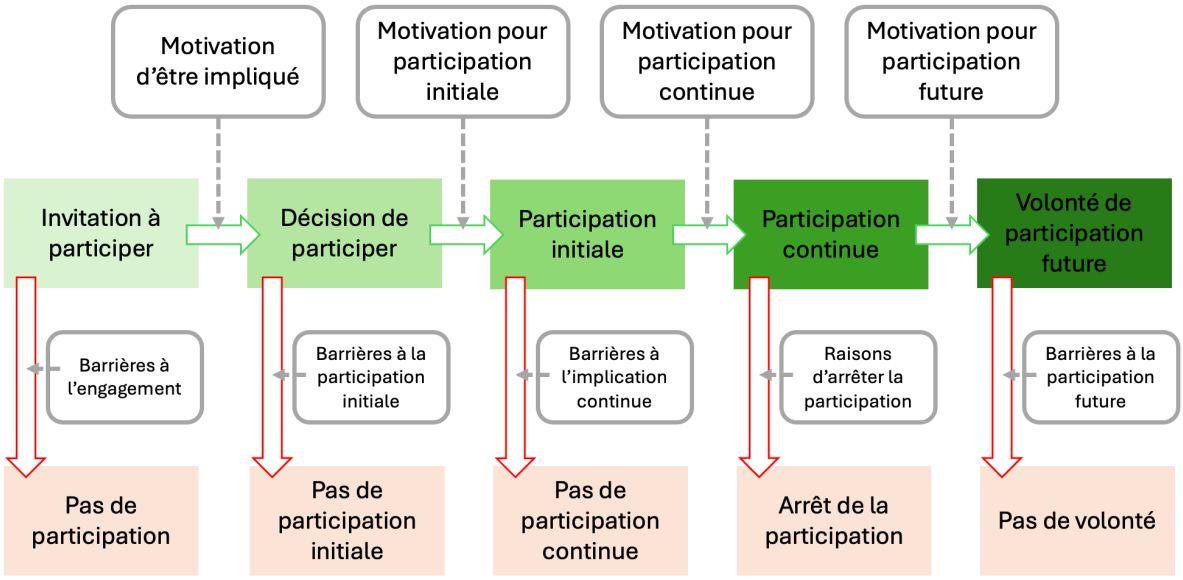


Figure 12 : Évolution de l'implication du public dans un programme de sciences participatives, ainsi que des motivations et des freins qui l'influencent (Asingizwe et al., 2020).

La qualité des données constitue une autre limite majeure des sciences participatives (Wiggins & Crowston, 2011). De mauvaises données mènent à des résultats incorrects, et à des conséquences potentiellement importantes, particulièrement lorsque ces résultats sont utilisés dans le cadre de politiques de conservation (MacPhail & Colla, 2020). Selon le type de programme, ces erreurs peuvent avoir des origines variées. Dans le cas de programmes d'observation, deux types d'erreurs sont majoritairement rencontrés : les faux positifs, correspondant à la déclaration d'une observation inexistante, et les faux négatifs, correspondant à l'absence de détection d'un élément pourtant présent (Kelling et al., 2015). Par ailleurs, plusieurs types de biais peuvent affecter la qualité des données (MacPhail & Colla, 2020; Wiggins & Crowston, 2011). Un biais spatial peut apparaître en raison de concentrations des observations dans les zones densément peuplées ou densément visitées, conduisant à une représentation inégale du territoire. Un biais d'espèce survient lorsque certaines espèces sont plus ou moins fréquemment signalées que d'autres, par exemple en raison de leur reconnaissance plus simple, ce qui altère l'estimation de leur distribution réelle. Enfin, un biais temporel peut résulter d'une concentration des observations sur certaines périodes du jour ou de l'année.

2.3.4. Exemples d'applications des sciences participatives

Bien qu'un grand nombre de projets de sciences participatives soient relatifs aux sciences naturelles, ces initiatives concernent également d'autres domaines tels que les sciences médicales, les sciences de gestion ou encore la gestion du trafic (MacPhail & Colla, 2020). Le rapport de Merilhou-Goudard et al. (2016) propose une estimation de la répartition des disciplines à partir d'un ensemble de projets de sciences participatives menés en France, présentée à la **Figure 13**.

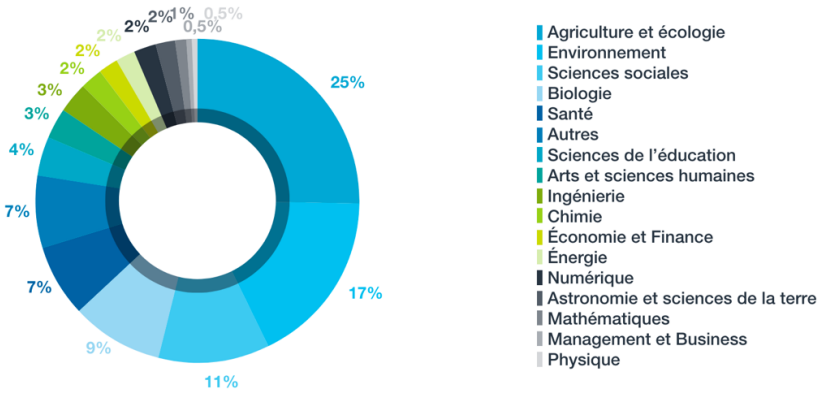


Figure 13 : Répartition de 178 projets français de sciences participatives par domaine (Merilhou-Goudard et al., 2016).

Environ un quart des projets de sciences participatives identifiés en France concerne les domaines de l'agriculture et de l'écologie. Bien que cette catégorie soit majoritaire, elle regroupe des thématiques variées, telles que de l'adaptation des systèmes agricoles aux changements climatiques (Farmatch[1]) ou encore le suivi de la biodiversité. De nombreux projets reposent ainsi sur l'observation d'espèces animales (Oiseaux des jardins[2], Spipoll[3], Opération méduses[4]) ou végétales par les citoyens (Pl@ntNet[5], Flora Data[6]). Les sciences participatives s'étendent également à d'autres domaines tels que la santé, certains programmes mobilisant les citoyens pour surveiller la propagation de maladies (GrippeNet.fr[7], Citique[8]), ou bien l'astronomie, avec la contribution d'amateurs dans l'observation de phénomènes célestes (Radio Meteor Zoo[9]). Cette diversité témoigne de la capacité des sciences participatives à répondre à des enjeux variés.

Au-delà des thématiques abordées, les sciences participatives se caractérisent également par une diversité d'approches, certains projets reposant sur l'identification et le recensement d'espèces (Réseau National d'échouage[10], Observatoire des rapaces[11]), alors que d'autres sont davantage axés sur la collecte de données quantitatives, notamment à l'aide de capteurs ou de réseaux d'observation (Météo à l'école[12], CurienzenAir[13]).

[1] https://climae.hub.inrae.fr/presentation/historique/farmatch
[2] https://www.oiseauxdesjardins.fr/index.php
[3] https://www.spipoll.org
[4] https://www.operation-meduses.org/presentation-operation-meduses.php
[5] https://plantnet.org
[6] https://www.tela-botanica.org/thematiques/flora-data/
[7] https://app.grippenet.fr/welcome
[8] https://www.citique.fr
[9] https://www.zooniverse.org/projects/fr/zooniverse/radio-meteor-zoo
[10] https://www.observatoire-pelagis.cnrs.fr/echouages/reseau-national-echouage/
[11] http://observatoire-rapaces.lpo.fr
[12] https://www.sciencesalecole.org/plan-meteo-a-lecole-presentation/
[13] https://curieuzenair.brussels/fr/acceuil/

2.3.5. Lichens GO : un exemple de programme de sciences participatives.

Parmi les exemples de programmes de sciences participatives, l'observation de la faune et de la flore constitue une thématique récurrente, tout comme la surveillance de la qualité de l'air. Lichens GO est un programme qui illustre l'intégration de la question de la biosurveillance de la qualité de l'air dans une démarche de sciences participatives. Lancé en 2017, il vise à évaluer la qualité de l'air en milieu urbain à partir du relevé de lichens épiphytes présents sur un site (www.lichensgo.eu). Il s'appuie sur le protocole d'échantillonnage standardisé à l'échelle européenne EN 16413 (AFNOR, 2014), adapté à son intégration dans une démarche de participation citoyenne (Counoy et al., 2023).

Le protocole d'échantillonnage, prévoit l'observation de trois arbres, préférentiellement de la même espèce, espacés de moins de 50 mètres et respectant une circonférence minimale de 50 cm. L'identification repose sur une clef simplifiée spécifique au programme, comprenant 38 types de lichens couramment observés en milieu urbain et distinguables sur base de critères morphologiques. Ces types correspondent à 35 taxa incluant 29 espèces et 6 groupes d'espèces, plus 3 catégories « Autre ». En juin 2019, la plateforme en ligne de Lichens GO a été créée et depuis ce lancement, 684 relevés y ont été enregistrés en date du 31 mai 2026.

Sur le plan pédagogique, Lichens GO présente un potentiel important. La biosurveillance permet de faire comprendre l'enjeu de la qualité de l'air plus simplement au public en le traduisant par des observations visibles (Garrec & Haluwyn, 2002). Ce type de démarche peut notamment être mobilisé dans un cadre scolaire, en tant qu'outil pédagogique ou activité complémentaire (Garrec & Haluwyn, 2002). En France, les sciences participatives s'intègrent dans différents dispositifs éducatifs par exemple au niveau des nouveaux modules d'éducation morale et civique ou bien encore dans le cadre des enseignements pratiques interdisciplinaires (Merilhou-Goudard et al., 2016). Dans ce contexte, l'intégration de Lichens GO en milieu scolaire constitue également un levier potentiel de diffusion du programme à plus large échelle (Hanoteaux, 2017).

Cependant, dans des projets de sciences participatives à large public comme Lichens GO, l'accessibilité des tâches pour chacun est parfois discutable en raison des barrières logistiques telles que le temps ou les capacités (Behrens & Colombelli-Négrel, 2024). Une étude réalisée par Counoy et al. (2023) sur le programme Lichens GO a notamment montré que celui-ci était jugé trop complexe par certains participants, en particulier en raison du nombre important de taxa à observer. D'autres participants, à l'inverse, indiquaient ne pas souhaiter les simplifications proposées. Ceci rejoint d'autres études qui soulignent l'importance de proposer des niveaux d'efforts ou de difficultés différents afin de rendre accessible le programme à davantage de personnes tout en gardant le programme attrayant pour les personnes souhaitant relever plus de défis (A. Land-Zandstra et al., 2021; Vecina Jiménez et al., 2010).

3. Objectifs et démarche

Bien que les sciences participatives présentent un grand intérêt, elles nécessitent cependant de trouver un compromis entre rigueur scientifique et accessibilité pour les citoyens. Lichens GO s'inscrit dans cette recherche d'équilibre entre, d'une part, la récolte de données exploitables et, d'autre part, l'accès aisé au public et la collecte de données à grande échelle. Par ailleurs, les protocoles de sciences participatives évoluent selon l'expérience vécue par les participants et la qualité des observations qui en découlent. Dans le cadre du protocole Lichens GO, il a été constaté, notamment sur base de retours de participants, que le protocole actuel restait complexe pour certains, particulièrement les novices et le milieu scolaire.

Ce constat conduit à l'objectif de ce mémoire, qui est d'adapter le protocole du programme de sciences participatives Lichens GO, en proposant une version simplifiée de celui-ci. Cette version, principalement adressée aux novices et aux jeunes publics, a pour vocation d'exister en parallèle du protocole complet.

Ce travail essaie de répondre à cet objectif en traitant deux grandes sous-questions fortement liées l'une à l'autre :

1- Quelles sont les difficultés rencontrées par les utilisateurs du programme de sciences participatives Lichens GO sous sa forme actuelle ? Quels sont les éléments qui freinent l'entrée dans le programme pour les non-participants ?

2- Comment y remédier en simplifiant le protocole tout en conservant des résultats valides, exploitables et comparables à ceux obtenus au travers du protocole complet ?

Le mode opératoire pour répondre à cet objectif et à ces questions peut être divisé en deux phases distinctes (Figure 14). Dans un premier temps, une enquête en ligne a été menée afin de recueillir à la fois l'avis des non-utilisateurs de Lichens GO et celui des utilisateurs de la plateforme, particulièrement des enseignants l'ayant utilisée dans le cadre scolaire. Ces réponses ont été analysées afin de répondre à la première question et de déterminer quels leviers de changement auraient le plus d'impact sur l'utilisation du protocole par ceux qui rencontrent actuellement des difficultés. Dans un second temps, plusieurs scénarios de changements ont été réalisés sur la base des pistes d'améliorations dégagées de l'analyse des réponses de la première question. Différentes analyses ont été conduites dans le but d'évaluer les impacts de ces changements : (1) sur les résultats, (2) sur l'expérience des participants.

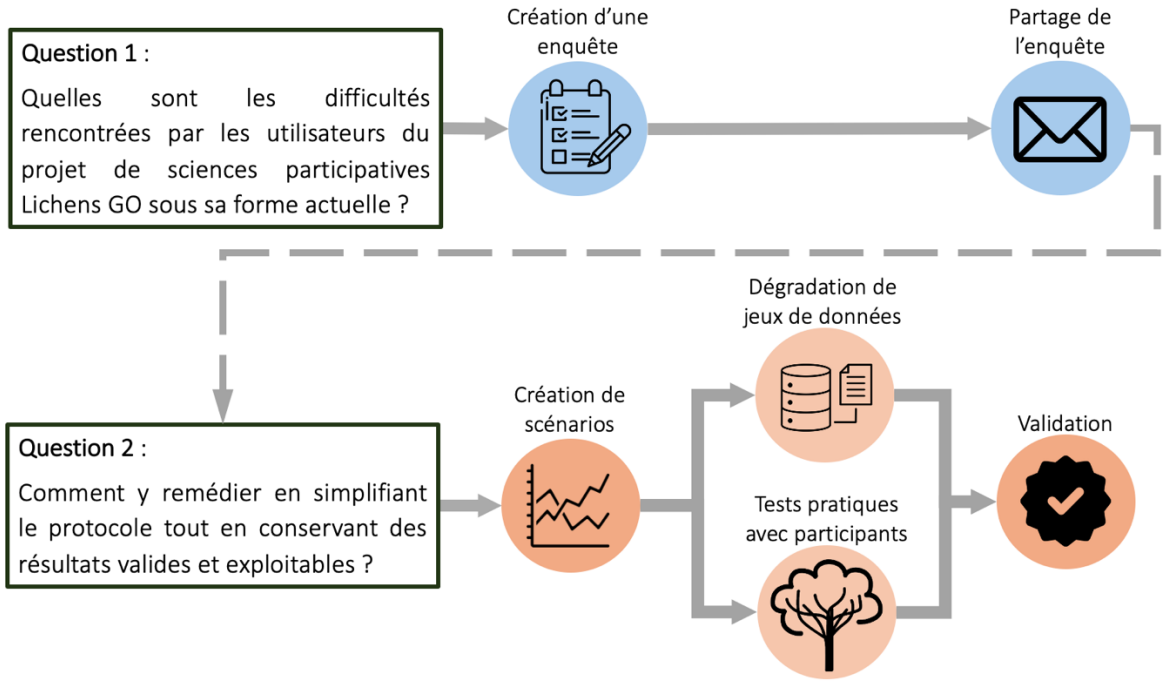


Figure 14 : Organisation de la démarche méthodologique visant à répondre aux deux questions de recherche, structurée en deux phases : phase d'enquête (bleu) et phase de scénarios et d'analyses (rouge).

4. Matériels et méthodes

4.1. Enquête auprès des participants de Lichens GO

4.1.1. Conception de l'enquête

Afin d'identifier les étapes du protocole susceptibles de poser des difficultés aux participants, ainsi que celles ne constituant pas de contrainte particulière, une enquête d'une trentaine de questions a été réalisée sur *Microsoft Forms*. Celle-ci a été rédigée uniquement en français, dans la mesure où Lichens GO est principalement utilisé en France et en Belgique francophone. Différents types de questions ont été utilisés :

- questions à réponse unique (QRU) et questions à réponses multiples (QRM) : utilisées pour la standardisation de certaines données, facilitant la comparaison entre répondants et l'analyse statistique des résultats.
- questions matricielles à échelle de type Likert : utilisées afin d'évaluer de manière graduée les perceptions des participants, notamment sur le niveau de difficulté associé à différentes étapes du protocole (Batterton & Hale, 2017; Likert, 1932). Elles ont également l'avantage de faciliter l'analyse statistique des réponses.
- questions ouvertes : utilisées de manière à recueillir des remarques plus nuancées tenant compte des spécificités de chaque répondant non couvertes par les propositions de réponses.

Afin de structurer l'évaluation des difficultés rencontrées par les participants, le protocole Lichens GO a été subdivisé, dans certaines questions de l'enquête, en quatre phases distinguées et définies comme suit :

- Phase de préparation : sélection du site, préparation/obtention du matériel, déplacements éventuels et prise de connaissance des consignes et du sujet.
- Phase de terrain : mise en place du matériel et réalisation des observations.
- Phase de saisie des données : saisie des données récoltées sur papier, sur la plateforme spécifique de Lichens GO.
- Phase d'analyse : interprétation et visualisation des résultats notamment sur la plateforme.

L'enquête finale, disponible en ANNEXE A, est divisée en sept grandes sous-sections : (1) distinction entre participants et non-participants, (2) historique de participation, (3) connaissances et intérêts pour les sujets liés à Lichens GO, (4) répartition des participants en catégories, (5) analyse du temps de participation, (6) identification des facilités et difficultés du protocole et (7) profil et contact. Au sein de ces sections, il a notamment été question de distinguer les participants des non-participants afin de pouvoir en parallèle poser des questions ciblées sur les raisons de leur non-participation, pour pouvoir identifier des points de changements qui seraient de nature à favoriser une augmentation de la participation. Une

répartition des participants a également été faite en fonction du cadre dans lequel ils ont participé (enseignement, milieu associatif ou d'éducation à l'environnement, pratique personnelle et autre), lequel peut influencer certains aspects, dont notamment les difficultés rencontrées ou non.

L'enquête a été conçue conformément au Règlement général sur la protection des données (RGPD) (Règlement (UE) 2016/679 (RGPD), 2016) et les champs obligatoires ont été strictement limités. Les répondants ont toutefois eu la possibilité de laisser leurs coordonnées afin d'être éventuellement recontactés dans le cadre de tests d'un protocole simplifié.

Dans un premier temps, l'enquête a été diffusée le 9 janvier 2026 auprès d'environ 600 abonnés à la newsletter de Lichens GO. Elle a ensuite également été relayée par le Muséum national d'Histoire naturelle (MNHN) via Vigienature École (VNE), Scienceinfuse et le Centre Régional d'Initiation à l'Environnement (CRIE) de Mariemont.

4.1.2. Analyse des réponses de l'enquête

Les réponses de l'enquête ont été rassemblées dans un fichier *Excel* pour être ensuite analysées à l'aide du langage de programmation *Python*. Un premier tri des données a été réalisé en séparant les non-participants des participants afin de les traiter séparément.

D'un point de vue qualitatif, une analyse visuelle a d'abord été réalisée à l'aide d'une série de graphiques représentant les réponses aux différentes questions de l'enquête et leur croisement entre elles. L'analyse des questions ouvertes s'est quant à elle faite par l'ajout de tags afin de regrouper les idées ressortant des réponses laissées par les répondants, ce qui a permis d'identifier les idées les plus fréquemment mentionnées.

Des tests statistiques ont ensuite été réalisés afin de quantifier les relations observées et de déterminer l'existence de relations significatives entre les groupes ainsi que des corrélations entre les variables. Le test exact de Fisher a été utilisé pour comparer des variables qualitatives entre deux groupes, avec application d'une correction du taux de fausses découvertes (FDR) en cas de comparaisons multiples. Lorsque les variables étudiées étaient ordinales, les comparaisons entre deux groupes ont été effectuées à l'aide du test de Mann–Whitney. Les relations entre variables quantitatives ou ordinales ont, quant à elles, été évaluées à l'aide du coefficient de corrélation de Spearman. Par ailleurs, lorsque les comparaisons concernaient plusieurs phases évaluées chez les mêmes individus, le test de Friedman a été utilisé afin d'examiner les différences globales. En cas de résultat significatif, des analyses post-hoc ont été réalisées à l'aide de tests de Wilcoxon appariés, avec application d'une correction de Holm pour les comparaisons multiples.

4.2. Évaluation de scénarios de simplification à partir de jeux de données

Les difficultés identifiées lors de l'enquête ont ensuite servi de base à la proposition de scénarios de modifications. L'évaluation de l'acceptabilité de ceux-ci s'est, dans un premier

temps, basée sur une analyse quantitative des écarts observés entre indices des scénarios simplifiés et indices du protocole complet.

4.2.1. Dégradations de jeux de données d'observations de lichens

L'analyse quantitative de l'impact des modifications apportées au protocole sur les résultats s'est basée sur une dégradation de jeux de données existants, contenant des observations de lichens réalisées selon le protocole complet ou une méthodologie similaire. Deux jeux de données ont été sélectionnés. Le premier est celui de la thèse de Hugo Counoy, comprenant les données issues de 159 sites de quatre arbres, situés en Wallonie (**Figure 15**) et avec 111 taxa lichéniques répertoriés. Il présente l'avantage d'avoir été collecté par les mêmes observateurs, garantissant une certaine homogénéité des relevés, tout en couvrant une diversité de contextes allant de grandes villes à de petits villages ruraux. Ce jeu de données étant construit selon la norme EN 16413 (*cf.* 2.2.3) qui identifie tous les taxas possibles. Afin de reprendre les simplifications de Lichens GO, certains taxa ont été rassemblés ensemble et d'autres ont été supprimés, ne faisant pas partie des taxa à observer dans le programme. Les données relatives au quatrième arbre de chaque site ont également systématiquement été retirées.

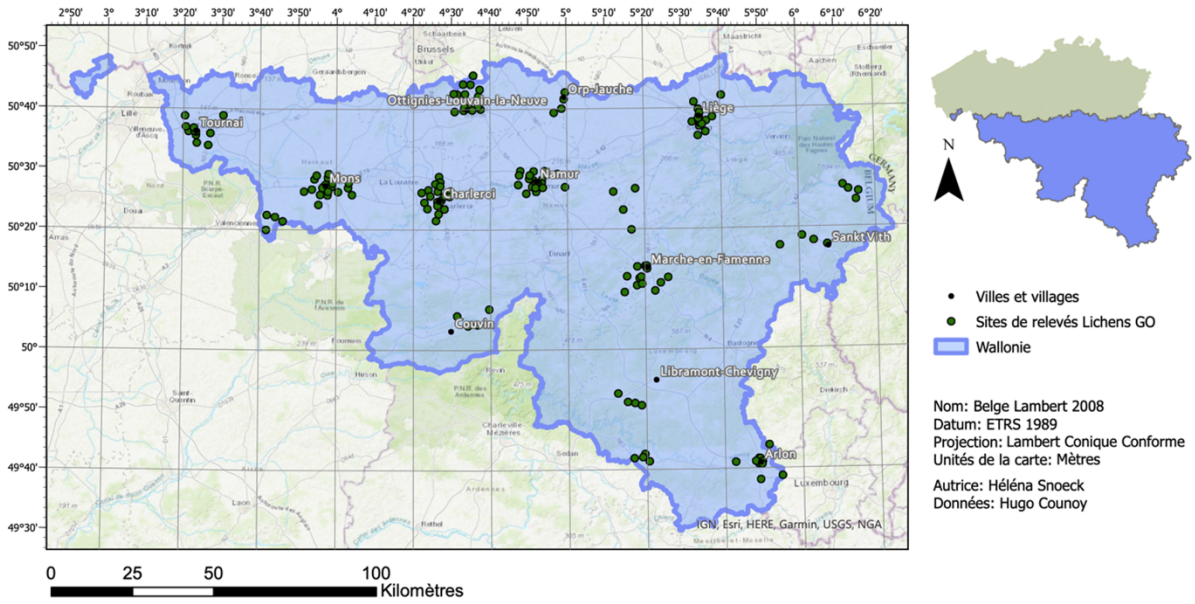


Figure 15 : Localisation des différents sites de relevés répertoriés dans la base de données de Wallonie.

Le second jeu de données est une sous-sélection de celui de Lichens GO réalisé autour de la ville de Clermont-Ferrand. Il comprend quant à lui des relevés issus de 102 sites de trois arbres (**Figure 16**). Ce jeu de données prend en compte 35 taxa, ainsi que trois catégories « Autre ». Il présente l'avantage de contenir beaucoup de données au format Lichens GO et d'être homogène, dans la mesure où l'ensemble des relevés a été réalisé par la même équipe dirigée par Françoise Peyrissat, la participante ayant réalisé le plus de relevés à ce jour.

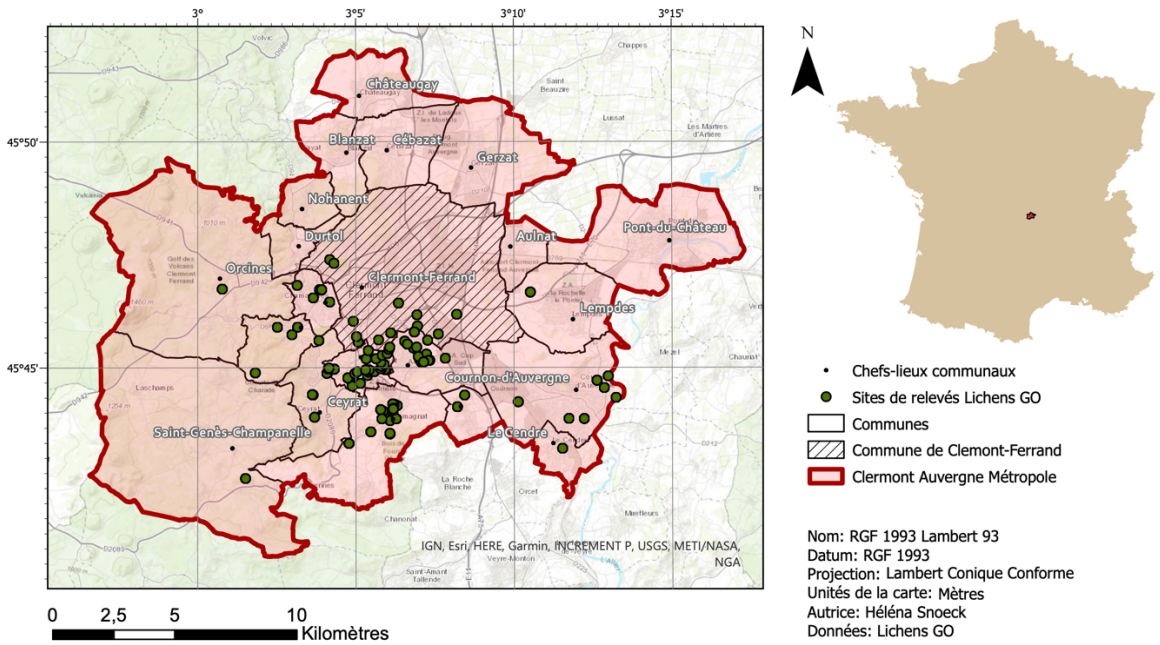


Figure 16 : Localisation des sites de relevés Lichens GO répertoriés dans la base de données du programme au sein de Clermont Auvergne Métropole.

Chacun des deux jeux de données au format Lichens GO a été dégradé au niveau des taxa (une seconde fois pour le jeu de Wallonie) afin de les rendre représentatifs des données attendues dans le cadre d'une version simplifiée du protocole.

4.2.2. Analyse statistique et visualisation des écarts induits par la dégradation

Structure des relations entre taxa

La visualisation des rapprochements entre taxa a été réalisée sur base d'une ordination de ces taxa dans l'espace (*non metric multidimensional scaling* ou NMDS) à partir des observations de leur présence sur les sites des jeux de données. La distance entre les taxa a été calculée sur base de la distance de Bray-Curtis (d) (Bray & Curtis, 1957), par l'intermédiaire de la fonction *pdist* de *Scipy* qui applique la formule théorique suivante :

$$d = 1 - \frac{2 \times w}{a + b} \quad (1)$$

Où :
$\boldsymbol{a}$ correspond à la somme des mesures quantitatives des lichens dans un premier site
$\boldsymbol{b}$ correspond la somme pour un second site
$\boldsymbol{w}$ correspond à la somme des valeurs les plus faibles pour les seuls taxa communs aux deux sites

Le nombre de clusters a été déterminé à l'aide d'un algorithme des k-means provenant de la fonction *KMeans* de la bibliothèque *Sklearn,* appliqué aux coordonnées NMDS. Le nombre de clusters k a été exploré de manière itérative (de 2 à 7) et évalué à l'aide du coefficient de silhouette (Rousseeuw, 1987), maximisé pour sélectionner la partition la plus cohérente.

Mesure de l'impact sur les indices

Dans le but d'estimer les variations et potentielles dégradations dans les informations obtenues des relevés, les variations de différents indices dont ceux présentés sur la plateforme Lichens GO avant et après dégradation des jeux ont été considérées. Ces indices se répartissent en indices écologiques (part de taxa eutrophes et part de taxa acidophiles), en indices biologiques (Valeur de Diversité Lichénique, LDV) et en indices de pollution (part de taxa toxitolérants). Des indices de pollution non-disponibles sur Lichens GO ont également été ajoutés : parts de taxa résistants aux SO_2, NH_3 et NO_x ainsi que parts de taxa sensible aux SO_2, NH_3 et NO_x.

Les différents indices écologiques et de pollution ont été calculés en réalisant le rapport de la somme des recouvrements des taxa concernés sur la somme totale des recouvrements sur le site. Ceux-ci ayant été calculés pour chaque site avant et après dégradation des jeux de données, les différences absolues et relatives entre les deux ont été calculées afin de quantifier l'écart induit par la simplification du protocole. En complément, plusieurs métriques de comparaison ont été utilisées : l'erreur absolue moyenne (MAE), le coefficient de corrélation de Pearson entre les deux versions des indices, ainsi que le biais moyen.

La LDV, indic basé sur la fréquence d'observation des taxa de lichens sur les arbres, a également été calculée. Cet indice, formalisé par Asta et al. (2002) dans le cadre d'une méthode européenne standardisée de biosurveillance des écosystèmes épiphytes, est ici utilisé comme outil de comparaison entre les protocoles complet et simplifié afin d'évaluer la cohérence des résultats à l'échelle des sites. Son calcul repose sur les équations proposées par Asta et al. (2002) qui sont reprises dans la norme EN 16413 (*cf.* 2.2.3) publiée par AFNOR (2014) :

$$\mathrm{SF}_{\mathrm{t,face}} = \sum_{\mathrm{e} \in \mathrm{E}} f_{t,face,e} \quad (2)$$

$$LDV_t = SF_{N,t} + SF_{E,t} + SF_{S,t} + SF_{O,t} \quad (3)$$

$$LDV_j = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} LDV_t \quad (4)$$

Où :

$\boldsymbol{SF_{t,face}}$ désigne la somme des fréquences des taxa observés sur une face de l'arbre $\boldsymbol{t}$
$\boldsymbol{f_{t,face,e}}$ correspond à la fréquence du taxa $\boldsymbol{e}$ sur cette face
$\boldsymbol{LDV_t}$ est la diversité lichénique de l'arbre $\boldsymbol{t}$
$\boldsymbol{SF_{N,t}, SF_{E,t}, SF_{S,t}, SF_{O,t}}$ sont les sommes des fréquences respectivement pour les faces Nord, Est, Sud et Ouest
$\boldsymbol{LDV_j}$ représente la diversité lichénique du site j
$\boldsymbol{n}$ est le nombre d'arbres considérés sur le site (= 3)

Une comparaison du choix de simplification émis par rapport à d'autres choix possibles a été opérée afin de voir sur une seule base quantitative de conservation des indices si le choix émis se situait parmi les meilleures possibilités. Pour ce faire, une procédure d'optimisation a été mise en place. Pour chaque combinaison de choix testée, les indices écologiques et de pollution ont été recalculés à partir du sous-ensemble de taxa sélectionné, puis comparés aux valeurs obtenues avec l'ensemble initial de 35 taxa. La qualité de chaque sélection a été évaluée à l'aide

d'un score composite combinant l'erreur absolue moyenne (MAE) et la corrélation de Pearson entre les indices issus des deux versions du protocole. Ce score vise à être minimisé et permet de prendre en compte à la fois l'amplitude des écarts et la cohérence des variations. Une recherche aléatoire de 10 000 itérations a été réalisée afin d'explorer l'espace des combinaisons possibles et d'identifier la distribution des valeurs de score pour les choix, afin de la comparer au score obtenu sur le choix qui a été posé.

4.3. Évaluation de scénarios de simplification à partir de tests de terrain

4.3.1. Conception et mise en place des tests de scénarios du protocole simplifié

Au-delà d'une analyse quantitative des impacts des modifications sur les résultats obtenus, il apparaît nécessaire également d'évaluer de manière qualitative le ressenti des participants vis-à-vis des changements proposés. A cet effet, des citoyens ont été contactés afin de leur faire tester différents scénarios de modifications et de recueillir leurs retours d'expérience. Dans cette optique, deux approches complémentaires ont été mises en œuvre. L'une repose sur des tests réalisés à distance, permettant d'inclure des profils variés de participants et notamment d'anciens participants à Lichens GO ayant déjà eu une première approche du programme. L'autre consiste en des tests menés à Louvain-la-Neuve, offrant la possibilité d'un contact direct avec les participants et la possibilité d'une observation plus approfondie de leurs réactions sur le terrain.

Tests à distance

Une première prise de contact avec les personnes intéressées a été organisée au travers de visio-conférence *via Microsoft Teams*, afin de leur présenter en détails les propositions de modifications formulées ainsi que les tests attendus de leur part. Un formulaire *Google Forms* proposant différents créneaux de visioconférence a été transmis aux répondants de l'enquête ayant laissé leurs coordonnées et relayée dans la newsletter Lichens GO d'avril 2026. Les 28 réponses obtenues ont permis d'organiser plusieurs visioconférences. Au total, 12 participants issus de profils variés (scolaire et non-scolaire) ont pris part aux échanges, offrant une diversité de points de vue.

Différentes ressources ont été élaborées et rassemblées dans un dossier partagé sur *Google Drive* afin de permettre aux testeurs de réaliser les essais. Tout d'abord, la clef d'identification[14], devenue inadaptée au protocole simplifié, a été remplacée par une fiche taxa (ANNEXE B). Les fiches de relevé de terrains de Lichens GO[15] ont également fait l'objet de légères adaptations afin de correspondre au protocole (ANNEXE C). En complément, des fiches explicatives spécifiques à chaque scénario de test ont été fournies, adaptées de celles de Lichens GO[14] (ANNEXE D). Enfin, une enquête complémentaire a été conçue sur *Microsoft Forms* afin de recueillir les retours des participants concernant le ou les scénarios

[14] https://www.lichensgo.eu/Files/Other/livret_lichensgo.pdf
[15] https://www.lichensgo.eu/Files/Other/fiche_lichensgo.pdf

testés, leurs avantages et inconvénients perçus, ainsi que les préférences des participants entre les différents scénarios ou par rapport au protocole complet (ANNEXE E). Dans celui-ci, il a également été demandé aux répondants de donner une appréciation globale de chaque scénario au moyen d'une note comprise entre 1 et 10, 10 étant une forte appréciation du scénario.

Tests locaux à Louvain-la-Neuve

Les participants aux tests réalisés à Louvain-la-Neuve ont été contactés par e-mail ou *via* des messages envoyés sur *Microsoft Teams* ou *Messenger*. Les personnes sollicitées l'ont été soit en raison de leur intérêt antérieur pour les activités Lichens GO, soit pour leur motivation à contribuer à la réalisation de ce mémoire. Vingt-et-un testeurs ont été recrutés et ont pris part aux tests à Louvain-la-Neuve. Le panel était principalement constitué d'étudiants universitaires, allant de la première année d'études jusqu'au master, mais comprenait également de jeunes travailleurs ainsi que des diplômés. La majorité d'entre eux étaient liés, directement, à la Faculté des bioingénieurs (AGRO).

Quatre groupes ont ainsi été constitués afin de réaliser les tests de protocoles simplifiés avec un accompagnateur (Tableau 1). Cet accompagnement a principalement permis d'observer directement le comportement des testeurs sur le terrain, mais également de leur fournir quelques informations préalables sur le protocole et les lichens. Cette formation, très brève, n'est cependant pas comparable avec celle reçue par les participants lors d'introduction de l'activité, notamment en contexte scolaire ou associatif.

Par ailleurs, une activité parallèle a pu être menée auprès d'étudiants de deuxième année d'enseignement scientifique (Section 3) par l'intermédiaire de Scienceinfuse[16], l'antenne de formation et de promotion des sciences et technologies de l'UCLouvain. Les neuf étudiants concernés ont, quant à eux, bénéficié d'une introduction plus poussée d'une heure sur les lichens et le programme, avec la possibilité de découvrir préalablement les différents taxa sur des échantillons. Pour des contraintes de temps, ce groupe n'a pu tester que le scénario 1.

[16] https://www.uclouvain.be/fr/scinfuse

Tableau 1 : Modalités des séances de test des protocoles à Louvain-la-Neuve (S1 = scénario 1 ; S2 = scénario 2).

Date et heure	Nombre de participants	Nombre de sous-groupes	Nombre de relevés complets (S1 | S2)	Profils des participants	Accompagnement
4 mai à 14 h	2	1	1 | 1	Étudiants bioingénieurs (Master)	Oui
8 mai à 14 h	6	4	3 | 3	- Doctorants bioingénieurs - Diplômée bioingénieur - Étudiante bioingénieur (Bachelier) - Étudiante ingénieur civil	Oui
11 mai à 14 h	9	3	1 | 0	Étudiants enseignement section 3 en sciences	Oui (+ formation de 1 h)
13 mai à 12 h 45	10	3	1 | 1	- Étudiants bioingénieur (Bachelier + Master) - Diplômés agronomie - Diplômée bioingénieur suivant l'agrégation	Oui
14 mai à 10 h	3	1	1 | 1	- Étudiantes bioingénieur (Bachelier + Master) - Diplômée bioingénieur	Oui

Les mêmes fiche taxa et fiches de relevés que celles utilisées pour les tests à distance ont été mobilisées dans le cadre de ces tests, de même qu'une version similaire du formulaire de retour a également été utilisée afin de recueillir l'avis des participants. Cependant, dans le cas des tests accompagnés, les retours ont été collectés principalement de manière orale, complétés par des notes prises lors de l'observation des participants au cours de l'activité.

Le site d'étude a été sélectionné pour son accessibilité ainsi que le peu d'arbres aux alentours, permettent aux participants réalisant les tests en autonomie d'identifier aisément le site et les trois arbres, limitant ainsi les risques de confusion (Figure 17).

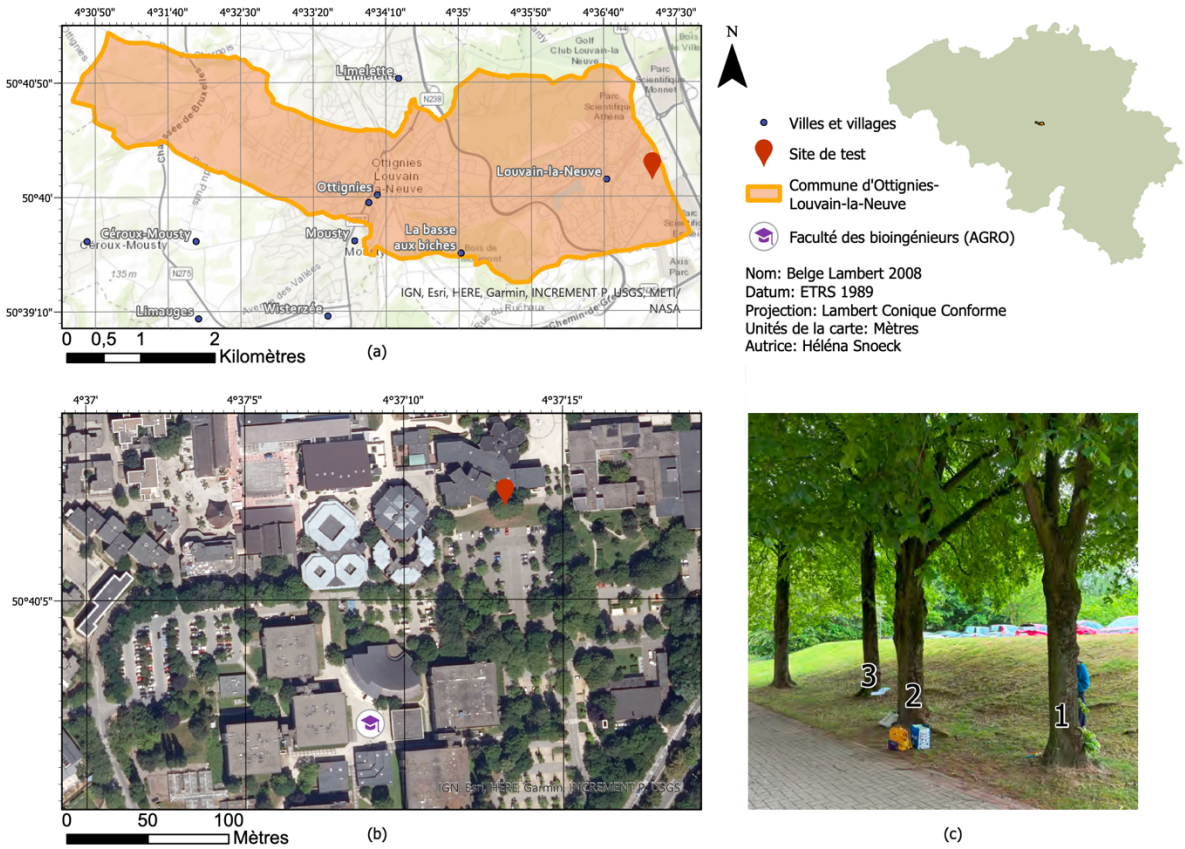


Figure 17 : Localisation du site de test à Louvain-la-Neuve : (a) localisation du site dans la commune d'Ottignies–Louvain-la-Neuve ; (b) localisation du site sur orthophotographie par rapport à la Faculté des bioingénieurs (AGRO) ; (c) identification des trois arbres retenus pour les tests et de leur numéro d'identification.

4.3.2. Analyse des résultats des tests

Tests à distance

L'analyse des formulaires de retour s'est principalement basée sur une approche qualitative en regroupant les commentaires par thématiques récurrentes afin d'identifier les éléments revenant fréquemment dans les retours. Cette catégorisation a permis de mettre davantage en évidence les remarques partagées par plusieurs participants et d'identifier les tendances générales liées aux différents scénarios testés. Lorsque certaines réponses apparaissaient ambiguës ou nécessitaient des précisions complémentaires, une reprise de contact avec les participants concernés a pu être envisagée afin de mieux comprendre leur retour et de limiter les risques de mauvaise interprétation des commentaires recueillis.

Dans un second temps, les fiches de relevés partagées par les participants ont également été exploitées. D'une part, elles ont servi à contextualiser certaines réponses et à mieux comprendre les difficultés ou remarques exprimées par les participants au sujet des différents scénarios testés. D'autre part, elles ont été utilisées afin d'évaluer si malgré les changements apportés au protocole celui-ci avait toujours un intérêt pédagogique suffisant, ou si ceux-ci conduisaient au contraire à une diminution trop importante des observations réalisées sur le terrain.

Tests locaux à Louvain-la-Neuve

Les données qualitatives issues des retours des participants ont été traitées selon une méthodologie similaire à celle appliquée aux tests à distance. Dans le cadre des tests accompagnés, les observations directes réalisées durant les activités de terrain ont pu être exploitées comme source d'informations complémentaires. Ces observations personnelles ont permis de relever certains comportements, hésitations, incompréhensions ou stratégies mises en place par les participants lors de l'utilisation des protocoles simplifiés.

L'ensemble des participants ayant réalisé leurs observations sur les trois mêmes arbres, il a également été possible d'évaluer la variance entre les relevés et de comparer l'ampleur de cette variabilité entre les deux scénarios étudiés. Un calcul de statistiques descriptives par taxon a été réalisé, incluant la moyenne, l'écart-type, la variance ainsi que le coefficient de variation (CV), utilisé comme mesure de dispersion relative. Afin de comparer les deux scénarios, les distributions de recouvrement ont ensuite été confrontées taxon par taxon. Des tests non-paramétriques de Mann-Whitney ont été appliqués pour évaluer les différences significatives entre scénarios, suivis d'une correction des p-valeurs selon la méthode de Holm afin de contrôler le risque d'erreur lié aux comparaisons multiples. De la même manière que ce qui a été réalisé dans le cadre de la dégradation des jeux de données, une comparaison des mêmes indices entre les différents scénarios a été réalisée avec évaluation des mêmes métriques (MAE, corrélation, biais).

Par ailleurs, la réalisation simultanée du protocole par Hugo Counoy, participant expérimenté, a permis d'obtenir un référentiel considéré comme plus représentatif de la réalité du terrain. Les relevés des participants ont ainsi pu être comparés à ces données de référence afin d'identifier d'éventuelles tendances à la surévaluation ou à la sous-évaluation de certains taxa. Les écarts de recouvrement ont été calculés pour chaque groupe ainsi que pour la moyenne des participants. À nouveau, une comparaison au niveau des indices a été réalisée afin d'observer l'impact des erreurs sur les résultats.

5. Retours des participants

Cette première section présente les principales informations et conclusions de l'enquête. Des informations complémentaires figurent en ANNEXE F, notamment des graphiques et tableaux illustrant, en détails, les réponses aux différentes questions de l'enquête.

5.1. Données recueillies auprès des participants

5.1.1. Caractéristiques des répondants et organisation des groupes

Connaissances et sensibilités au programme Lichens GO

Parmi les 88 répondants à l'enquête, 55 % représentent des personnes ayant déjà participé au moins une fois à une activité Lichens GO, qu'ils l'aient organisée ou non. Ces répondants sont globalement sensibles aux différents sujets en relation avec le programme (Figure 18). Parmi ces sujets, peuvent être cités dans l'ordre de sensibilité décroissant et dans l'ordre de connaissances décroissant des participants : la nature, les sciences participatives ainsi que la qualité de l'air et finalement les lichens. Bien que les lichens et les sciences participatives soient des sujets moins connus que les deux autres (Ahmadjian, 1995; Lewandowski et al., 2017), plus de 70 % (n = 48) des participants y sont tout de même sensibles. De plus, 50 % d'entre eux disent participer une fois ou plus par mois à des activités d'observation ou d'étude de la nature, dont 19 % au moins une fois par semaine (Figure 36 ; ANNEXE F).

Ces résultats peuvent être interprétés de deux manières. D'une part, ils suggèrent que Lichens GO, comme de nombreux autres programmes de sciences participatives, tend à mobiliser un public déjà sensibilisé et familiarisé à ces thématiques (A. M. Land-Zandstra et al., 2016; Roy et al., 2012). D'autre part, ils peuvent également indiquer un biais d'auto-sélection des répondants, de par leur inscription à la newsletter Lichens GO (Bethlehem, 2008). Cette inscription peut témoigner d'un intérêt particulier pour les sujets, ce qui aurait pu favoriser leur participation à l'enquête au détriment d'un public plus généraliste. La newsletter de Lichens GO est particulièrement visée, mais les autres modes d'envois pourraient également soulever la même remarque. Une des limites de l'enquête est alors qu'aucune question ne permet de savoir par quel biais les répondants ont accédé à l'enquête. Cela reste cependant un biais acceptable dans la mesure où l'objectif principal est d'obtenir des retours, peu importe le degré d'intérêt des répondants pour Lichens GO. Ce biais a également pu être atténué par l'objectif de l'enquête, attirant potentiellement plus de participants éprouvant un intérêt pour des simplifications.

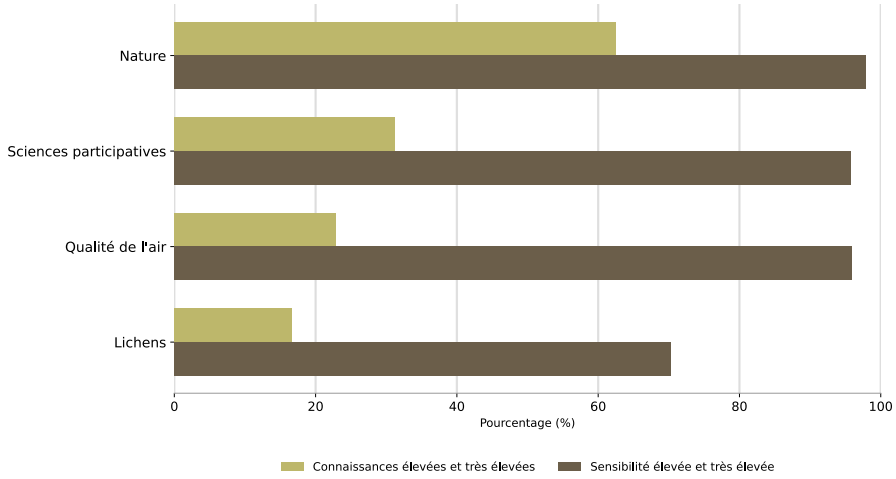


Figure 18 : Niveau de connaissance et de sensibilité à différents aspects du programme Lichens GO (nature, sciences participatives, qualité de l'air et lichens) en fonction du pourcentage de répondants parmi les participants (n = 48).

Diversité de profils des répondants

Les participants ont été répartis selon le secteur dans lequel ils pratiquaient majoritairement Lichens GO (**Figure 37** ; ANNEXE F) : cadre scolaire (54 % ; n = 48), cadre d'associations ou structure d'éducation à l'environnement (abrégé cadre associatif ; 21 %) et cadre personnel (25 %). Les catégories « cadre associatif » et « cadre personnel » ont régulièrement été regroupées dans la suite sous l'appellation « cadre non-scolaire ». Ce regroupement permet de distinguer clairement le milieu scolaire des autres milieux et de créer deux groupes de tailles relativement comparables.

Au sein du cadre scolaire, l'activité est principalement réalisée au lycée[17] (n = 19/26), puis au collège[18] (n = 7/26) (**Figure 40** (a) ; ANNEXE F). Les autres niveaux d'enseignement restent plus marginaux. Parmi les lycéens, au moins 55 % des répondants sont en Première[19] contre 20 % en Terminale[20] et 10 % en Seconde[21], les autres n'ayant pas précisé leur niveau (**Figure 40** (b) ; ANNEXE F). Enfin, l'activité est majoritairement intégrée dans l'enseignement général, avec une prédominance de la filière « général scientifique » (**Figure 40** (c) ; ANNEXE F).

L'importante représentativité du public scolaire parmi les répondants est bénéfique pour l'identification plus précise des problématiques que le milieu rencontre. Elle permet également de venir confirmer non seulement que le milieu scolaire représente une part importante des participants à Lichens GO, mais également que ce public exprime un besoin réel d'une version adaptée du protocole. Ce constat rejoint les observations de Perron (2025), selon lesquelles les protocoles de sciences participatives, bien qu'ils présentent un intérêt pédagogique pour le milieu scolaire, disposent encore rarement de ressources et de démarches pleinement adaptées au niveau des élèves.

[17] Équivalent belge de la quatrième à la sixième secondaire.
[18] Équivalent belge de la sixième primaire à la troisième secondaire.
[19] Équivalent belge de la cinquième secondaire.
[20] Équivalent belge de la sixième secondaire.
[21] Équivalent belge de la quatrième secondaire.

Plusieurs études sur des projets de sciences participatives montrent que ceux-ci touchent des participants d'une dizaine d'années à parfois jusque 90 ans témoignant d'un public très diversifié (A. M. Land-Zandstra et al., 2016; Masters et al., 2016). Les observations relatives à l'âge moyen des groupes des répondants à l'enquête rejoignent cette idée avec une tranche d'âge des participants s'étendant de 10 à 70 ans (**Figure 39** (a) ; ANNEXE F). Ce constat de grandes variations des profils renforce également la nécessité de propositions de plusieurs options en ce qui concerne le protocole.

Parmi les répondants, le cadre scolaire regroupe un public significativement plus jeune que le cadre non-scolaire ($p < 0,001$), malgré l'existence de formations pour adultes dans le cadre scolaire et d'activités destinées aux enfants dans le cadre associatif. Dans le cadre scolaire, 62 % ($n = 26$) des participants sont âgés de 15 à 19 ans, tandis que 27 % appartiennent à la tranche d'âge des 10 à 14 ans (**Figure 39** (b) ; ANNEXE F). A l'inverse, dans le cadre non-scolaire, seul 17 % ($n = 18$) des participants ont moins de 20 ans, alors que 63 % sont âgés de plus de 45 ans. En dehors du public scolaire, Lichens GO semble toucher majoritairement des adultes. Autrement dit, les simplifications au profit d'un public plus jeune bénéficieront majoritairement au cadre scolaire tandis que pour le cadre non-scolaire, les simplifications doivent majoritairement être destinées aux néophytes.

Différence de modalités de participation

Dans l'organisation d'une activité, les modalités varient fortement d'un groupe à l'autre pouvant entrainer des variations plus ou moins importantes dans le mode de fonctionnement et l'expérience vécue de l'activité. Le nombre de participants varie d'une seule personne à une trentaine de participants pour les plus gros groupes (**Figure 42** (a) ; ANNEXE F). Une différence significative de la taille des groupes est observée entre les cadres scolaire et non-scolaire ($p < 0,05$). Les activités non-scolaires présentent généralement des groupes plus restreints, avec 57 % des groupes de 1 à 5 participants, une configuration qui n'est pas retrouvée dans le cadre scolaire (**Figure 42** (b) ; ANNEXE F).

Au sein des activités Lichens GO, les participants sont généralement répartis en sous-groupes par arbre. Les effectifs observés varient de 1 à 11 participants par arbre, avec une moyenne de 4 participants (**Figure 43** (a) ; ANNEXE F). Une tendance non significative de plus gros sous-groupes dans le cadre scolaire est également observée ($p > 0,05$; **Figure 43** (b) ; ANNEXE F). Ces différences organisationnelles peuvent impacter les résultats et l'expérience des participants comme le souligne l'étude de Aivelo (2024) réalisée auprès d'un public scolaire.

5.1.2. Aspect temporel et réalisation des phases du protocole

Temps consacré aux différentes phases du protocole indépendamment

La distribution du temps consacré aux différentes phases du protocole diffère significativement selon les étapes ($p < 0,001$) (**Figure 19**). La phase de terrain est significativement plus chronophage que les phases de saisie et d'analyse des données ($p < 0,001$). Le temps passé sur la phase de terrain est par ailleurs modérément corrélé avec le temps passé sur la phase de saisie. Une forte corrélation est observée entre la saisie et l'analyse, suggérant une forte

interdépendance entre ces deux étapes. La phase de préparation est quant à elle indépendante des autres phases.

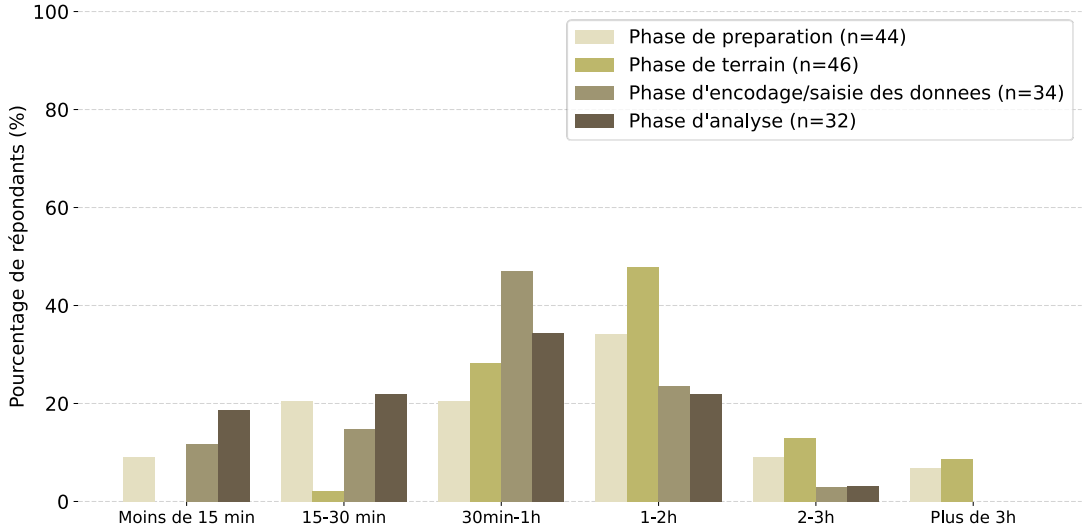


Figure 19 : Distribution du temps consacré à chaque phase du protocole, exprimée en pourcentage des répondants ayant effectivement réalisé la phase correspondante (n, indiqué dans la légende).

L'analyse par cadre (scolaire *vs* non-scolaire) (**Figure 44** ; ANNEXE F) ne montre pas de différences significatives pour les phases de préparation, de terrain et de saisie en termes de durée ($p > 0,05$). Cependant, la phase d'analyse est quant à elle significativement plus longue en contexte scolaire ($p < 0,01$). Les répondants du cadre scolaire sont également significativement plus susceptibles de réaliser la phase de saisie ($p < 0,01$) et la phase d'analyse ($p < 0,01$) par rapport aux autres répondants. Ces résultats considérés ensemble suggèrent que les deux groupes s'investissent de manière similaire en ce qui concerne les premières phases du protocole, mais que les phases en aval (saisie et analyse des données) bénéficient d'un engagement plus marqué de la part du cadre scolaire, tant en termes de réalisation que d'investissement temporel. Comme le soulignent plusieurs études, une des motivations principales à la réalisation d'une activité de sciences participatives en milieu scolaire est d'aborder et d'illustrer des notions pluridisciplinaires (Lüsse et al., 2022; Perron, 2025). Dans ce contexte, les données récoltées peuvent être exploitées dans divers cours : sciences, mathématiques, *etc.*, menant à un intérêt plus élevé pour l'analyse qu'un public plus généraliste.

Durée globale et organisation du protocole

L'estimation du temps pour la réalisation du protocole complet, réalisé par la somme des temps moyens des catégories de chaque phase pour chaque répondant, montre qu'environ 60 % des participants (n = 47) consacrent plus de trois heures à l'ensemble des étapes, dont 40 % plus de quatre heures (**Figure 45** ; ANNEXE F). Le cadre scolaire présente une tendance à des durées plus élevées, bien que non-significative ($p > 0,05$). Par ailleurs, plus de 67 % des participants réalisent le protocole sur plusieurs jours (**Figure 20**), indiquant une organisation temporelle fragmentée. Cette tendance est associée à une probabilité plus élevée de réaliser certaines phases du protocole, notamment la phase de saisie des données, par rapport à des participants

réalisant le protocole en un seul jour. La répartition du protocole sur plusieurs jours ne concerne généralement pas la phase de terrain, réalisée sur un seul jour par 78 % des participants (**Figure 46** ; ANNEXE F).

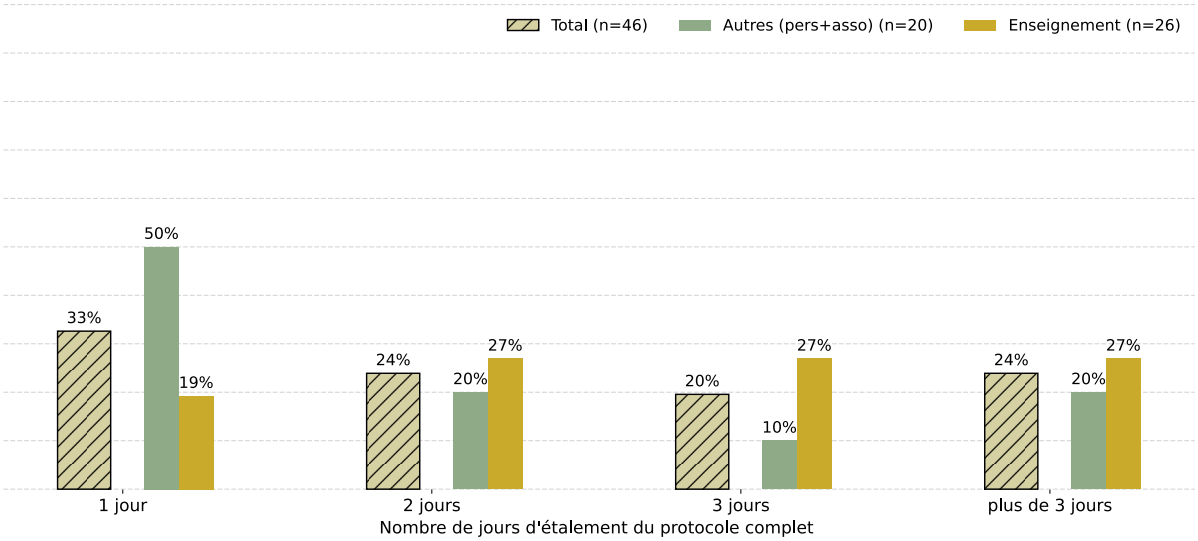


Figure 20 : Répartition du protocole complet selon le nombre de jours sur lesquels il a été réalisé, en fonction du cadre de participation, exprimée en pourcentage pour chaque groupe et comparée à la distribution globale.

Sur le plan du cadre de participation, aucune différence significative n'est observée concernant l'étalement du protocole complet sur plusieurs jours ($p > 0,05$), bien qu'une tendance soit relevée en faveur du cadre scolaire. Cependant, les répondants du cadre scolaire étalent significativement ($p < 0,05$) davantage la phase de terrain sur plusieurs jours que ceux du cadre non-scolaire. Cette différence peut notamment s'expliquer par les contraintes organisationnelles en milieu scolaire, où les plages horaires sont souvent limitées à environ cinquante minutes (Fédération Wallonie-Bruxelles, 2011; Kamette, 2011). En effet, seuls 31 % des répondants du cadre scolaire déclarent réaliser la phase de terrain en moins d'une heure (**Figure 44** ; ANNEXE F).

Réalisation effective des phases du protocole

Parmi les répondants participants, 38 % ne réalisent pas les quatre phases du protocole (**Figure 21**). Les phases de saisie et d'analyse des données sont celles présentant les plus fortes proportions de non-réalisation, avec respectivement 28 % et 30 % des répondants concernés, contre seulement 6,5 % et 2,1 % pour les phases de préparation et de terrain.

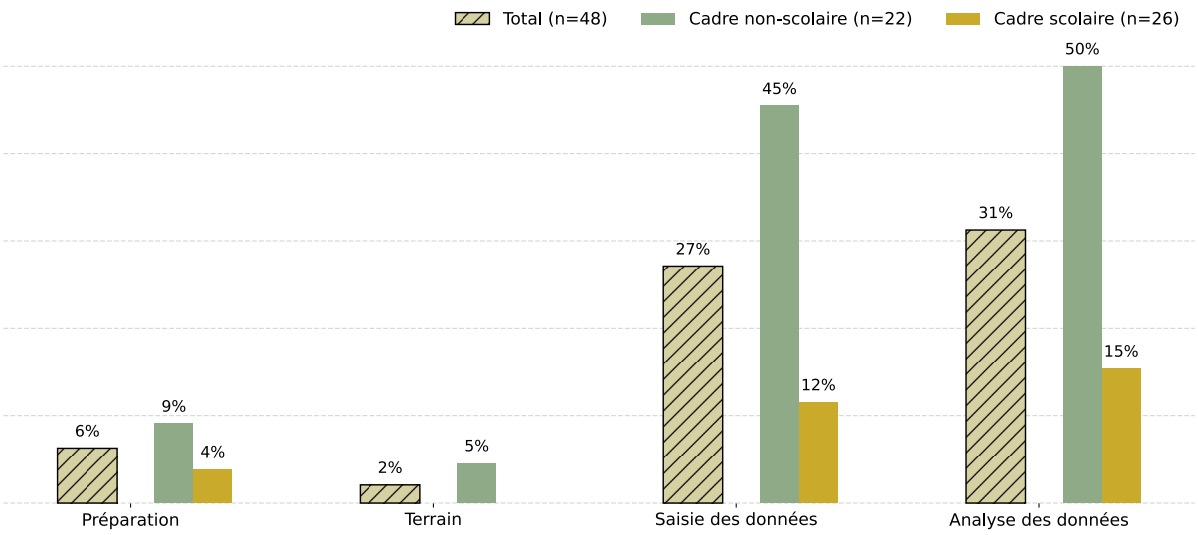


Figure 21 : Proportion de participants n'ayant pas réalisé les différentes phases du protocole, pour l'ensemble des participants ainsi que selon le cadre de participation (scolaire et non scolaire).

Ces différences peuvent notamment s'expliquer par le rôle de chaque phase dans le protocole. La phase de terrain constitue l'étape centrale de la participation à Lichens GO et implique généralement une préparation minimale, expliquant les faibles taux de non-réalisation de ces deux étapes. À l'inverse, les phases de saisie et d'analyse des données apparaissent plus comme des étapes complémentaires, ce qui constitue davantage une démarche personnelle sans impact direct sur le fonctionnement du programme. La non-réalisation de la phase d'encodage apparaît toutefois plus problématique, celle-ci étant indispensable à l'intégration des observations dans la base de données du programme. Cette non-réalisation peut s'expliquer en partie par le fonctionnement en groupes : les répondants à l'enquête n'étaient pas nécessairement responsables de la saisie des données. Néanmoins, certains participants ont explicitement mentionné, dans leurs réponses ouvertes ou lors d'échanges complémentaires, ne pas encoder leurs données en raison de doutes concernant la qualité des observations réalisées. En contexte scolaire, plusieurs enseignants ont également souligné des différences importantes de résultats entre groupes d'élèves pour un même site, conduisant à ne pas transmettre certaines données obtenues jugées peu fiables.

Ce manque de confiance est un phénomène déjà décrit dans d'autres études de sciences participatives. Le projet de sciences participatives OPAL, consacré à l'évaluation de la qualité de l'air, semble avoir rencontré la même problématique de non-saisie des données que Lichens GO, principalement en raison d'un manque de confiance dans la qualité des données (Tweddle et al., 2012). Dans une enquête de Lewandowski et al. (2017) portant sur la confiance dans la réalisation de diverses tâches en sciences participatives, 50 % des répondants étaient confiants dans leurs capacités à collecter des données, mais seulement 33 % l'étaient dans l'identification des plantes. Le manque de confiance des participants dans leurs relevés est donc une constatation généralisée à ce type de programme de sciences participatives et n'est pas propre à Lichens GO.

5.1.3. Difficultés rencontrées

D'un point de vue général, la phase de terrain apparaît comme l'étape du protocole la plus fréquemment associée à des difficultés par les répondants la réalisant : 59 % des participants concernés déclarent rencontrer des difficultés, dont 9 % se disent totalement en accord avec cette affirmation (**Figure 47** ; ANNEXE F). Elle est suivie par la phase d'analyse des données, pour laquelle 44 % des répondants concernés rapportent des difficultés, bien qu'aucun ne se déclare totalement en accord. Les phases de saisie des données et de préparation apparaissent moins problématiques, mais restent tout de même mentionnées respectivement par 28 % et 16 % des répondants. Aucune différence significative n'est observée entre les cadre scolaire et non-scolaire concernant les difficultés globales associées aux différentes phases.

Les différents aspects pouvant expliquer ces difficultés sont détaillés en ANNEXE F **Figure 48**, tandis que les principaux ressentis négatifs sont présentés à la **Figure 22**. Concernant la phase de préparation, la principale difficulté réside dans la recherche d'un site d'observation respectant les critères du protocole (*cf.* 2.3.5) : 47 % des répondants considèrent cet aspect comme problématique. Les échanges en visioconférence et les réponses ouvertes mettent également en évidence des contraintes de sécurité liées à la proximité des axes routiers, particulièrement en contexte scolaire. Pour la phase de terrain, les répondants soulignent plusieurs difficultés liées à l'organisation des observations et à l'identification des lichens. La taille des groupes est notamment mentionnée comme un facteur influençant la qualité des observations : des groupes trop importants compliqueraient les relevés pour 51 % des répondants, tandis que la réalisation seul pose également des difficultés, notamment dans l'utilisation du matériel (30 %). Ces résultats confirment que les variations d'organisations de groupes observées dans les profils des répondants induisent effectivement des variations dans les difficultés rencontrées.

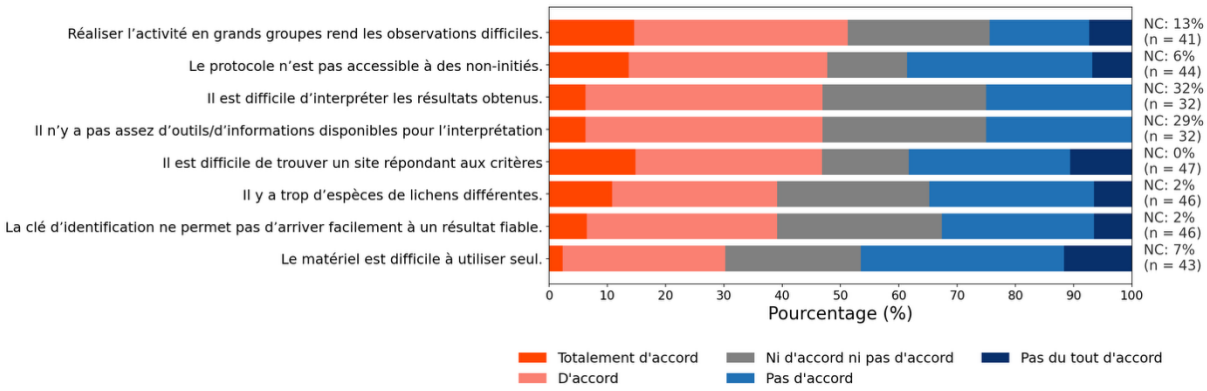


Figure 22 : Principaux ressentis négatifs des participants au programme Lichens GO (n = 47) à l'égard des différentes phases du protocole, exprimés en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « non concerné·e » (NC). Le nombre de répondants pris en compte pour chaque item est indiqué (n).

Les difficultés concernent également l'identification des taxa. Près de la moitié des répondants (48 %) estiment que le protocole n'est pas facilement accessible à des non-initiés, tandis que 39 % considèrent le nombre de taxa à identifier comme trop élevé ou jugent difficile d'obtenir des résultats fiables à partir de la clef d'identification. Ces difficultés semblent principalement

liées à l'observation des structures morphologiques permettant l'identification des taxa (*cf.* 2.1.1).

La perception du confort d'observation de ces structures est présentée à la **Figure 23**. Pour la majorité des structures proposées, au moins un participant sur trois déclare ne pas se sentir à l'aise dans leur observation. Les plus grandes difficultés concernent les isidies et les soralies, structures de reproduction, pour lesquelles plus d'un participant sur deux déclare un manque de confort. À l'inverse, la distinction entre les types de thalles apparaît peu problématique (4 %), tandis que l'observation des apothécies et des cils semble poser des difficultés plus modérées (22 % et 24 %). De manière générale, malgré les difficultés rapportées, les participants semblaient identifier les structures concernées, le nombre de réponses « Je ne vois pas ce dont il s'agit » n'ayant jamais dépassé deux participants (4 %).

Enfin, bien qu'aucune différence statistiquement significative ne soit observée entre les cadres scolaire et non-scolaire après correction pour comparaisons multiples (**Figure 50** ; ANNEXE F), les participants du cadre scolaire rapportent généralement davantage de difficultés pour la majorité des aspects investigués.

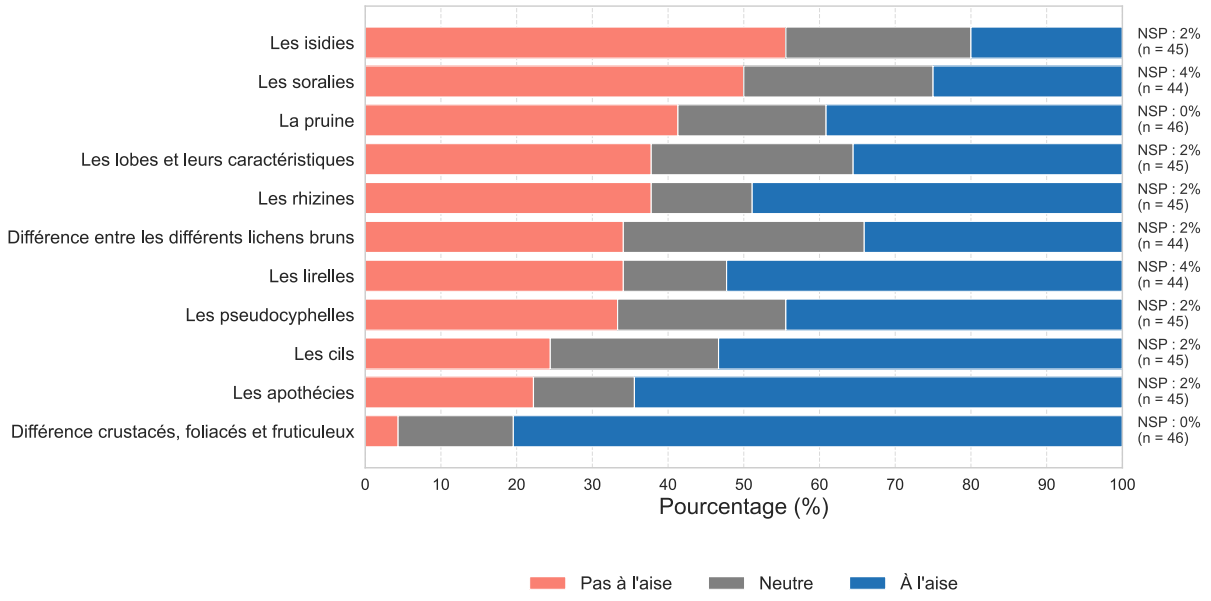


Figure 23 : Ressenti de confort des participants au programme Lichens GO (n = 47) lors de l'observation de différentes structures lichéniques, exprimé en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « ne voit pas ce dont il s'agit » (NSP), avec indication du nombre de répondants hors NSP pour chaque item (n).

L'enquête a également permis aux participants de partager des propositions de changements qu'ils aimeraient voir mis en place pour simplifier leurs relevés (**Tableau 6** ; ANNEXE H). Ces demandes sont principalement dirigées vers les supports visuels et le livret, avec l'ajout d'images de référence complémentaires pour chaque taxon notamment aux différents stades de vie ainsi que de plus de descriptions. Certains participants désirent également davantage de consignes, des fiches de confusions pour différencier les taxa proches ainsi que des exemples résolus afin de se familiariser avec la démarche d'identification.

5.2. Données recueillies auprès des non-participants

La non-participation au programme Lichens GO concerne 46 % des répondants à l'enquête (n = 40). Parmi les freins évoqués (**Figure 28**), le manque de temps apparaît comme la contrainte principale, cité par 43 % des répondants. Les réponses ouvertes montrent que cette catégorie regroupe à la fois un manque de disponibilité, un manque d'occasions de participer ou encore une découverte trop récente du programme. Des difficultés liées au protocole sont également mentionnées par 20 % des répondants, notamment concernant l'identification des taxa ou la compréhension globale du fonctionnement de l'activité. Certaines de ces personnes avaient déjà tenté l'expérience ou s'y sont déjà fortement intéressées sans toutefois considérer avoir réellement participé au programme, faute d'observations abouties ou validées. Ces personnes peuvent donc être tout de même considérées comme non-participantes à l'inverse des répondants indiquant avoir fait des observations, mais ne pas les avoir saisies sur la plateforme (20 %). Cette dernière situation met en évidence une limite de l'enquête, ce type de profils se retrouvant à la fois en « participants » et en « non-participants », ce qui démontre une ambiguïté dans la définition de la participation au programme au sein de l'enquête.

L'absence d'accompagnement constitue également un frein pour 15 % des répondants. Ce résultat peut refléter une visibilité limitée du programme, réduisant les possibilités de participation collective via des associations, des réseaux sociaux ou l'entourage. L'aspect social est généralement très important en sciences participatives et peut jouer sur l'envie de participer. Des motivations sociales, telles que le désir de rencontrer de nouvelles personnes ou d'échanger de l'expérience peuvent être très présentes (Scivil, 2019). Ces interactions créent également un sentiment d'appartenance, favorisant un engagement à long terme (A. M. Land-Zandstra et al., 2016; Marques et al., 2024). De nombreux projets de sciences participatives offrent par ailleurs des espaces d'échange tels que des groupes sur les réseaux sociaux ou bien des forums. Un groupe Facebook rassemblant des participants de Lichens GO existe déjà et un forum pourrait voir le jour sous peu.

Le caractère perçu comme spécialisé du programme pourrait également limiter son attractivité auprès de certains publics. D'autres raisons sont également avancées, comme le fait de se situer hors de l'aire géographique principalement couverte par le programme, actuellement centré sur la Belgique et la France métropolitaine. Cette limitation s'explique entre autres par les différences d'écologie lichénique selon les régions (Van Haluwyn, 2010), qui impliqueraient une adaptation du protocole et des taxa étudiés. Certains répondants indiquent également préférer d'autres plateformes ou protocoles d'observations, tels qu'Observation.be[22] ou Ecorc'Air[23], parmi les programmes existants autour de l'identification de lichens notamment ou bien d'étude de la qualité de l'air. Finalement, une série d'autres freins peuvent également jouer comme un simple désintérêt pour le programme.

[22] https://observations.be
[23] https://www.plataancheck.be/fr/

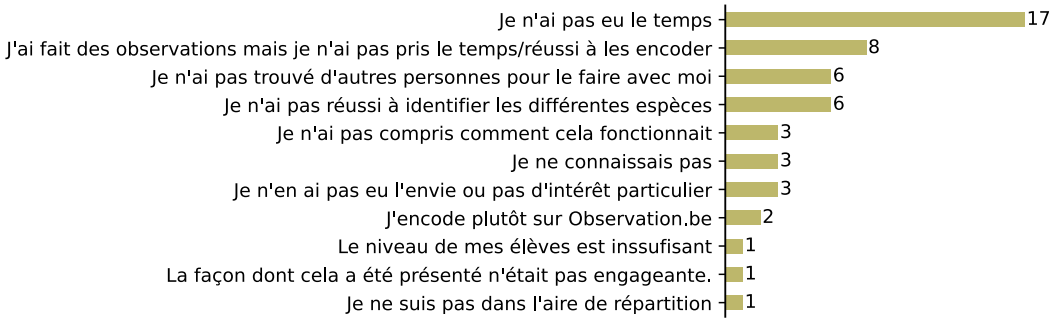


Figure 24 : Raisons de non-participation au programme Lichens GO, exprimées en nombre de citations par les répondants de la catégorie « non-participants » (n = 40).

Malgré leur non-participation actuelle, 38 % de ces répondants manifestent ouvertement, dans les questions ouvertes, un intérêt à une participation future, notamment par la création d'un protocole simplifié. Plus encore, 78 % ont souhaité être recontactés dans le cadre du test d'un tel protocole. Ces résultats suggèrent qu'une simplification du protocole pourrait non seulement renforcer l'engagement des participants actuels, mais également attirer de nouveaux publics.

5.3. Prise en considération des retours dans les changements : création de scénarios

Sur base des réponses à l'enquête, plusieurs points de difficultés ont pu être identifiés. Deux d'entre eux ont été spécifiquement retenus pour faire l'objet d'une analyse plus approfondie de changement. Les critères qui ont dicté le choix ont notamment été la fréquence des réponses, l'impact potentiel pour les utilisateurs ainsi que pour la qualité des données, la cohérence avec le protocole complet et la faisabilité dans le cadre de ce mémoire. L'adaptation du protocole a été divisée en deux sous-parties traduisant les deux types de changements considérés.

Réduction du nombre de taxa

Un premier type de changement suggéré dans le cadre de la simplification de Lichens GO est une réduction du nombre de taxa considérés dans le protocole. Cette modification permet de répondre directement aux demandes de certains participants ayant formulé explicitement dans les questions ouvertes ce souhait de procéder à cette réduction (Tableau 5 ANNEXE F), mais elle est surtout relevée comme une proposition pouvant réduire la difficulté d'observation et d'identification des taxa ainsi que le temps du relevé. Certains taxa, sont plus rares, plus sujets aux confusions entre eux et leur identification peut s'avérer plus technique. Une étude de McMullin & Allen (2021) a notamment montré 41 % d'erreurs sur la plateforme iNaturalist, dans l'identification des lichens se distinguant par des caractères macromorphologiques comme ceux représentés dans Lichens GO. Le but est, de ce fait, de limiter les taxa à observer afin de permettre aux participants de se concentrer sur des taxa communs et relativement facilement identifiables. Cela leur permettrait d'avoir une première approche des lichens, tout

en conservant au maximum les différents aspects techniques de Lichens GO et en réduisant potentiellement les erreurs d'identification.

D'autres approches d'évaluation de la qualité de l'air grâce aux lichens au travers des sciences participatives existent dans le monde et certaines d'entre elles utilisent déjà un nombre de taxa plus réduit que celui du protocole de Lichens GO actuel. Des protocoles très simples destinés à être accessibles au public ont déjà été testés, notamment en Italie avec un protocole fonctionnant uniquement sur base d'observations des morphotypes de thalles (Martellos et al., 2024). Cette étude s'est montrée, selon les auteurs, un succès notamment auprès du public scolaire. Cependant, une approche similaire a déjà été utilisée en France se basant sur la méthode FOMOFA (Fort, Moyen, Faible) développée par Van Haluwyn et Lerond (1993) en considérant que la présence unique de lichens crustacés indiquait une probable pollution atmosphérique importante, qu'une présence en plus de lichens foliacés pouvait indiquer une modération de cette pollution et que finalement, une présence de lichens fruticuleux est synonyme d'une pollution atmosphérique probablement faible. Cette approche s'est avérée peu intéressante au niveau scientifique ne permettant pas de relever les hétérogénéités de la pollution de sorte que l'identification d'espèces a alors été introduite pour finir par donner le protocole actuel (Mifune, 2020). D'autres protocoles se situant davantage entre les deux existent cependant. C'est notamment le cas de celui d'OPAL Air Survey[24] aux Royaume-Uni, qui a retenu dans son protocole uniquement neuf espèces présentant des tolérances contrastées à l'azote sur trois niveaux (Tregidgo et al., 2013). C'est davantage vers ce type de protocole que s'est tourné la simplification en sélectionnant une série de taxa parmi ceux du protocole complet.

La sélection de taxa a été réalisée en faisant la balance entre intérêts pédagogiques et intérêts scientifiques. D'un point de vue pédagogique, il est intéressant de conserver des taxa représentant différents types de structures lichéniques, car cela permet leur introduction théorique (Perron, 2025), mais cela doit être contrebalancé par les difficultés d'observation relevées par l'enquête. D'un point de vue scientifique, l'évaluation de la qualité de l'air nécessite de conserver des taxa présentant des sensibilités et résistances différentes aux polluants afin de conserver des gradients écologiques et la possibilité d'une évaluation de la qualité de l'air (Van Haluwyn, 2010).

En tenant compte de ces différents points de vue, les 35 taxa considérés dans le protocole Lichens GO complet ont été réduits à dix (**Figure 25** ; caractéristiques complètes des 35 taxa en ANNEXE G **Tableau 7** et **Tableau 8**). À noter également que dans le cadre de la simplification du nombre de taxa, les trois catégories « Autre » considérées dans le protocole complet à savoir « Autre lichen crustacé », « Autre lichen foliacé » et « Autre lichen fruticuleux », n'ont pas été reprises. Cela implique qu'aucun autre taxon que les dix présentés ci-dessous ne peut être relevé.

[24] https://www.imperial.ac.uk/opal/surveys/airsurvey/



Figure 25 : Les dix taxa retenus dans la liste restreinte, considérée dans le processus de simplification, réparties par morphotype de thalle (bleu = crustacé, orange = foliacé, mauve = fruticuleux) (©Hugo Counoy).

Méthode alternative de quantification des recouvrements

En parallèle à une réduction du nombre de taxa, un autre changement considéré est un changement dans la méthode de quantification des lichens. Le protocole complet utilise la grille préconisée par la norme EN 16413 (*cf.* 2.2.3) pour évaluer le recouvrement d'un taxon sur un site. Cette méthode nécessite cependant d'observer la présence de lichens dans un total de 60 carrés, afin d'obtenir une estimation du recouvrement de chacun sur le site, à partir de la proportion de carrés dans lesquels il est présent. Une alternative est de remplacer cette méthode de quantification par une échelle de recouvrement par arbre et par taxon permettant d'émettre uniquement une seule observation par taxon, par arbre tout en considérant la surface couverte.

Les relevés de végétation sont couramment réalisés à l'aide d'échelles de recouvrement. Une des plus connues est l'échelle définie par Braun-Blanquet (1928), définissant sept catégories de recouvrement, dont cinq basées sur un pourcentage précis. Cette approche est notamment reconnue pour sa simplicité et sa rapidité sur le terrain ainsi que pour sa transformation des estimations visuelles en une échelle quasi-métrique (Guarino et al., 2017). L'idée derrière cette proposition de changement est donc d'observer si une autre méthode de quantification pourrait être pertinente dans un contexte de gain de temps et de simplification des observations. Se passer de la grille permettrait également de répondre à certaines difficultés énoncées dans l'enquête sur l'obtention du matériel, la construction de la grille ou bien son utilisation. Cette dernière reste un défi, notamment pour un public jeune, niveau collège, une des cibles principales de la simplification du protocole. Il convient toutefois de noter que les méthodes reposant sur des échelles de recouvrement de type Braun-Blanquet sont associées à une part de subjectivité non-négligeable, et une variabilité plus ou moins importante entre observateurs (Barkman et al., 1964; Guarino et al., 2017). Du côté des participants, elles pourraient éventuellement amener plus de doutes dans leurs observations alors même qu'il était observé à travers l'enquête que le manque de confiance en leurs résultats poussaient certains participants à ne pas saisir leurs données ou à ne pas renouveler leur participation. La

suite des analyses se penchera de ce fait, notamment, sur les ressentis des participants par rapport à cette question.

L'échelle de recouvrement proposée comprend un nombre réduit de classes par rapport à une échelle du type Braun-Blanquet traditionnelle, et ce, afin de limiter l'hésitation des participants peu familiarisés avec ce type de protocole. Cette échelle a été divisée en quatre classes (hors classe absence) : <1 %, 1 – <10 %, 10 – <50 %, ≥50 %. Celles-ci ont été définies de manière à être un compromis entre les distributions observées du recouvrement des taxa dans les jeux de données d'observations Lichens GO et la nécessité de proposer des repères visuels, facilement interprétables par les participants (Tweddle et al., 2012).

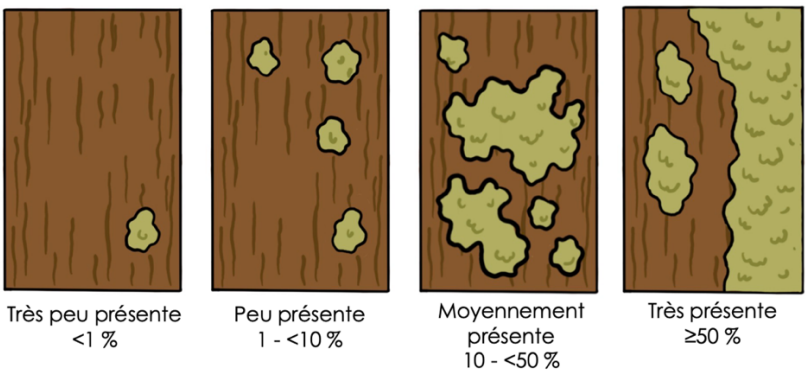


Figure 26 : Classes de l'échelle de recouvrement des taxa par arbre (<1 %, 1 – <10 %, 10 – <50 %, ≥50 %)

Deux scénarios ont été construits sur base des modifications considérées de manière à isoler leurs effets propres. Un premier scénario ne considère que la réduction du nombre de taxa tandis qu'un deuxième scénario considère en plus de la réduction un changement dans la méthode de quantification des lichens (Figure 27).

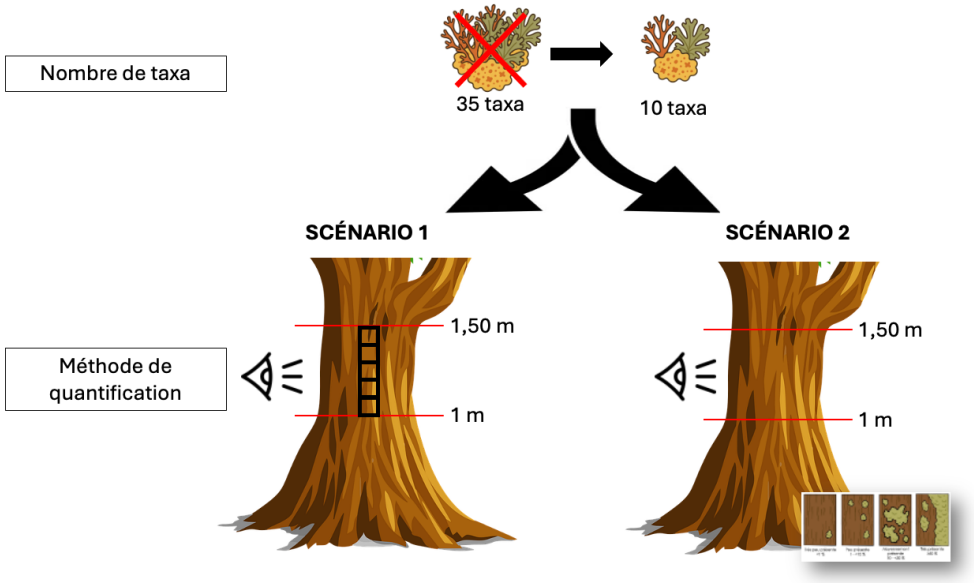


Figure 27 : Modalités des deux scénarios de protocole concernant le nombre de taxa considérés et la méthode d'évaluation de l'abondance, les autres éléments du protocole étant identiques.

6. Impacts des propositions de changements

6.1. Dégradation des jeux de données

6.1.1. Représentativité de la sélection de taxa pour le protocole simplifié

L'ordination NMDS de l'ensemble des taxa lichéniques considérés dans le protocole complet par rapport aux différents sites de relevés met en évidence une structuration écologique légèrement différente entre les deux jeux de données. Leurs analyses respectives s'avèrent complémentaires, le jeu de données de Wallonie étant représentatif d'une échelle spatiale plus large que celui de Clermont-Ferrand, lequel est quant à lui plus représentatif du relevé type Lichens GO. L'organisation taxa dans l'espace peut être discutée sur base des concepts de lichénosociologie et d'écologie des communautés, celles-ci pouvant traduire les conditions d'un lieu en fonction de leurs amplitudes écologiques (Van Haluwyn, 2010).

Dans le jeu de données de Wallonie, les taxa se trouvent relativement dispersés, indiquant l'existence de gradients écologiques marqués (Figure 28). Cela peut notamment être attribué à différentes préférences et tolérances en termes de pollution atmosphérique, d'acidité du substrat, d'humidité et d'ensoleillement (Nimis et al., 2002; Van Haluwyn, 2010; van Herk, 2001). Certains taxa se retrouvent aux extrémités de l'ordination ce qui suggère des affinités écologiques plus spécialisées, tandis que plusieurs autres sont situés en position centrale, correspondant davantage à des taxa généralistes et tolérants. Le cluster bleu, relativement central, s'apparente à l'alliance du *Xanthorion parietinae.* Cette communauté regroupe des taxa héliophiles et eutrophes tels que *Xanthoria parietina*, *Physcia adscendens/tenella* et *Physconia grisea* (Barkman, 1958; Ochsner, 1927), caractérisés par une nitrophilie marquée et une tolérance modérée aux polluants atmosphériques (Van Haluwyn, 2010). La majorité des taxa sélectionnés se situent au sein de celui-ci, tandis que quatre autres s'associent à des clusters reflétant une tolérance plus modérée à la pollution.

A l'inverse du jeu de Wallonie, dans le jeu de données basé sur des observations à l'échelle de la métropole de Clermont-Ferrand, les taxa sont davantage regroupés dans un cluster central (Figure 51 ; ANNEXE H). Cette structuration plus homogène peut indiquer une réduction des gradients écologiques, notamment en raison de l'homogénéisation des conditions environnementales en milieu urbain (Munzi et al., 2014). La majorité des taxa conservés dans le cadre du protocole simplifié sont principalement associés à ce regroupement central et correspondent majoritairement à des taxa nitrophiles et tolérants, fréquemment rencontrées en milieu urbain (Nimis & Stefano, 2002). Cette différence de structuration semble davantage refléter des différences de variabilités environnementales. Bien que les taxa sélectionnés représentent principalement des conditions écologiques généralistes et intermédiaires, ils conservent tout de même une partie du signal écologique présent dans les communautés lichéniques. Leur sélection se justifie dans le contexte d'un protocole simplifié, visant à réduire la difficulté d'identification sans se limiter à des taxa trop rares ou trop spécialisés.

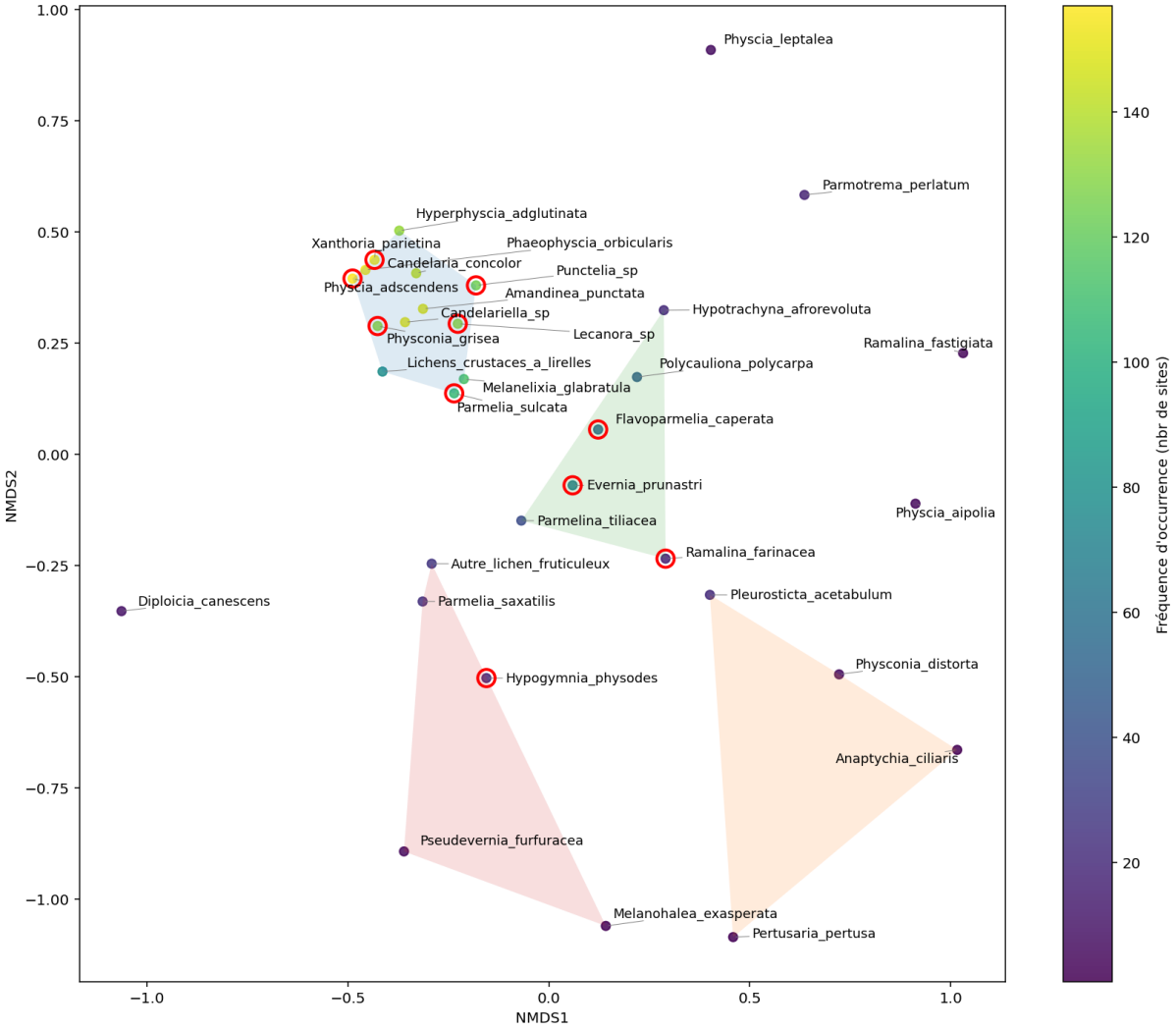


Figure 28 : Représentation NMDS des taxa lichéniques du jeu de données de Wallonie, basée sur la distance de Bray-Curtis. Les polygones délimitent les groupes identifiés par un clustering *k*-means (*k* = 7). Les taxa retenus dans le protocole simplifié sont surlignés en rouge. La couleur des points indique la fréquence d'occurrence des taxa (nombre de sites), reflétant leur abondance relative dans le jeu de données.

L'analyse des co-occurrences entre taxa (**Figure 52** ; ANNEXE H) confirme ces résultats. En Wallonie, les nombreuses corrélations significatives, positives comme négatives, révèlent des assemblages de taxa associés à des conditions environnementales contrastées. À Clermont-Ferrand, les corrélations sont plus limitées et traduisent des associations ponctuelles, suggérant un environnement plus homogène (Blanchet et al., 2020; Gotelli & McCabe, 2002).

6.1.2. Indices d'évaluation de la qualité de l'air

La plateforme Lichens GO calcule et présente pour chaque relevé encodé des indices : de diversité, de pollution et écologiques. Chaque participant a ainsi à la possibilité d'analyser les résultats obtenus avec son relevé. Cette analyse est très régulièrement faite en milieu scolaire comme l'ont montré les réponses à l'enquête.

Indices de biodiversité

Des indices de biodiversité, c'est à dire des indices relatifs au nombre de taxa observés, sont régulièrement pris en compte dans l'évaluation lichénique de la qualité de l'air. Cela s'explique notamment du fait de l'observation d'une diminution dans la quantité et de la diversité des lichens autour des zones urbaines et industrielles, apparaissant donc comme un possible indice de pollution (Giordani et al., 2002; Gombert et al., 2004). Dans ce cadre, deux indices sont étudiés dans le programme Lichens GO : le nombre de taxa sur un site ainsi que la LDV qui en est dérivée. Cependant, la réduction du nombre de taxa à observer dans le protocole simplifié implique généralement une réduction des taxa observés sur un site.

La dégradation des jeux de données montre que la réduction du nombre de taxa à dix s'accompagne d'une perte médiane de 8 taxa observés par site pour le jeu de Wallonie et de 6 pour le jeu de Clermont-Ferrand, tandis que certains sites présentent des pertes plus marquées, pouvant atteindre 15 taxa (**Figure 53** ; ANNEXE H). Après cette réduction, le nombre de taxa observés par site sur les deux jeux de données est en moyenne de 6,0 pour le jeu de Wallonie et de 5,1 pour le jeu de Clermont-Ferrand (**Figure 29**). Très peu de sites présentent un nombre de taxa observés inférieur ou égal à deux, tandis que la majorité des sites permet d'observer plus de cinq taxa.

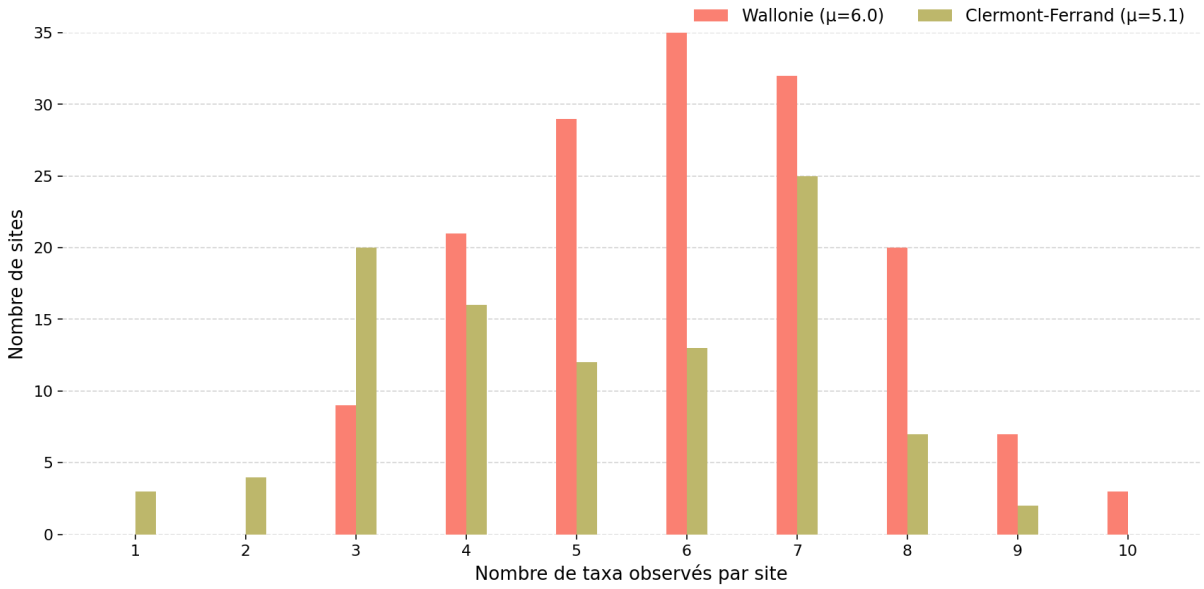


Figure 29 : Distribution du nombre de taxa observés par site après réduction du nombre de taxa et moyennes (μ), pour le jeu de données de Wallonie (n = 159) et le jeu de données de Clermont-Ferrand (n = 102)

En parallèle, la dégradation montre également une sous-estimation systématique des valeurs de la LDV dans le jeu de données de Wallonie (W), avec une différence moyenne de 61,1 unités de la LDV et un rapport moyen LDV_{10} / LDV_{35} de 0,42, traduisant une sous-estimation de la diversité (**Figure 30** (a)). La perte proportionnelle se présente cependant relativement constante avec une variabilité modérée entre les sites (σ : 0,09) (**Figure 30** (b)). Une forte corrélation de Spearman est observée entre les valeurs de la LDV pour 10 et 35 taxa ($\rho = 0,86$, $p < 0,001$) ainsi qu'une corrélation linéaire élevée ($R = 0,88$). Ces deux résultats indiquent que malgré la diminution systématique des valeurs absolues, la LDV calculée à partir

de 10 taxa conserve une bonne structure relative de la diversité lichéniques entre les sites et l'information essentielle sur les gradients de diversité. Les sites les plus diversifiés avec le protocole complet restent, dans la majorité des cas, les plus diversifiés avec le protocole simplifié. Une variabilité légèrement plus élevée est toutefois observée pour les sites présentant de faibles valeurs de la LDV, traduisant une sensibilité plus élevée de l'indice simplifié dans les contextes de faible diversité.

Les mêmes observations sont faites sur le jeu de données de Clermont-Ferrand (CF) : une sous-estimation systématique da la LDV et une conservation de la structure relative de la diversité. Cependant, cette dernière est plus faible que pour la Wallonie (corr : $\rho = 0,69$; $R = 0,73$ et dispersion du ratio : $\sigma = 0,18$). Cela peut notamment démontrer une influence de la localisation dans les résultats et une sensibilité accrue aux variations locales. Néanmoins, le rapport moyen LDV_{10} / LDV_{35} reste très proche de celui observé en Wallonie ($\approx 0,42$). Cette convergence, observée sur deux jeux de données indépendants, suggère que la réduction du nombre de taxa agit principalement comme une transformation proportionnelle de la LDV. Par conséquent, malgré une perte d'informations en valeur absolue, la stabilité du rapport LDV_{10} / LDV_{35}, permet d'appliquer une correction aux valeurs de la LDV issues du protocole simplifié afin de les rendre comparables à celles issues du protocole complet (**Figure 30** (c)). Les résultats obtenus après correction montrent que la LDV_{10} corrigée est effectivement très proche de la LDV_{35}, avec une légère surestimation (W : $p = 1,23$; CF : $p = 1,09$).

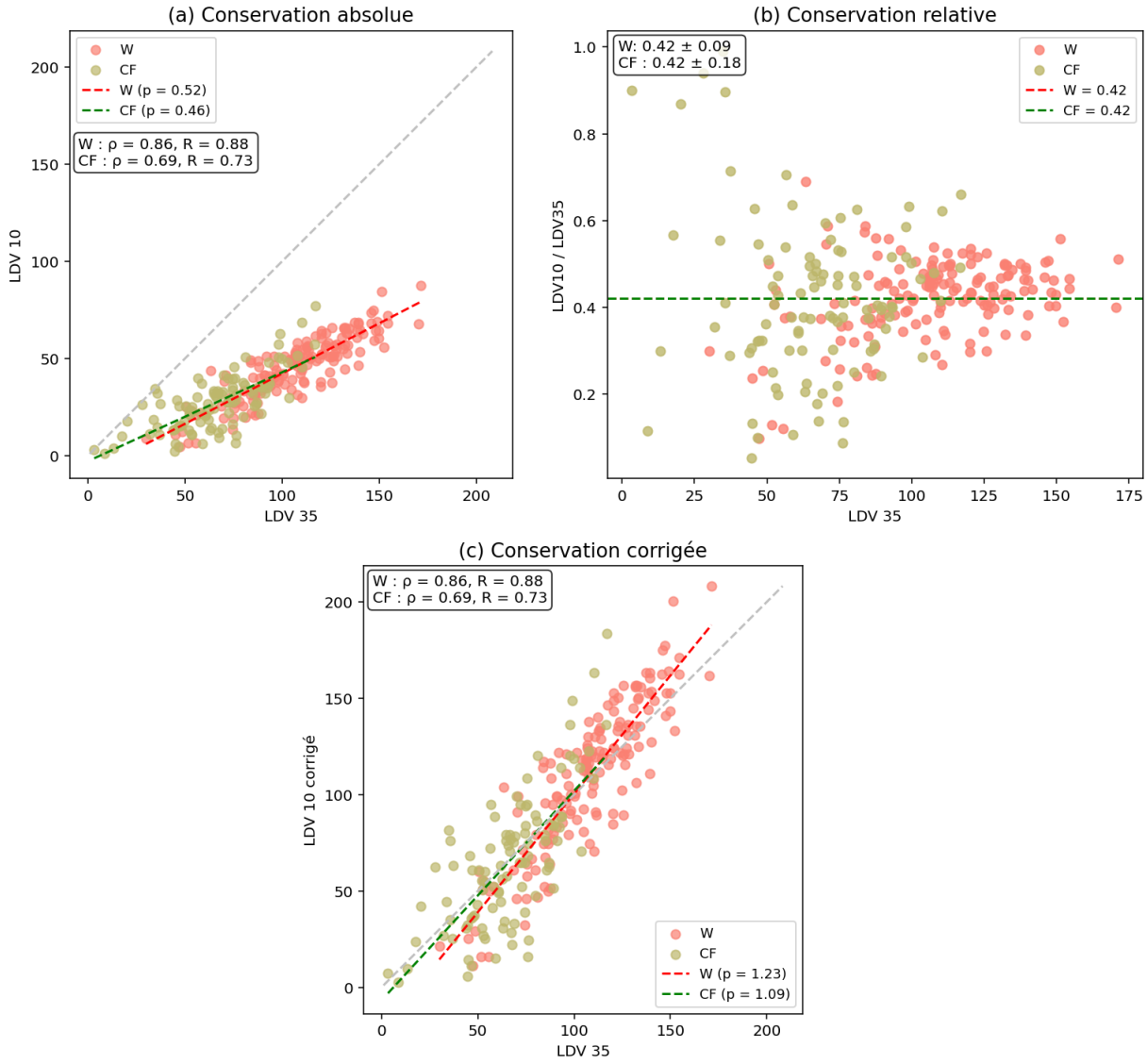


Figure 30 : Comparaison des valeurs de LDV calculées à partir de 35 et de 10 taxa en Wallonie (W ; n = 159) et à Clermont-Ferrand (CF ; n = 102). (a) Relation entre les valeurs de LDV obtenues avec 35 et 10 taxa. (b) Conservation relative des valeurs de LDV, exprimée par le rapport LDV_{10}/LDV_{35}. (c) Relation entre les valeurs de LDV obtenues avec 35 taxa et avec 10 taxa après correction. Les lignes pointillées représentent les régressions linéaires et les statistiques associées. La ligne pointillée grise représente la relation 1:1.

En toute logique, les indices de biodiversité apparaissent impactés par une réduction de taxa. Ainsi, le nombre de taxa observés dans le protocole simplifié devient un indice relativement peu comparable avec celui du protocole complet. Néanmoins, au-delà de la représentativité écologique, la sélection d'un nombre restreint de taxa soulève également une question sur l'intérêt du protocole pour les participants certains sites pouvant ne présenter qu'un faible nombre de taxa à observer. Cependant, très peu de sites ont présenté dans l'analyse un nombre de taxa réduit inférieur ou égal à deux. Le nombre minimal de taxa à observer pour conserver l'intérêt du participant reste une notion floue qui dépend de ses intérêts et objectifs personnels. Une enquête réalisée auprès des utilisateurs de la plateforme *iNaturalist*, a montré que les motivations principales des répondants étaient d'améliorer leurs connaissances dans l'identification de taxa et découvrir de nouvelles choses (Lowe et al., 2025). Cependant, au

travers de l'enquête menée dans ce travail, seuls 23 % des répondants à la question portant sur l'illustration des cours/activités déclaraient pratiquer Lichens GO dans le but d'une étude de la biodiversité (Tableau 4 ANNEXE F). De nombreuses autres motivations étaient énoncées, indiquant que le but principal n'est pas forcément d'observer un nombre important de taxa mais plutôt d'introduire la démarche scientifique, la qualité de l'air et le fonctionnement des organismes.

L'indiceLDV, soumis également à une sous-estimation de sa valeur, s'aligne avec d'autres études sur le sujet. Une étude de Giordani et al. (2009), a également montré une prédictivité par simplification, inférieure à 40 %, et une variabilité importante entre les résultats d'un public expert et d'un public novice. Une bonne corrélation était observée pour les résultats obtenus par le public d'experts, mais ils mettaient en évidence que cela n'était pas le cas pour le public novice. Cependant, les jeux de donnés utilisés dans ce travail présentent des observations réalisées par des groupes uniformes de participants expérimentés. De moins bons résultats pourraient donc éventuellement être observés pour des publics novices. Les jeux de données ont toutefois montré qu'il était possible d'appliquer une correction aux valeurs de LDV les rendant comparables à celles des relevés de Lichens GO complet. Cet indice, moyennant correction, reste donc comparable aux relevés Lichens GO issus du protocole complet contrairement au nombre de taxa brut. La LDV reste toutefois un indice de la qualité de l'air discuté, notamment par le fait que si l'abondance des taxa peut être liée à la pollution, elle peut également résulter d'autres facteurs tels que les conditions écologiques et le microclimat du site (Giordani, 2007; Loppi et al., 1997; Rydzak, 1968). Cet indice peut également masquer des changements de communautés si ceux-ci se compensent (Pinho et al., 2011). De plus, il est attendu que les méthodes basées sur la diversité des taxa deviennent moins pertinentes dans des scénarios de diminution des émissions de polluants (Bates et al., 2001; Giordani, 2007).

Indices écologiques et de pollution

Deux indices écologiques sont considérés sur la plateforme : la proportion de taxa eutrophes et la proportion de taxa acidophiles. Ces indices évaluent majoritairement l'écologie du site par les préférences environnementales et l'abondance de chaque taxon (Nimis & Stefano, 2002). La cohérence entre les sites est globalement conservée surtout au niveau de la proportion de taxa acidophiles (Figure 31 (a-b)). Cependant, des écarts importants des valeurs absolues de ces indices rend leur interprétation et comparaison avec le protocole complet moins solide. Pour les taxa eutrophes, les pentes identiques des droites de régression pour les deux jeux de données suggèrent un biais systématique lors de la réduction du nombre de taxa considérés, qui pourrait potentiellement être corrigé par une calibration. Pour les taxa acidophiles néanmoins, une différence importante entre les jeux de données existe, ce qui empêche ce type de correction. La proportion de taxa acidophiles reste donc difficilement comparable entre protocole simplifié et protocole complet.

Actuellement, seul un indice de pollution est directement accessible sur la plateforme, à savoir la proportion de taxa toxitolérants c'est-à-dire de taxa qui présentent une résistance globale à la pollution. Cet indice montre des corrélations très faibles entre protocole complet et simplifié, qui n'apparaissent donc pas comparables (Figure 31 (c)). D'autres indices de pollution existent

tels que ceux basés précisément sur un type de polluant et leurs résistances et sensibilités propres à celui-ci (Figure 31 (d-i)). Ceux-ci restent globalement cohérents avec ceux obtenus à partir de 35 taxa mais les écarts observés entre les relevés et les différences de relation entre les deux jeux de données indiquent néanmoins que la réduction du nombre de taxa peut affecter l'estimation de ces indices. Ils seraient donc également peu interprétables. Il s'agit cependant d'indices qui ne sont pas encore au point et qui ne seront peut-être jamais utilisés sous cette forme dans Lichens GO. Il pourrait être pertinent d'évaluer la cohérence, entre protocoles, d'autres indices de pollution tel que celui proposé par Will-Wolf et al. (2015) prenant compte à la fois des taxa sensibles et résistantes à un polluant.

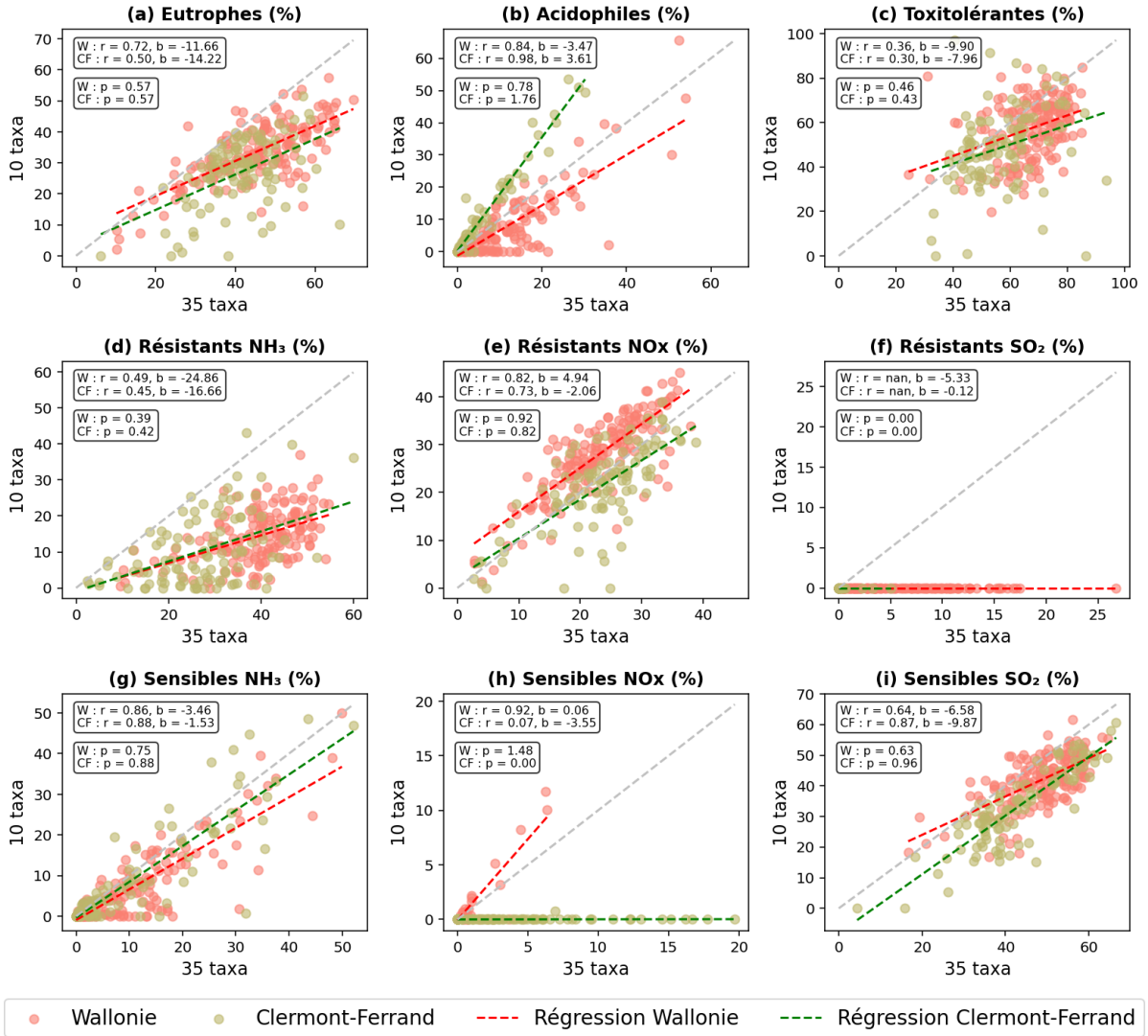


Figure 31 : Comparaison des valeurs des différents indices écologiques et de pollution calculés à partir des protocoles à 35 et à 10 taxa pour les sites de Wallonie (n = 159) et de Clermont-Ferrand (n = 102). Les coefficients de corrélation (r) et les biais moyens (b) sont indiqués pour chaque indice. Les lignes pointillées représentent les régressions linéaires avec leur pente (p). La ligne pointillée grise représente la relation 1:1.

Optimisation du choix de taxa

La sélection des 10 taxa retenus dans le protocole simplifié a été réalisée à la fois sur base des tolérances connues de chaque taxon (Nimis & Stefano, 2002) ainsi que sur base d'autres critères tel que par exemple leur intérêt pédagogique. Aucune analyse quantitative n'a été réalisée en amont pour vérifier la bonne restitution des indices découlant de cette sélection. Les analyses réalisées en aval sur les jeux de données ont montré des écarts avec ceux obtenus à partir du protocole complet. Une réflexion complémentaire a donc été d'évaluer parmi toutes les sélections de dix taxa possibles où se situait la sélection retenue en termes de restitution des différents indices écologiques et de pollution. L'analyse s'est basée sur une optimisation multicritère non-pondérée des neufs indices présentés à la **Figure 32**. Pour 10 000 combinaisons de taxa tirés aléatoirement, un score global représentant l'erreur par rapport aux résultats obtenus avec 35 taxa a été calculé. Celui-ci représente la MAE + (1 – corr), prenant en compte à la fois la proximité des valeurs et la structure des sites.

La sélection de taxa qui a été choisie, représentée en noir sur la Figure ci-dessous, obtient un score d'erreur oscillant entre 9,02 pour le jeu de données de Wallonie et 8,23 pour le jeu de données de Clermont-Ferrand. Ces scores démontrent que même si le choix de taxa n'est pas le plus optimal possible (W : 4,44 ; CF : 4,80), ils se situent tous les deux sous le premier quartile (W : 9,35 ; CF : 9,57) plaçant la sélection parmi les meilleurs compromis en termes de restitution des neufs indices. Cela permet de valider l'utilisation de cette sélection dans le contexte d'un compromis entre conservation des résultats et simplification des observations pour les utilisateurs.

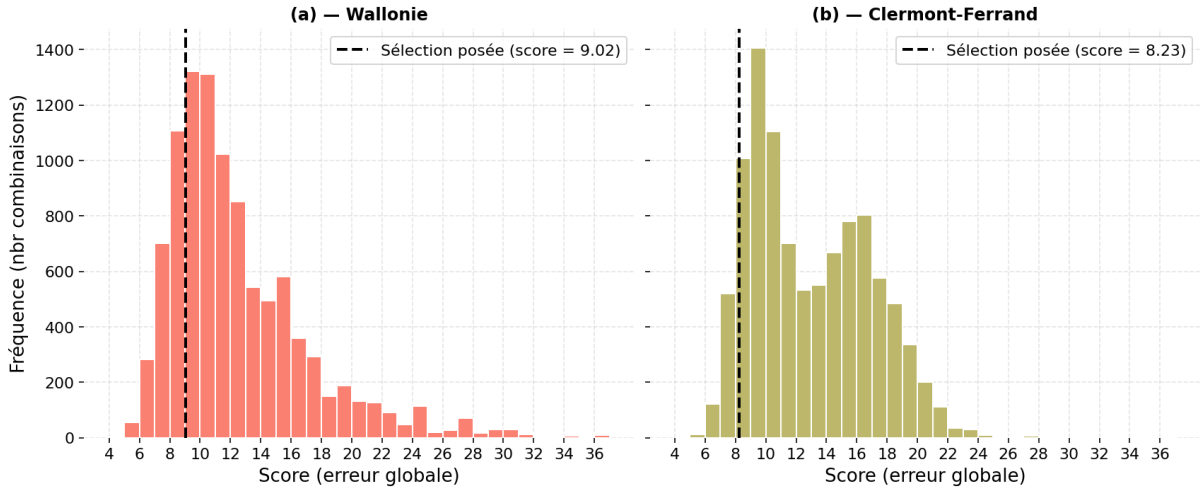


Figure 32 : Distribution des scores d'erreur globale obtenus pour 10 000 combinaisons de 10 taxa parmi les 35 taxa du protocole complet Lichens GO. La ligne noire indique le score associé à la sélection de taxa retenue.

Au-delà de la sélection de taxa en elle-même, une réflexion peut également être portée sur le nombre de taxa retenus. Une analyse présentée en ANNEXE I a montré que l'ajout de deux taxa pouvait réduire le score d'erreur d'environ un tiers et qu'une réduction jusqu'à quatre taxa était possible sans dégrader considérablement les scores d'erreurs tout en conservant une bonne relation de LDV. Cela ne démontre pas que 10 taxa est un mauvais choix mais plutôt que des adaptations sont possibles sans dégrader les résultats, en fonction des retours du protocole.

6.2. Tests réalisés par des participants

6.2.1. Perception des scénarios

Avantages et inconvénients observés pour chaque scénario

Les participants aux tests simplifiés ont donné la note d'appréciation moyenne de 6,9 / 10 pour le scénario 1 et la note de 6 / 10 pour le scénario 2, avec pour chacun une note moyenne plus élevée donnée par les testeurs à Louvain-la-Neuve que pour les testeurs à distance. Cette différence pourrait s'expliquer par un biais de désirabilité sociale lié à la forme orale des questions à Louvain-la-Neuve (Van de Mortel, 2008), ou bien au fait que tous les participants à Louvain-la-Neuve étaient novices contrairement à certains testeurs à distance. Le scénario 1 obtient une note légèrement plus élevée que le scénario 2 mais aucune différence significative n'est observée entre les deux scénarios ($p > 0,05$). Ces résultats sont cependant biaisés par le fait qu'une partie des répondants ne soit pas le public visé par le protocole simplifié. Les répondants ayant participé plus de cinq fois au protocole complet ont donné des notes inférieures ou égales à 5 pour les deux scénarios, indiquant préférer le scénario complet. A contrario, les professeurs d'école participant ont exprimé plus d'enthousiasme pour les scénarios, en précisant notamment que ces scénarios simplifiés étaient plus envisageables avec des collégiens que le protocole complet. Une testeuse en milieu scolaire a préféré tester uniquement le scénario 1, le scénario 2 lui paraissant trop peu rigoureux et difficile à mettre en place. Les deux autres retours de testeurs en milieu scolaire reçus, ayant réalisés les deux protocoles, indiquent une préférence pour le scénario 2, cependant, chaque scénario semble présenter ses propres forces et faiblesses (Tableau 2).

Tableau 2 : Principaux avantages et inconvénients rapportés par les testeurs à distance et à Louvain-la-Neuve pour chacun des scénarios, classés selon leur fréquence de citation.

SCÉNARIO 1		SCÉNARIO 2	
Avantages	Inconvénients	Avantages	Inconvénients
La grille guide le regard	Ne prend pas en compte les lichens situés en dehors de la grille	Prend en compte les lichens sur tout le tour de l'arbre	Difficulté à estimer le recouvrement
Donne une impression de précision et de rigueur scientifique	Nécessite davantage de matériel	Nécessite moins de matériel	Risque d'oublier certaines zones, méthode moins précise
Identification de chaque taxon une seule fois par carré	Installation plus longue et plus difficile	L'abondance ressort directement	Méthode moins structurée et plus vaste
Les nouveaux participants sont moins perdus	Donne une impression d'activité plus longue	Donne une impression d'activité plus courte	Tendance à se concentrer davantage sur les gros lichens
	L'abondance ressort moins directement		

D'après les réponses fournies par les participants, le scénario 1 présente comme principal avantage de guider le regard lors de l'observation grâce à l'utilisation de la grille, ce qui aide les participants à se sentir moins perdus, en particulier dans le cadre d'une première observation. L'aspect plus protocolaire de la grille leur confère également un sentiment de précision et de rigueur scientifique. De plus, la grille ne nécessite l'identification de chaque taxon qu'une seule fois par carré, tandis que le scénario 2 implique théoriquement l'identification de l'ensemble des spécimens présents sur le tour de l'arbre.

Cependant, cette caractéristique constitue également un avantage attribué au scénario 2, puisqu'elle répond à une frustration exprimée par une majorité de participants dans le cadre du scénario 1 : l'impossibilité de notifier des taxa lichéniques observés en dehors de la grille. Le scénario 2 présente également l'avantage majeur de nécessiter moins de matériel que le scénario 1. A cet égard, le scénario 1 n'apporte en effet aucune modification par rapport au protocole complet et ne répond donc pas aux remarques formulées dans la première enquête concernant les difficultés liées à l'obtention et à l'utilisation du matériel, notamment pour le jeune public.

D'après les participants, l'inconvénient majeur du scénario 2 réside dans la difficulté d'évaluer le recouvrement des taxa sur le tronc. Les participants ont en effet tendance à oublier certaines zones et à accorder davantage d'attention aux grands lichens qu'aux plus petits. Bien que plusieurs participants aient mentionné l'aide apportée par la figure présentant les classes de recouvrement (Figure 26) dans leurs estimations, certains ont néanmoins rencontré des difficultés lors de l'évaluation du recouvrement de nombreux petits lichens dispersés, par opposition à celui de grands lichens regroupés. Comme cela a été évoqué, l'estimation par classe de recouvrement apporte une part de subjectivité supplémentaire qui peut mettre en difficulté les participant et accroitre la variabilité des réponses (Lewandowski & Specht, 2015; Tweddle et al., 2012).

Temps requis pour la phase de terrain

Le temps nécessaire à la réalisation de l'activité a fortement varié en fonction des testeurs, la taille des groupes et leur mode de fonctionnement. À Louvain-la-Neuve, il est difficile de distinguer le temps consacré à chaque scénario, les participants ayant généralement réalisé les deux en parallèle. Toutefois, la réalisation des deux scénarios a nécessité entre 1 h 15 (groupe de dix participants avec répartition des tâches) et 3 h (participants individuels). Les réponses des testeurs à distance indiquent, quant à elles, que le scénario 2 ($\mu \approx 40$ min) est systématiquement plus rapide que le scénario 1 ($\mu \approx 50$ min). Ces résultats doivent cependant être nuancés : une partie des répondants possédait déjà une expérience dans l'identification des lichens (27 %) et la majorité des participants ont réalisé le scénario 1 avant le scénario 2. Or, les observations menées à Louvain-la-Neuve ont montré que les participants amélioraient progressivement leur capacité d'identification de taxa au fil de l'activité, ce qui permettait d'accélérer leur vitesse de réalisation. Ce gain d'efficacité au fil du temps est une tendance largement observée et mise en avant dans d'autres projets de sciences participatives (Jiguet, 2009; Kendall et al., 1996; Swanson et al., 2016).

Un testeur ayant expérimenté les scénarios en milieu scolaire indique que les deux protocoles peuvent être réalisés en une heure chacun, tandis qu'un autre souligne que le scénario 1, bien que plus rapide que le protocole complet, s'intègre difficilement dans une période de cours de 55 minutes.

Réduction de taxa lichéniques

Concernant la réduction de taxa, les participants ayant déjà réalisé le protocole complet à plus de cinq reprises déplorent une perte d'informations. L'ajout d'un plus grand nombre de taxa a notamment fait l'objet de certaines suggestions d'amélioration de leur part. A l'inverse, les testeurs ayant expérimenté le protocole dans un cadre scolaire ont souligné que la réduction du nombre de taxa simplifiait les relevés, même si l'identification restait encore parfois complexe. Lors des tests à Louvain-la-Neuve, il a également été observé que dix taxa représentaient déjà un défi pour des participants novices, malgré leur parcours académique. Ces tests ont, par ailleurs, mis en évidence que la réduction du nombre de taxa pouvait conduire à certaines confusions liées au manque de références des participants. Comme le mentionne Dickinson et al. (2010), le bruit de fond représenté par des taxa hors protocole peut induire davantage d'erreurs de relevés. Les participants pourraient alors avoir tendance à associer un taxon inconnu à l'espèce cible la plus ressemblante, conformément à l'heuristique de représentativité décrite par Tversky & Kahneman (1974). En réalité, face à une incertitude d'identification, les participants sont confrontés à deux possibilités : soit ils font face à un taxon cible qu'ils n'arrivent pas à reconnaître, soit ils font face à un taxon non repris dans la liste et qu'ils ne sont pas censés relever. Les difficultés des participants à trancher entre les deux pourraient notamment s'expliquer par un manque de comparaison et de recul, les participants ne disposant comme référence que les dix lichens proposés dans la fiche.

Pour éviter ce genre de confusions, il serait pertinent d'ajouter plus d'outils sur le site internet afin de pouvoir se familiariser avec les taxa avant l'activité, spécialement en ce qui concerne les participants ne bénéficiant pas d'une séance introductive (Kosmala et al., 2016). Bien que cela puisse être difficile et demander du temps comme le souligne Newman et al. (2010), la création de vidéos présentant les dix taxa, pourrait aider les participants à être mieux préparés. De plus, des tests de reconnaissance tels que ceux déjà proposés par VNE[25] mais adaptés à la liste simplifiée pourraient grandement aider les participants, en les entrainant notamment à indiquer qu'un taxon n'est pas présent.

De nombreux participants ont également exprimé le souhait de pouvoir indiquer les taxa observés hors protocole sur leurs sites d'étude. Leur expérience fait ressortir une frustration qui existait déjà pour le protocole complet de Lichens GO mais qui était probablement moins forte en raison du nombre réduit de taxa hors protocole observé. Les participants expriment une incompréhension quant aux raisons de cette limitation. Le protocole ayant pour objectif de constituer une méthode standardisée, aucune donnée exploitable ne pourrait être tirée de ces informations complémentaires. Plutôt que de proposer un champ libre destiné à recueillir des informations qui ne seraient pas utilisées, il pourrait être envisagé de répondre directement aux interrogations des participants en ajoutant, sur la plateforme de Lichens GO, des

[25] https://www.vigienature-ecole.fr/en/node/344

explications complémentaires concernant les choix méthodologiques ayant guidé la construction des protocoles, qu'ils soient simplifiés ou complets. Cela rejoint plusieurs auteurs qui soulignent l'importance pour les participants de comprendre à la fois l'enjeu scientifique, le protocole et les données qui sont obtenues en sciences participatives (Bonney, Cooper, et al., 2009; Phillips et al., 2014). De plus, lorsqu'un participant se sent limité par la restriction du nombre de taxa dans le protocole simplifié, celui-ci peut être orienté vers le protocole complet, lui permettant une approche plus exhaustive des lichens.

Évaluation des fiches et outils mis à disposition

La majorité des participants apprécient la fiche taxa et son utilisation pour l'identification des taxa. Plusieurs améliorations ont toutefois été proposées. Certains participants suggèrent de regrouper les dix taxa sur une seule face afin d'éviter de retourner la feuille ou de limiter les impressions, remarque également formulée pour les fiches de relevé. L'ajout d'une règle graduée, d'informations sur la sensibilité des taxa aux polluants ainsi que d'une clé de détermination simplifiée a également été proposé. Concernant les fiches de relevés, l'ajout de la catégorie « cour de récréation » parmi les types de sites d'étude a été suggéré. Il a également été signalé et observé, dans le scénario 2, que plusieurs participants ont laissé vide la case « absent », préférant ne rien cocher, ce qui questionne la pertinence de cette option. Cependant, l'absence de l'option pourrait, en cas d'incertitude, tenter les participants de sélectionner la plus faible catégorie de recouvrement disponible plutôt que de conclure à l'absence du taxon. Enfin, plusieurs participants ont exprimé le souhait de disposer d'une version numérique des fiches de relevé. Cette demande s'inscrit dans la transition actuelle vers des systèmes exclusivement électroniques qui sont décrits comme de bonnes alternatives aux formulaires papier pour rendre la saisie plus rapide, accessible et précise (August et al., 2015; Newman et al., 2012)

Par ailleurs, la pertinence des quatre premières questions des fiches de relevés (présence d'ombre permanente, de mousses ainsi que de lichens juvéniles ou nécrosés) peut être questionnée. Presque tous les participants ont rencontré au moins une difficulté ou exprimé une interrogation concernant ces questions (ANNEXE J). Les principales difficultés concernaient l'évaluation de l'ombre permanente, les relevés n'étant réalisés qu'à un moment précis de la journée, ainsi que la reconnaissance des lichens juvéniles et nécrosés. À Louvain-la-Neuve, la question relative à l'ombre permanente présente d'ailleurs la plus forte variabilité dans les réponses. Plusieurs comportements ont été observés face à ces difficultés : certains participants répondaient de manière approximative, d'autres oubliaient de compléter certaines questions ou exprimaient explicitement leur incertitude, tandis que quelques participants consacraient un temps important à tenter d'y répondre avec précision. Dès lors, l'intérêt de maintenir ces questions peut être remis en question, d'autant plus que les données récoltées ne sont actuellement pas exploitées dans les analyses. Leur suppression permettrait de réduire le temps nécessaire au relevé et de limiter une perte d'attention des participants face à des questions perçues comme imprécises ou difficiles à interpréter. La littérature souligne cependant, que le potentiel des données issues des sciences participatives reste encore largement sous-exploité (Bonney et al., 2014; Follett & Strezov, 2015), indiquant que même si elles ne sont pas utilisées dans l'immédiat, elles pourraient l'être à l'avenir. Dans cette

perspective, leur maintien pourrait se justifier, moyennant toutefois des explications plus précises et des ressources complémentaires afin de limiter l'incompréhension et les difficultés rencontrées par les participants.

6.2.2. Relevés de terrain

Nombre de taxa observés

Le nombre moyen de taxa observés par les participants à distance est de 5,5 dans le scénario 1 et de 5,6 dans le scénario 2. À Louvain-la-Neuve, sur le même site, le nombre de taxa moyen observés pour le scénario 1 est de 6,3 et pour le scénario 2 de 5,8. Cela correspond globalement aux moyennes de taxa observés sur les jeux de données de Wallonie et de Clermont-Ferrand (Figure 29). Cependant, pour les données de Louvain-la-Neuve, cela peut également montrer que les participants réalisent plus grossièrement les estimations dans le scénario 2, qui devrait théoriquement reprendre au moins voir plus de taxa que dans le scénario 1 étant donné qu'il couvre une plus grande surface (Chmura & Salachna, 2016).

Lors des tests à Louvain-la-Neuve, les nouveaux participants n'ont pas semblé être dérangés par le fait de n'observer qu'environ 6 taxa. Cependant, la présence d'un seul lichen crustacé dans la sélection de taxa du protocole simplifié déçoit certains participants quand ce taxon n'est pas, ou pratiquement pas, présent sur le site comme à Louvain-la-Neuve. En effet, certains participants n'ont par conséquent pas pu visualiser à quoi pouvait réellement ressembler un lichen crustacé. Dans ce cadre, il serait pertinent de réfléchir à l'ajout d'un autre taxon de lichen crustacé tel que *Amandinea punctata,* taxon crustacé le plus relevé sur Lichens GO et sans confusion notifiée ou bien *Candelariella* sp. moyennant l'ajout de *Candelaria concolor* (foliacé) afin d'éviter leur confusion.

Variance inter-participants

La comparaison des résultats d'estimations finales du recouvrement des dix taxa par les différents groupes de testeurs à Louvain-la-Neuve indique une variabilité inter-groupe qui reste importante malgré les choix posés dans la réduction des taxa dans le but de faciliter l'identification (Figure 33). Il peut être noté que les taxa présentant la plus faible variabilité correspondent majoritairement à des taxa peu abondants ou absents du site, ce qui limite l'interprétation de cette concordance entre observateurs. À l'inverse, les taxa les plus abondants ou visuellement dominants présentent des écarts importants entre groupes, soulignant une forte variabilité liée à l'observateur. Cela suggère que, même dans un protocole simplifié, les estimations de recouvrement réalisées au travers du programme de sciences participatives Lichens GO restent sensibles à des biais d'observation et à une subjectivité importante.

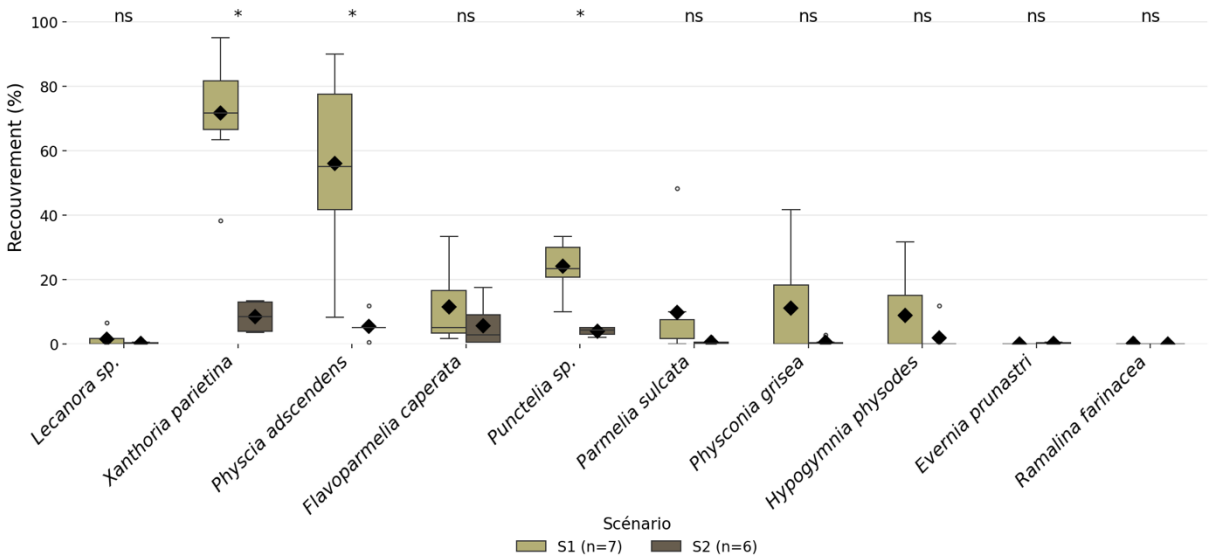


Figure 33 : Distribution des estimations de recouvrement (%) obtenues lors des tests à Louvain-la-Neuve pour chaque taxon et chaque scénario (S1 et S2). Les losanges indiquent le recouvrement moyen observé et la significativité des différences entre scénarios est précisée ($p < 0,05$; ns = non significatif).

Il peut également être observé que les valeurs moyennes de recouvrement par taxon sont parfois très éloignées en fonction du scénario et donc de la méthode de quantification (**Figure 33**). Cela indique que le choix du scénario a la possibilité d'avoir un impact important sur les données, notamment pour *Xanthoria parietina*, *Physcia adscendens* et *Punctelia* sp., pour lesquelles une différence significative est observée entre les recouvrements moyens obtenus au travers des deux scénarios. Le scénario 1 par quantification à travers la grille a tendance à mener à une surestimation du taxon, tandis que le scénario 2 par échelle de recouvrement, bien que couvrant une plus grande surface, présente plus une tendance à la sous-estimation, les participants ayant du mal à assembler tous les individus de tailles différentes afin d'avoir une estimation du recouvrement. Une étude de comparaison d'estimation de recouvrement par technique de fréquence et par technique d'estimation visuelle menée auprès d'un groupe d'étudiants, par Chmura & Salachna (2016), présente les mêmes tendances. Ils observent également des recouvrements significativement plus importants avec la technique de fréquence qu'avec celle portant sur l'estimation visuelle de recouvrement mais par contre une plus grande diversité de taxa observées avec la technique d'estimation visuelle de recouvrement. Cependant, dans le cadre de ce travail, si les deux estimations sont biaisées, le scénario 1 a cependant l'avantage de présenter un biais identique au protocole complet, ce qui rend la comparaison de leurs résultats plus directe.

L'analyse complémentaire des différences de résultats obtenus pour les différents indices de Lichens GO, en fonction du scénario utilisé, montre que cet écart entre valeurs de recouvrement se traduit par un écart entre indices estimés (**Figure 56** ; ANNEXE J). Si certains indices comme ceux des pourcentages de taxa toxitolérants et acidophiles montrent une forte corrélation entre les deux scénarios ($r = 0,89$ et $r = 0,86$), d'autres indices présentent une corrélation plus faible et/ou un biais plus grand, notamment celui lié à la résistance aux NO_x ($r = 0,58$ et biais = - 12,4).

Variance participants/expert

La comparaison de la moyenne des relevés réalisés par les différents groupes avec le relevé de référence réalisé par Hugo Counoy montre une différence plus ou moins importante avec ce que les participants auraient dû globalement observer (**Figure 34**). Dans les deux scénarios, le recouvrement de *Physcia adscendens*, est largement sous-estimé (S1 : - 42 % & S2 : - 8 %). *Punctelia* sp. et *Physconia grisea* ont tous les deux tendance à être également sous-estimés dans les deux scénarios alors qu'à l'inverse *Flavoparmelia caperata* et *Hypogymnia physodes* sont majoritairement surestimés, peu importe le scénario. Les observations qui ont pu être faites des participants à Louvain-la-Neuve ont montré une confusion entre *Punctelia* sp. et *Flavoparmelia caperata*, ce qui peut partiellement expliquer que l'un soit sous-estimé et l'autre surestimé. La même remarque est faite pour *Physcia adscendens* et *Hypogymnia physodes*. Une variabilité peut-être en partie due au placement des grilles et cordes de délimitation mais les écarts importants traduisent tout de même de mauvaises identifications et des confusions entre taxa.

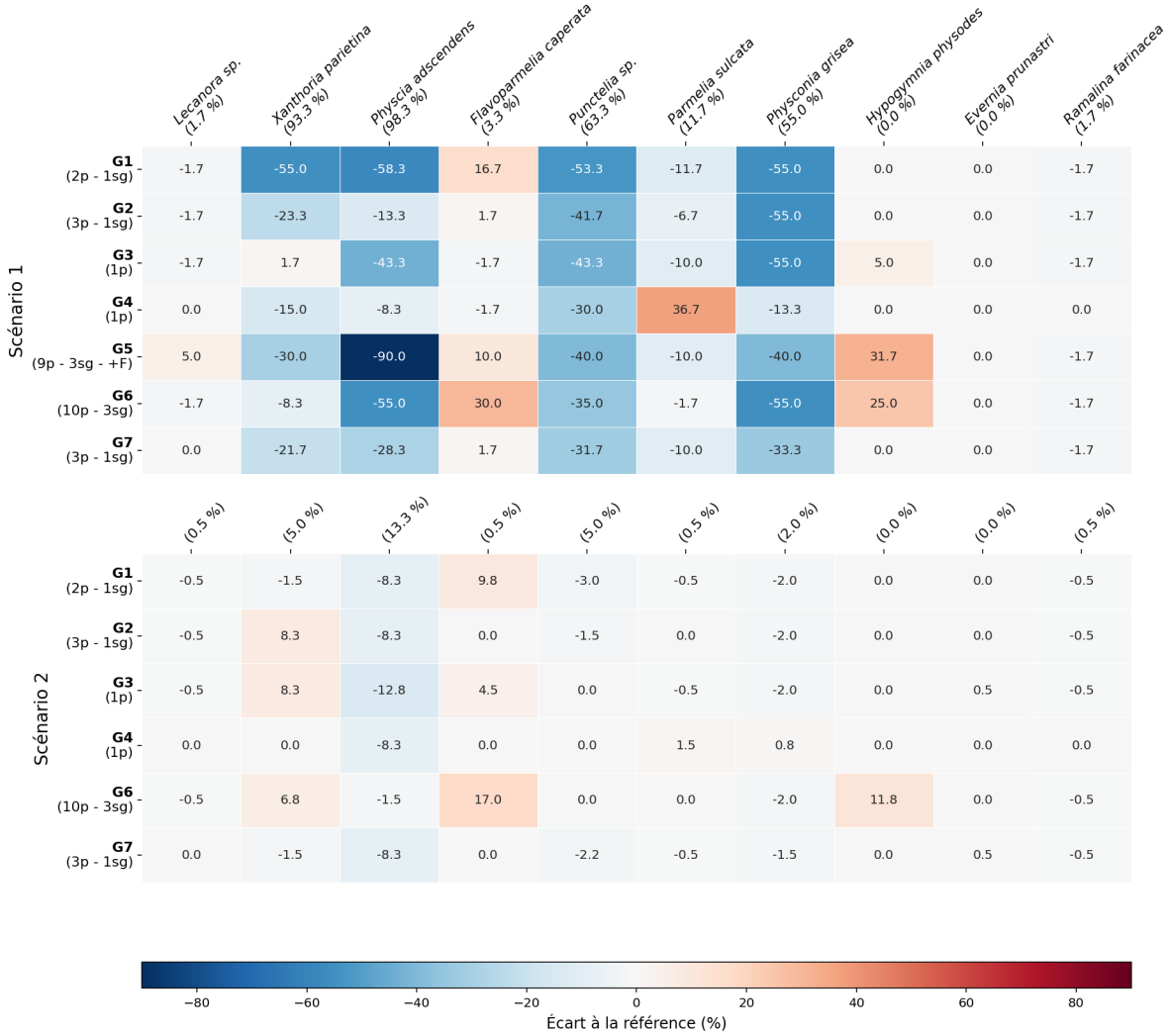


Figure 34 : Écart entre les estimations moyennes de recouvrement obtenues par les testeurs et les valeurs de référence relevées par Hugo Counoy (présentées au-dessus de chaque colonne) pour le scénario 1 (n = 7) et le scénario 2 (n = 6).

Le groupe 5, ayant reçu une formation d'une heure préalablement à la phase de terrain, ne présente pas moins d'écarts à la référence que les autres groupes. Au contraire, il obtient les plus grands écarts pour trois taxa sur dix. Cette observation peut partiellement nuancer l'attente de meilleurs résultats après formation. Cependant, les conditions de réalisation du relevé (moins de 1 h, pluie) ont également pu influencer ces résultats tout comme la plus grande dissipation des participants. Plusieurs études statuent sur le fait que l'entrainement et la formation en sciences participatives amènent une amélioration des résultats (Crall et al., 2011; Kosmala et al., 2016). Dans une étude menée par Farr et al. (2023) sur l'identification de chants d'oiseaux, il a notamment été observé que la formation des participants augmentait le pourcentage de bonnes identifications de 30 %. Dans le cadre de ce travail, de plus nombreux relevés avec formation préalable auraient dû être menés pour pouvoir observer et quantifier l'impact de la formation sur les relevés du protocole simplifié.

Cet écart entre valeurs de référence et moyennes des relevés amène également à des variations dans la mesure des indices utilisés dans Lichens GO. Dans les deux scénarios, les relevés réalisés par les testeurs ont tendance à sous-estimer les indices par rapport à ceux calculés à partir du relevé de référence (Tableau 3). Les écarts entre les valeurs obtenues par les testeurs et celle de la référence sont globalement plus faibles dans le scénario 1, indiquant une meilleure précision. Le scénario 2 présente des erreurs nettement plus élevées, malgré des biais moyens plus faibles pour certains indices. Cette différence s'explique par une variabilité plus importante des relevés dans le scénario 2, où l'on observe à la fois des surestimations et des sous-estimations selon les testeurs. A l'inverse, dans le scénario 1, les erreurs sont plus homogènes et majoritairement orientées vers une sous-estimation. Ainsi, le scénario 1 est caractérisé par une erreur systématique, tandis que le scénario 2 présente une erreur plus dispersée entre les testeurs, ce qui entraîne des valeurs de MAE plus élevées. Cependant, le scénario 2 est également marqué par une expérience et une confiance moins élevée du testeur de référence, dans le relevé, ce qui peut contribuer à cette variabilité accrue.

Tableau 3 : Comparaison des erreurs absolues moyennes (MAE) et des biais entre les estimations des testeurs à Louvain-la-Neuve et les valeurs de référence pour les deux scénarios étudiés.

Indice	Scénario 1 (n = 7)		Scénario 2 (n = 6)	
	MAE	biais	MAE	biais
% taxa toxitolérantes	20,5	-19,8	33,4	-33,4
% taxa eutrophes	12,9	-12,9	31,7	-31,7
% taxa acidophiles	7,00	4,95	5,20	4,59
% taxa résistants au NH_3	11,6	-11,6	7,39	-5,34
% taxa sensibles au NH_3	11,0	10,5	19,8	19,4
% taxa résistants aux NO_x	12,9	-12,9	31,7	-31,7
% taxa sensibles aux NO_x	0.443	-0,427	1,61	-1,44
% taxa résistants au SO_2	/	/	/	/
% taxa sensibles au SO_2	14,7	-14,1	18,9	-18,4

7. Conclusion et perspectives

Au travers de ce travail visant à proposer une version simplifiée du protocole de Lichens GO, deux grandes étapes ont été réalisées : (1) une enquête afin d'identifier les difficultés rencontrées par les participants et (2) l'élaboration de scénarios de simplification ainsi qu'une évaluation de l'impact de ces modifications sur les résultats obtenus et sur l'expérience des participants.

L'enquête a permis d'identifier les difficultés et les obstacles rencontrés par les participants. Ces difficultés se sont révélées être majoritairement identiques quels que soient les profils des participants et les contextes de participation à l'activité (spécialement entre milieu scolaire et non-scolaire). Ces difficultés sont la durée de l'activité, laquelle limite la participation de certains publics et décourage certains participants potentiels avant même leur engagement, ainsi que de l'identification des lichens qui apparaît peu accessible menant à l'incertitude chez de nombreux participants. Cette deuxième difficulté majeure peut mener à l'abandon, à une non saisie des relevés jugés peu fiables, ainsi qu'à un non renouvellement de la participation au programme.

Pour répondre à ces problématiques, deux simplifications ont été proposées. La première a consisté à sélectionner un sous-ensemble de taxa du protocole complet afin de passer de 35 taxa à 10. Ces taxa ont été retenus à la fois pour leur capacité à représenter une diversité de gradients écologiques et de pollution, mais aussi pour leur facilité d'observation, leur occurrence fréquente, le faible risque de confusion qu'ils présentent et leur intérêt pédagogique. Bien que cette réduction puisse impacter les résultats et la comparabilité au protocole complet, elle permet de concentrer les participants sur moins de possibilités différentes. La seconde simplification a consisté à opérer un changement dans le mode de quantification de l'abondance, passant d'une méthode d'estimation par quadrats à une échelle d'estimation visuelle du recouvrement. Cette dernière méthode peut être sujette à plus de subjectivité mais présente pour certains l'avantage d'être plus rapide.

Ces deux simplifications ont par la suite été évaluées à travers deux scénarios de simplification, l'un isolant l'effet de la réduction de taxa (scénario 1) et l'autre, intégrant en plus le changement de méthode de quantification (scénario 2). L'évaluation de l'impact de la réduction du nombre de taxa a été évaluée sur base de la dégradation de deux jeux de données complémentaires. Bien que les analyses aient montré qu'aucun taxa conservé ne soit extrêmement spécialisé, la conservation uniquement de taxa généralistes et intermédiaires se justifie dans le cadre d'une simplification de protocole.

La dégradation à 10 taxa entraîne un biais systématique sur les valeurs estimées de LDV, lesquelles peuvent donc être corrigées. Cet indice reste, par conséquent, comparable à celui du protocole complet, tout comme la part de taxa eutrophes. Cependant, certains autres indices ne semblent pas se rapprocher des valeurs obtenues avec 35 taxa et ne pas présenter de biais systématique entre les jeux de données, ce qui limite leur correction. Parmi toutes les sélection de 10 taxa possibles, celle réalisée apparaît comme un bon compromis entre une

minimisation des erreurs et la prise en compte d'autres facteurs, tels que l'occurrence, l'intérêt pédagogique, *etc*.

Les tests de terrain réalisés à distance et à Louvain-la-Neuve ont permis de recueillir les impressions et ressentis des participants sur ces modifications. Ils montrent que la simplification du protocole est globalement bien accueillie même si le scénario 1 semble plus accepté en raison de sa continuité avec le protocole actuel et l'utilisation d'un cadre plus structuré. Les tests mettent également en évidence que, quel que soit le scénario, la simplification du protocole ne suffit pas à éliminer les écarts d'observations des différents participants sur un même site. Malgré la simplification et la réductions du nombre de taxa proposés, un biais d'observation impacte toujours fortement les relevés. Par ailleurs, il est ressorti des tests de ces deux scénarios une frustration de certains participants sur le manque de représentativité des lichens crustacés dans la sélection. Enfin, les deux scénarios permettent une réduction du temps nécessaire à la réalisation du protocole. Cela constitue un avantage certain afin de permettre à plus de personnes de réaliser des relevés même si la durée en contexte scolaire mériterait plus de tests afin de valider sa faisabilité sur un créneau de cours.

La différence de ressenti des participants entre les scénarios n'étant que minime, le scénario 1 apparaît comme une bonne option puisqu'il réduit le temps, la difficulté et dispose d'un taux d'acceptation plus élevé auprès des participants. De plus, la méthode de quantification étant la même que pour le protocole complet de Lichens GO, il induit non seulement le même biais d'estimation mais en plus il introduit davantage le protocole complet auprès des testeurs. Ce scénario nécessiterait toutefois quelques ajustements découlant des tests réalisés.

La création d'un tel protocole simplifié permet d'améliorer l'accessibilité du programme Lichens GO à un plus grand nombre, dont les scolaires et les novices, ainsi que de les amener à réaliser ultérieurement le protocole complet. Cette initiative doit s'accompagner d'une adaptation de la plateforme afin de pouvoir y faire co-exister les protocoles simplifié et complet. Elle pourrait également comprendre des ressources complémentaires (vidéos introductives, tests préparatoires, *etc*.) afin de permettre aux participants de se former davantage et de prendre plus de recul par rapport aux autres taxa que ceux sélectionnés dans le protocole simplifié. Si nécessaire, il pourrait également être envisagé de diminuer encore le nombre de taxa afin de réduire le temps de réalisation, ce qui est possible sans compromettre davantage la qualité des données. Cependant, à l'inverse, il pourrait également être envisagé d'ajouter *Candelariella* sp. afin d'augmenter la représentativité des lichens crustacés ainsi que *Candelaria concolor* afin d'éviter la confusion des deux. Enfin, il pourrait être intéressant de procéder à l'évaluation d'autres indices de pollution tels que des indices par polluant prenant en compte à la fois espèces sensibles et espèces résistantes afin d'évaluer si une meilleure cohérence est observée entre jeux de données et, dès lors, si une comparaison avec les relevés issus du protocole complet est possible.

8. Références

AFNOR. (2014). *Air ambiant—Biosurveillance à l'aide de lichens—Évaluation de la diversité de lichens épiphytes* (Norme NF EN 16413). Association Française de Normalisation (AFNOR).

Agathokleous, E., Feng, Z., Oksanen, E., Sicard, P., Wang, Q., Saitanis, C. J., Araminiene, V., Blande, J. D., Hayes, F., Calatayud, V., Domingos, M., Veresoglou, S. D., Peñuelas, J., Wardle, D. A., De Marco, A., Li, Z., Harmens, H., Yuan, X., Vitale, M., & Paoletti, E. (2020). Ozone affects plant, insect, and soil microbial communities: A threat to terrestrial ecosystems and biodiversity. *Science Advances*, *6*(33), eabc1176. https://doi.org/10.1126/sciadv.abc1176

Ahmadjian, V. (1993). *The Lichen Symbiosis*. John Wiley & Sons.

Ahmadjian, V. (1995). Lichens are more important than you think. *BioScience*, *45*(3), 124. https://doi.org/10.1093/bioscience/45.3.124

Aivelo, T. (2024). How Do Age and Attitudes Affect the Quality of Data Collected by Young Citizen Scientists in an Ecological Research Project? *Ecology and Evolution*, *14*(10), e70428. https://doi.org/10.1002/ece3.70428

Asingizwe, D., Poortvliet, P. M., Koenraadt, C. J. M., Vliet, A. J. H. van, Ingabire, C. M., Mutesa, L., & Leeuwis, C. (2020). Why (not) participate in citizen science? Motivational factors and barriers to participate in a citizen science program for malaria control in Rwanda. *PLOS ONE*, *15*(8), e0237396. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237396

Asta, J., Erhardt, W., Ferretti, M., Fornasier, F., Kirschbaum, U., Nimis, P. L., Purvis, O. W., Pirintsos, S., Scheidegger, C., Van Haluwyn, C., & Wirth, V. (2002). Mapping Lichen Diversity as an Indicator of Environmental Quality. In P. L. Nimis, C. Scheidegger, & P. A. Wolseley (Eds.), *Monitoring with Lichens—Monitoring Lichens* (pp. 273–279). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-010-0423-7_19

Auerbach, J., Barthelmess, E. L., Cavalier, D., Cooper, C. B., Fenyk, H., Haklay, M., Hulbert, J. M., Kyba, C. C. M., Larson, L. R., Lewandowski, E., & Shanley, L. (2019). The problem with delineating narrow criteria for citizen science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *116*(31), 15336–15337. https://doi.org/10.1073/pnas.1909278116

August, T., Harvey, M., Lightfoot, P., Kilbey, D., Papadopoulos, T., & Jepson, P. (2015). Emerging technologies for biological recording. *Biological Journal of the Linnean Society*, *115*(3), 731–749. https://doi.org/10.1111/bij.12534

Barkman, J. J. (1958). *Phytosociology and Ecology of Cryptogamic Epiphytes: Including a Taxonomic Survey and Description of Their Vegetation Units in Europe*. Van Gorcum. https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1365197

Barkman, J. J., Doing, H., & Segal, S. (1964). Kritische Bemerkungen Und Vorschläge Zur Quantitativen Vegetationsanalyse. *Acta Botanica Neerlandica*, *13*(3), 394–419. https://doi.org/10.1111/j.1438-8677.1964.tb00164.x

Bates, J. W., Bell, J. N. B., & Massara, A. C. (2001). Loss of Lecanora conizaeoides and other fluctuations of epiphytes on oak in S.E. England over 21 years with declining SO2 concentrations. *Atmospheric Environment*, *35*(14), 2557–2568. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00402-7

Batterton, K. A., & Hale, K. N. (2017). The Likert Scale What It Is and How To Use It. *Phalanx*, *50*(2), 32–39.

Behrens, J., & Colombelli-Négrel, D. (2024). Can inclusion of different levels of participation effort improve volunteer diversity and retainment in a citizen science project? *Transactions of the Royal Society of South Australia*, *148*(2), 207–219. https://doi.org/10.1080/03721426.2024.2376779

Bergamaschi, L., Rizzio, E., Giaveri, G., Loppi, S., & Gallorini, M. (2007). Comparison between the accumulation capacity of four lichen species transplanted to a urban site. *Environmental Pollution*, *148*(2), 468–476. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.12.003

Bethlehem, J. (2008). *How accurate are self-selection web surveys?*

biogeoscience.be. (n.d.). *Structure d'un lichen en coupe transversale.* [Graphic]. Retrieved January 6, 2026, from https://www.biogeoscience.eu/enseignement/lichenologie.htm

Blanchet, F. G., Cazelles, K., & Gravel, D. (2020). Co-occurrence is not evidence of ecological interactions. *Ecology Letters*, *23*(7), 1050–1063. https://doi.org/10.1111/ele.13525

Bonney, R., Ballard, H., Jordan, R., McCallie, E., Phillips, T., Shirk, J., & Wilderman, C. (2009). *Public Participation in Scientific Research: Defining the Field and Assessing Its Potential for Informal* (p. 58). Center for Advancement of Informal Science Education (CAISE). https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED519688.pdf

Bonney, R., Cooper, C. B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K. V., & Shirk, J. (2009). Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience*, *59*(11), 977–984. https://doi.org/10.1525/bio.2009.59.11.9

Bonney, R., Shirk, J. L., Phillips, T. B., Wiggins, A., Ballard, H. L., Miller-Rushing, A. J., & Parrish, J. K. (2014). Citizen science. Next steps for citizen science. *Science*, *343*(6178), 1436–1437. https://doi.org/10.1126/science.1251554

Braun-Blanquet, J. (1928). *Pflanzensoziologie*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02056-2

Bray, J. R., & Curtis, J. T. (1957). An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin. *Ecological Monographs*, *27*(4), 325–349. https://doi.org/10.2307/1942268

Büdel, B., & Scheidegger, C. (2008). Thallus morphology and anatomy. In *Lichen Biology* (pp. 40–68). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511790478.005

Cheng, N., Li, Y., Sun, F., Chen, C., Wang, B., Li, Q., Wei, P., & Cheng, B. (2018). Ground-Level NO2 in Urban Beijing: Trends, Distribution, and Effects of Emission Reduction Measures. *Aerosol and Air Quality Research*, *18*(2), 343–356. https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.02.0092

Chmura, D., & Salachna, A. (2016). The Errors in Visual Estimation of Plants Cover in the Context of Education of Phytosociology. *Chemistry-Didactics-Ecology-Metrology*, *21*. https://doi.org/10.1515/cdem-2016-0006

Cole, S., & Gray, E. (2015, December 14). *New NASA Satellite Maps Show Human Fingerprint on Global Air Quality—NASA*. https://www.nasa.gov/news-release/new-nasa-satellite-maps-show-human-fingerprint-on-global-air-quality/

Conseil de l'Union européenne. (2024, October 14). *Qualité de l'air: Le Conseil donne son feu vert définitif pour renforcer les normes dans l'UE*.

https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2024/10/14/air-quality-council-gives-final-green-light-to-strengthen-standards-in-the-eu/?utm_source=chatgpt.com

Counoy, H., Turcati, L., Lorrillière, R., Bénateau, S., Maalouf, J.-P., Agnello, G., Turpin, S., & Agnan, Y. (2023). Performance evaluation and applicability of Lichens GO, a citizen science-based protocol for urban air quality monitoring. *Ecological Indicators*, *150*, 110269. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110269

Crall, A. W., Newman, G. J., Stohlgren, T. J., Holfelder, K. A., Graham, J., & Waller, D. M. (2011). Assessing citizen science data quality: An invasive species case study. *Conservation Letters*, *4*(6), 433–442. https://doi.org/10.1111/j.1755-263X.2011.00196.x

Cristofolini, F., Brunialti, G., Giordani, P., Nascimbene, J., Cristofori, A., Gottardini, E., Frati, L., Matos, P., Batič, F., Caporale, S., Fornasier, M. F., Marmor, L., Merinero, S., Nuñez Zapata, J., Tõrra, T., Wolseley, P., & Ferretti, M. (2014). Towards the adoption of an international standard for biomonitoring with lichens—Consistency of assessment performed by experts from six European countries. *Ecological Indicators*, *45*, 63–67. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.03.027

Depledge, M. H., & Fossi, M. C. (1994). The role of biomarkers in environmental assessment (2). Invertebrates. *Ecotoxicology*, *3*(3), 161–172. https://doi.org/10.1007/BF00117081

Derwent, R. G., & Hjellbrekke, A.-G. (2013). Air Pollution by Ozone Across Europe. In M. Viana (Ed.), *Urban Air Quality in Europe* (pp. 55–73). Springer. https://doi.org/10.1007/698_2012_163

Dewan, S., Bamola, S., & Lakhani, A. (2024). Addressing ozone pollution to promote United Nations sustainable development goal 2: Ensuring global food security. *Chemosphere*, *347*, 140693. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140693

Dickinson, J., Zuckerberg, B., & Bonter, D. (2010). Citizen Science as an Ecological Research Tool: Challenges and Benefits. *Annual Review of Ecology and Systematics*, *41*, 149–172. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144636

Eitzel, M. V., Cappadonna, J. L., Santos-Lang, C., Duerr, R. E., Virapongse, A., West, S. E., Kyba, C. C. M., Bowser, A., Cooper, C. B., Sforzi, A., Metcalfe, A. N., Harris, E. S., Thiel, M., Haklay, M., Ponciano, L., Roche, J., Ceccaroni, L., Shilling, F. M., Dörler, D., … Jiang, Q. (2017). Citizen Science Terminology Matters: Exploring Key Terms. *Citizen Science: Theory and Practice*, *2*(1). https://doi.org/10.5334/cstp.96

Emberson, L. (2020). Effects of ozone on agriculture, forests and grasslands. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *378*(2183), 20190327. https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0327

Erickson, L. E., & Brase, G. (2020). *Reducing Greenhouse Gas Emissions and Improving Air Quality: Two Interrelated Global Challenges*. Taylor & Francis. https://library.oapen.org/bitstream/handle/20.500.12657/50588/9781351116572.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Erickson, L. E., Griswold, W., Maghirang, R. G., & Urbaszewski, B. P. (2017). Air Quality, Health and Community Action. *Journal of Environmental Protection*, *8*(10), 1057–1074. https://doi.org/10.4236/jep.2017.810067

European environment agency. (2018). *Air quality in Europe, 2018 report*. European

environment agency.

European environment agency. (2019, January 9). *European Air Quality Index*. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/maps-and-charts/index

European environment agency. (2025). *Air quality status report 2025* [Web rapport]. https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-status-report-2025

Farr, C. M., Ngo, F., & Olsen, B. (2023). Evaluating Data Quality and Changes in Species Identification in a Citizen Science Bird Monitoring Project. *Citizen Science: Theory and Practice*, *8*(1). https://doi.org/10.5334/cstp.604

Fédération Wallonie-Bruxelles. (2011). *Combien de temps nos élèves passent-ils à l'école? Coup d'œil sur les chiffres disponibles à l'échelle européenne.* Enseignement.be. http://www.enseignement.be/index.php?page=27203&id=626

Field, C. B., Barros, V. R., & Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.). (2014). *Climate change 2014: Impacts, adaptation, and vulnerability: Working Group II contribution to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.

Fioletov, V., Griffin, D., McLinden, C. A., Zhao, X., Nowlan, C., & Abad, G. G. (2025). Diurnal Variations in Background and Urban NO2 Estimated From TEMPO. *Geophysical Research Letters*, *52*(21), e2025GL117360. https://doi.org/10.1029/2025GL117360

Follett, R., & Strezov, V. (2015). An Analysis of Citizen Science Based Research: Usage and Publication Patterns. *PLOS ONE*, *10*(11), e0143687. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143687

Franzoni, C., & Sauermann, H. (2014). Crowd science: The organization of scientific research in open collaborative projects. *Research Policy*, *43*(1), 1–20. https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.07.005

Garrec, J.-P., & Haluwyn, C. (2002). *Biosurveillance végétale de la qualité de l'air* (TEC&DOC). https://www.researchgate.net/publication/285712497_Biosurveillance_vegetale_de_la_qualite_de_l%27air

Giordani, P. (2007). Is the diversity of epiphytic lichens a reliable indicator of air pollution? A case study from Italy. *Environmental Pollution, Lichens in a Changing Pollution Environment*, *146*(2), 317–323. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2006.03.030

Giordani, P., Brunialti, G., & Alleteo, D. (2002). Effects of atmospheric pollution on lichen biodiversity (LB) in a Mediterranean region (Liguria, northwest Italy). *Environmental Pollution*, *118*(1), 53–64. https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00275-5

Giordani, P., Brunialti, G., Benesperi, R., Rizzi, G., Frati, L., & Modenesi, P. (2009). Rapid biodiversity assessment in lichen diversity surveys: Implications for quality assurance. *Journal of Environmental Monitoring*, *11*(4), 730. https://doi.org/10.1039/b818173j

Giordani, P., Modenesi, P., & Tretiach, M. (2003). Determinant factors for the formation of the calcium oxalate minerals, weddellite and whewellite, on the surface of foliose lichens. *The Lichenologist*, *35*(3), 255–270. https://doi.org/10.1016/S0024-2829(03)00028-8

Gombert, S., Asta, J., & Seaward, M. R. D. (2004). Assessment of lichen diversity by index of atmospheric purity (IAP), index of human impact (IHI) and other environmental factors in an urban area (Grenoble, southeast France). *Science of The Total Environment*, *324*(1), 183–199.

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2003.10.036

Gonnet, O. (n.d.). *Xanthoparmelia tinctina* [Graphic]. Retrieved https://www.afl-lichenologie.fr/Photos_AFL/Photos_AFL_X/Xanthoparmelia_tinctina.htm

Gotelli, N. J., & McCabe, D. J. (2002). Species co-occurrence: A meta-analysis of J. M. Diamond's assembly rules model. *Ecology*, *83*(8), 2091–2096. https://doi.org/10.1890/0012-9658(2002)083[2091:SCOAMA]2.0.CO;2

Guarino, R., Attorre, F., & Willner, W. (2017). *Spatio-temporal variations in the application of the Braun-Blanquet approach in Europe The Braun-Blanquet approach*. https://doi.org/10.1127/PHYTO/2017/0181

Hale, M. E. (1977). *The biology of lichens* (2. ed., repr). Arnold.

Haleigh. (2023). *Dark brown underside with black rhizines poking out. Soredia present too!* [Graphic]. https://wideeyedoutside.com/blog/f/hammered-shield-lichen-%7C-1-of-3-lichens

Han, H., Zhang, L., Liu, Z., Yue, X., Shu, L., Wang, X., & Zhang, Y. (2023). Narrowing Differences in Urban and Nonurban Surface Ozone in the Northern Hemisphere Over 1990–2020. *Environmental Science & Technology Letters*, *10*(5), 410–417. https://doi.org/10.1021/acs.estlett.3c00105

Hanoteaux, S. (2017). *Les Sciences Participatives Collaboration entre citoyens et scientifiques*. Roland Perceval. https://ligue-enseignement.be/sites/default/files/2022-07/Sciences-Participatives-web.pdf

Hawksworth, D. L., & James, P. W. (1974). The Lichens. Edited by Vernon Ahmadjian and Mason E. Hale. Academic Press Inc., New York and London Pp. Xiv + 697, figures 296, tables 62. 25 March 1974 [Dated '1973']. Price £16·20, US $35·00. *The Lichenologist*, *6*(2), 200–202. https://doi.org/10.1017/S0024282974000302

Hecker, S., Wicke, N., Haklay, M., & Bonn, A. (2019). How Does Policy Conceptualise Citizen Science? A Qualitative Content Analysis of International Policy Documents. *Citizen Science: Theory and Practice*, *4*(1). https://doi.org/10.5334/cstp.230

Heiđmarsson, S., & Heidmarsson, S. (1996). Pruina as a Taxonomic Character in the Lichen Genus Dermatocarpon. *The Bryologist*, *99*(3), 315. https://doi.org/10.2307/3244302

Hoesly, R., Smith, S. J., Prime, N., Ahsan, H., Suchyta, H., O'Rourke, P., Crippa, M., Klimont, Z., Guizzardi, D., Behrendt, J., Feng, L., Harkins, C., McDonald, B., Mott, A., McDuffie, A., Nicholson, M., & Wang, S. (2024). *Community Emissions Data System* (Version v_2024_07_08) [Dataset]. Zenodo. https://doi.org/10.5281/ZENODO.12803197

IHME. (2024). *Global Burden of Disease (GBD)*. https://www.healthdata.org/research-analysis/gbd

Ionel, I. C. (2009). *Air pollution level in urban region of Bucharest and in rural region*. https://www.academia.edu/31417891/Air_pollution_level_in_urban_region_of_Bucharest_and_in_rural_region

Irceline. (2025, January 16). *Qualité de l'air: Bilan provisoire 2024* [Actualité]. Irceline. https://www.irceline.be/fr/nouvelles/qualite-de-l2019air-bilan-provisoire-2024

Ishikawa, C., & Vasconcelos, V. (2021). Lichen Assessment for Biomonitoring the Environmental Impact of the Distance from a Road on an Atlantic Forest Fragment in Barueri,

São Paulo State, Brazil. *Ensino Saude e Ambiente*, *14*, 49–80. https://doi.org/10.22409/resa2021.v14i1.a40281

Jiguet, F. (2009). Method learning caused a first-time observer effect in a newly started breeding bird survey. *Bird Study*, *56*(2), 253–258. https://doi.org/10.1080/00063650902791991

Jiménez, E., Tapiador, F. J., & Sáez-Martínez, F. J. (2015). Atmospheric pollutants in a changing environment: Key issues in reactivity and monitoring, global warming, and health. *Environmental Science and Pollution Research*, *22*(7), 4789–4792. https://doi.org/10.1007/s11356-014-3850-3

Kamette, F. (2011, September 5). *Les rythmes scolaires dans l'Union européenne*. https://www.robert-schuman.eu/questions-d-europe/0212-les-rythmes-scolaires-dans-l-union-europeenne

Kelling, S., Johnston, A., Hochachka, W. M., Iliff, M., Fink, D., Gerbracht, J., Lagoze, C., La Sorte, F. A., Moore, T., Wiggins, A., Wong, W.-K., Wood, C., & Yu, J. (2015). Can Observation Skills of Citizen Scientists Be Estimated Using Species Accumulation Curves? *PLoS ONE*, *10*(10), e0139600. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0139600

Kendall, W. L., Peterjohn, B. G., & Sauer, J. R. (1996). First-Time Observer Effects in the North American Breeding Bird Survey. *The Auk*, *113*(4), 823–829. https://doi.org/10.2307/4088860

Kirschbaum, U., & Wirth, V. (with Association française de lichénologie). (1997). *Les lichens bio-indicateurs: Les reconnaître, évaluer la qualité de l'air*. E. Ulmer.

Knippenberg, D., De Dreu, C., & Homan, A. (2004). Work Group Diversity and Group Performance: An Integrative Model and Research Agenda. *Journal of Applied Psychology*, *89*, 1008–1022. https://doi.org/10.1037/0021-9010.89.6.1008

Kosmala, M., Wiggins, A., Swanson, A., & Simmons, B. (2016). Assessing data quality in citizen science. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *14*(10), 551–560. https://doi.org/10.1002/fee.1436

Land-Zandstra, A., Agnello, G., & Gültekin, Y. S. (2021). Participants in Citizen Science. In K. Vohland, A. Land-Zandstra, L. Ceccaroni, R. Lemmens, J. Perelló, M. Ponti, R. Samson, & K. Wagenknecht (Eds.), *The Science of Citizen Science* (pp. 243–259). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58278-4_13

Land-Zandstra, A. M., Devilee, J. L. A., Snik, F., Buurmeijer, F., & van den Broek, J. M. (2016). Citizen science on a smartphone: Participants' motivations and learning. *Public Understanding of Science*, *25*(1), 45–60. https://doi.org/10.1177/0963662515602406

Lawrence, M. G., Butler, T. M., Steinkamp, J., Gurjar, B. R., & Lelieveld, J. (2007). Regional pollution potentials of megacities and other major population centers. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *7*(14), 3969–3987. https://doi.org/10.5194/acp-7-3969-2007

Lebbaz, B. Y., Ghennam, K., Attou, F., & Messaoudi, A. (2025). Lichen Biomonitoring of Air Quality Using API, AQI, HII and Environmental Impact in Djelfa, a Semi-Arid Region. *Environment and Ecology Research*, *13*(4), 484–498. https://doi.org/10.13189/eer.2025.130403

Lewandowski, E., Caldwell, W., Elmquist, D., & Oberhauser, K. (2017). Public Perceptions of Citizen Science. *Citizen Science: Theory and Practice*, *2*(1). https://doi.org/10.5334/cstp.77

Lewandowski, E., & Specht, H. (2015). Influence of volunteer and project characteristics on data quality of biological surveys. *Conservation Biology*, *29*(3), 713–723. https://doi.org/10.1111/cobi.12481

Lichens GO. (2025). *RÉSULTATS 2025*. https://www.lichensgo.eu/Files/Other/infographie%202025.pdf

Likert, R. (1932). A Technique for the Measurement of Attitudes. In *A Technique for the Measurement of Attitudes.* (pp. 1–55).

Lindsey, J. (n.d.). *Parmelia sulcata from Commanster, Belgium* [Graphic]. Retrieved https://en.wikipedia.org/wiki/Parmelia_sulcata#/media/File:Parmelia_sulcata_-_Lindsey.jpg

Loppi, S., Pirintsos, S. Arg., & De Dominicis, V. (1997). Analysis of the Distribution of Epiphytic Lichens on Quercus Pubescens Along an Altitudinal Gradient in a Mediterranean Area (tuscany, Central Italy). *Israel Journal of Plant Sciences*, *45*(1), 53–58. https://doi.org/10.1080/07929978.1997.10676670

Lowe, S. K., Mason, B. M., Guralnick, R., Morales, N. A., & Callaghan, C. T. (2025). Participation Intensity Influences Motivations for Contributing to iNaturalist. *Citizen Science: Theory and Practice*, *10*(1). https://doi.org/10.5334/cstp.823

Lücking, R., & Leavitt, S. (2016). The 2016 classification of lichenized fungi in the Ascomycota and Basidiomycota – Approaching one thousand genera. *The Bryologist*, *119*, 361–416. https://doi.org/10.1639/0007-2745-119.4.361

Lumbsch, H. T. (1998). Taxonomic Use of Metabolic Data in Lichen-Forming Fungi. In *Chemical Fungal Taxonomy*. CRC Press.

Lüsse, M., Brockhage, F., Beeken, M., & Pietzner, V. (2022). Citizen science and its potential for science education. *International Journal of Science Education*, *44*(7), 1120–1142. https://doi.org/10.1080/09500693.2022.2067365

MacPhail, V. J., & Colla, S. R. (2020). Power of the people: A review of citizen science programs for conservation. *Biological Conservation*, *249*, 108739. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108739

Maghirang, R. G. (2019). Urban Air Quality. In *Reducing Greenhouse Gas Emissions and Improving Air Quality*. CRC Press.

Markert, B. A., Breure, A. M., & Zechmeister, H. G. (2003). Definitions,strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment. In *Bioindicators and Biomonitors* (Vol. 6). Elsevier. https://shop.elsevier.com/books/bioindicators-and-biomonitors/markert/978-0-08-044177-1

Marks, L., Laird, Y., Trevena, H., Smith, B., & Rowbotham, S. (2022). A Scoping Review of Citizen Science Approaches in Chronic Disease Prevention. *Frontiers in Public Health*, *10*. https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.743348

Marques, D., Silva, J., & Machado, R. (2024). Citizen Science: Exploring the underlying dimensions of citizen engagement and value co-creation through the lens of marketing. *Biological Conservation*, *296*, 110711. https://doi.org/10.1016/j.biocon.2024.110711

Martellos, S., Andreatta, S., Contardo, T., & Loppi, S. (2024). *Lichens and air quality: A new citizen science approach*. BGR. https://doi.org/10.3897/ap.e126131

Masters, K., Oh, E. Y., Cox, J., Simmons, B., Lintott, C., Graham, G., Greenhill, A., & Holmes, K. (2016). Science learning via participation in online citizen science. *Journal of Science Communication*, *15*(03), A07. https://doi.org/10.22323/2.15030207

Matthews, R. A., Buikema, A. L., Cairns, J., & Rodgers, J. H. (1982). Biological monitoring: Part IIA—receiving system functional methods, relationships and indices. *Water Research*, *16*(2), 129–139. https://doi.org/10.1016/0043-1354(82)90102-6

McCune, B., & Yang, S. (2024). *Lichen Colors*. Common Macrolichens of the Pacific Northwest. https://lichens.twinferntech.net/pnw/colors.shtml

McMullin, R. T., & Allen, J. L. (2021). An assessment of data accuracy and best practice recommendations for observations of lichens and other taxonomically difficult taxa on iNaturalist. *Botany*, *100*(6), 491–497. https://doi.org/10.1139/cjb-2021-0160

Merilhou-Goudard, J.-B., Andro, M., Charbonnel, F., Cointet, J.-P., Frey-Klett, P., Joly, P.-B., Leiser, H., & Mambrini-Doudet, M. (2016). *Les Sciences participatives en France: État des lieux, bonnes pratiques & recommandations*. https://www.open-sciences-participatives.org/uploads/img/resources/5b194eb844fd7_rapport-impression-sciences-participatives-fevrier-2016-web.pdf

Mifune, M.-F. (2020). *Médiation scientifique & Sciences participatives Comment définir et caractériser la fonction de médiateur·rice dans les programmes de sciences participatives ?* [Mémoire, Conservatoire national des arts et métiersConservatoire national des arts et métiers]. https://www.universcience.fr/fileadmin/fileadmin_Universcience/fichiers/ReMediS/Documents/Mediation_scienceparticipative_MFMifune.pdf

Munzi, S., Correia, O., Silva, P., Lopes, N., Freitas, C., Branquinho, C., & Pinho, P. (2014). Lichens as ecological indicators in urban areas: Beyond the effects of pollutants. *Journal of Applied Ecology*, *51*(6), 1750–1757. https://doi.org/10.1111/1365-2664.12304

Newman, G., Crall, A., Laituri, M., Graham, J., Stohlgren, T., Moore, J. C., Kodrich, K., & Holfelder, K. A. (2010). Teaching Citizen Science Skills Online: Implications for Invasive Species Training Programs. *Applied Environmental Education & Communication*, *9*(4), 276–286. https://doi.org/10.1080/1533015X.2010.530896

Newman, G., Wiggins, A., Crall, A., Graham, E., Newman, S., & Crowston, K. (2012). The future of citizen science: Emerging technologies and shifting paradigms. *Frontiers in Ecology and the Environment*, *10*(6), 298–304. https://doi.org/10.1890/110294

Nimis, P., Scheidegger, C., & Wolseley, P. (2002). *Monitoring with Lichens–Monitoring Lichens* (Vol. 105). https://doi.org/10.1639/0007-2745(2002)105[0501:]2.0.CO;2

Nimis, P., & Stefano, M. (2002). ITALIC - The information system on Italian lichens. *Bibliotheca Lichenologica*, *82*, 271–283.

OCDE. (2019). *Manuel pour l'évaluation de l'impact sur la concurrence: Manuel pratique. Version 4.0 (Volume 3)*. OECD. https://doi.org/10.1787/7eda92f1-fr

Ochsner, F. (1927). *Studien über die Epiphyten-Vegetation der Schweiz*. ETH Zürich. https://doi.org/10.3929/ethz-a-000098732

OECD (Ed.). (2016). *The Economic Consequences of Outdoor Air Pollution*. OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/9789264257474-en

Ohio Plants. (n.d.). *Isidia are small surface outgrowths of the upper surface of a lichen which break off to form new lichens.* [Graphic]. Retrieved https://ohioplants.org/lichen-biology/

Our World in Data. (2021). *Deaths from outdoor air pollution*. Our World in Data. https://ourworldindata.org/grapher/absolute-number-of-deaths-from-outdoor-air-pollution?tab=line&country=High+Income+%28WB%29~Low+Income+%28WB%29~Middle+Income+%28WB%29~Lower+Middle+Income+%28WB%29~OWID_EUR~OWID_AFR~OWID_OCE~OWID_NAM~OWID_SAM~OWID_ASI~OWID_WRL

Our World in Data. (2024). *Change in emissions of air pollutants, European Union (27), 1990 to 2022*. Our World in Data. https://ourworldindata.org/grapher/change-air-pollutant-emissions?country=~OWID_EU27

Our World in Data & World health organisation. (2025). *Exposure to particulate matter air pollution* [Graphic]. https://ourworldindata.org/grapher/pm25-air-pollution?tab=map&country=IND~CHN~GBR~KEN&time=2019

Perron, S. (2025). Les sciences participatives à l'École: Un levier pour renouveler l'éducation scientifique et écologique. *Annales de l'Institut Universitaire de Formation Pour l'Enseignement*, (1). https://doi.org/10.5077/journals/aiufe.2025.e2262

Phillips, T., Ferguson, M., Minarchek, M., Porticella, N., & Bonney, R. (2014). *User's Guide for Evaluating Learning Outcomes from Citizen Science*.

Pimm, S. L., Jenkins, C. N., Abell, R., Brooks, T. M., Gittleman, J. L., Joppa, L. N., Raven, P. H., Roberts, C. M., & Sexton, J. O. (2014). The biodiversity of species and their rates of extinction, distribution, and protection. *Science*, *344*(6187), 1246752. https://doi.org/10.1126/science.1246752

Pinho, P., Dias, T., Cruz, C., Sim Tang, Y., Sutton, M. A., Martins-Loução, M.-A., Máguas, C., & Branquinho, C. (2011). Using lichen functional diversity to assess the effects of atmospheric ammonia in Mediterranean woodlands. *Journal of Applied Ecology*, *48*(5), 1107–1116. https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02033.x

Ramade, F. (1993). *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*. Ediscience.

Ravindiran, G., Rajamanickam, S., Kanagarathinam, K., Hayder, G., Janardhan, G., Arunkumar, P., Arunachalam, S., AlObaid, A. A., Warad, I., & Muniasamy, S. K. (2023). Impact of air pollutants on climate change and prediction of air quality index using machine learning models. *Environmental Research*, *239*, 117354. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117354

Règlement (UE) 2016/679 (RGPD), Pub. L. 2016/679 (2016). https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2016/679/oj

Richardson, D. H. (1992). *Pollution monitoring with lichens*. Pelagic Publishing.

Ritchie, H., & Roser, M. (2022). Outdoor Air Pollution. *Our World in Data*. https://ourworldindata.org/outdoor-air-pollution

Rola, K., Osyczka, P., & Kafel, A. (2016). Different Heavy Metal Accumulation Strategies of Epilithic Lichens Colonising Artificial Post-Smelting Wastes. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, *70*(2), 418–428. https://doi.org/10.1007/s00244-015-0180-5

Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of

cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, *20*, 53–65. https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7

Roy, H. E., Pocock, M. J. O., Prestion, C. D., Roy, D. B., Savage, J., Tweddle, J. C., & Robinson, L. D. (2012). *Understanding Citizen Science and Environmental Monitoring*. Natural History Museum, NERC Centre for Ecology & Hydrology. https://www.ceh.ac.uk/sites/default/files/citizensciencereview.pdf

Rydzak, J. (1968). *Lichens as indicators of the ecological conditions of the habitat* (pp. 131–134). https://www.bc.umcs.pl/dlibra/publication/33001/edition/29902?language=en

Sachin, M. B., Mahalakshmi, S. N., & Prashith, T. R. (2018). *Insecticidal efficacy of lichens and their metabolites-A mini review* [Graphic].

Sauermann, H., & Franzoni, C. (2015). Crowd science user contribution patterns and their implications. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *112*(3), 679–684. https://doi.org/10.1073/pnas.1408907112

Scivil. (2019). *Communication in Citizen Science A practical guide to communication and engagement in citizen science*. https://www.scivil.be/sites/default/files/paragraph/files/2020-01/Scivil%20Communication%20Guide.pdf

Sharnoff, S. (n.d.). *Pruina, Physconia detersa* [Graphic].

Shirk, J., Ballard, H., Wilderman, C., Phillips, T., Wiggins, A., Jordan, R., McCallie, E., Minarchek, M., Lewenstein, B., Krasny, M., & Bonney, R. (2012). Public Participation in Scientific Research: A Framework for Deliberate Design. *Ecology and Society*, *17*(2). https://doi.org/10.5751/ES-04705-170229

Sicard, P., Agathokleous, E., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2021). Urban population exposure to air pollution in Europe over the last decades. *Environmental Sciences Europe*, *33*(1), 28. https://doi.org/10.1186/s12302-020-00450-2

Sicard, P., Augustaitis, A., Belyazid, S., Calfapietra, C., de Marco, A., Fenn, M., Bytnerowicz, A., Grulke, N., He, S., Matyssek, R., Serengil, Y., Wieser, G., & Paoletti, E. (2016). Global topics and novel approaches in the study of air pollution, climate change and forest ecosystems. *Environmental Pollution*, *213*, 977–987. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.075

SPW. (2024, December 11). *Ozone dans l'air ambiant (santé)—État de l'environnement wallon*. Etat de l'environnement wallon. https://etat.environnement.wallonie.be/contents/indicatorsheets/AIR 8.html

Stolte, K., Mangis, D., Doty, R., & Tonnessen, K. (1993). *Lichens as bioindicators of air quality* (Gen. Tech. RM-224; p. 131). CO: US Department of agriculture. Forest service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station. https://www.fs.usda.gov/rm/pubs_rm/rm_gtr224.pdf

Swanson, A., Kosmala, M., Lintott, C., & Packer, C. (2016). A generalized approach for producing, quantifying, and validating citizen science data from wildlife images. *Conservation Biology: The Journal of the Society for Conservation Biology*, *30*(3), 520–531. https://doi.org/10.1111/cobi.12695

Targa, J., Colina, M., Banyuls, L., González Ortiz, A., & Soares, J. (2025). *Status report of air quality in Europe for year 2024, using validated and up-to-date data. ETC HE Report 2025/1.*

Zenodo. https://doi.org/10.5281/ZENODO.15168515

Tregidgo, D. J., West, S. E., & Ashmore, M. R. (2013). Can citizen science produce good science? Testing the OPAL Air Survey methodology, using lichens as indicators of nitrogenous pollution. *Environmental Pollution*, *182*, 448–451. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.03.034

Truong, C., Naciri, Y., & Clerc, P. (2009). Multivariate analysis of anatomical characters confirms the differentiation of two morphologically close species, *Melanohalea olivacea* (L.) O. Blanco *et al.* and *M. septentrionalis* (Lynge) O. Blanco *et al* . *The Lichenologist*, *41*(6), 649–661. https://doi.org/10.1017/S0024282909990260

Tversky, A., & Kahneman, D. (1974). Judgment under Uncertainty: Heuristics and Biases. *Science*, *185*(4157), 1124–1131. https://doi.org/10.1126/science.185.4157.1124

Tweddle, J. C., Robinson, L. D., Pocock, M. J. O., & Roy, H. E. (2012). *Guide to citizen science: Developing, implementing and evaluating citizen science to study biodiversity and the environment in the UK*. Natural History Museum and NERC Centre for Ecology & Hydrology for UK-EOF.
https://www.ceh.ac.uk/sites/default/files/citizenscienceguide.pdf?utm_source=chatgpt.com

Van Brussel, S., & Huyse, H. (2019). Citizen science on speed? Realising the triple objective of scientific rigour, policy influence and deep citizen engagement in a large-scale citizen science project on ambient air quality in Antwerp. *Journal of Environmental Planning and Management*, *62*(3), 534–551. https://doi.org/10.1080/09640568.2018.1428183

Van de Mortel, T. (2008). Faking it: Social desirability response bias in self-report research. *Thea van de Mortel*, *25*.

Van Haluwyn, C. (2010). *La sociologie des lichens corticoles en Europe* (Bulletin Associatif / Essai de Synthèse 35). AFL. https://afl-lichenologie.fr/telecharger/Bull_AFL_old/Bull_2010/AFL_2010_2_Lichenosociologie_Chantal_VanHaluwyn.pdf

Van Haluwyn, C., & Lerond, M. (1993). Guide des lichens. *Guide Des Lichens*. https://agris.fao.org/search/en/providers/122535/records/65ddfa4c0f3e94b9e5c89d66

van Herk, C. M. (2001). Bark pH and susceptibility to toxic air pollutants as independent causes of changes in epiphytic lichen composition in space and time. *The Lichenologist*, *33*(5), 419–441. https://doi.org/10.1006/lich.2001.0337

Vecina Jiménez, M. L., Chacón Fuertes, F., & Sueiro Abad, M. J. (2010). Differences and similarities among volunteers who drop out during the first year and volunteers who continue after eight years. *The Spanish Journal of Psychology*, *13*(1), 343–352. https://doi.org/10.1017/s1138741600003905

Vicente-Saez, R., & Martinez-Fuentes, C. (2018). Open Science now: A systematic literature review for an integrated definition. *Journal of Business Research*, *88*, 428–436. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.12.043

Watson, D., & Floridi, L. (2018). Crowdsourced science: Sociotechnical epistemology in the e-research paradigm. *Synthese*, *195*(2), 741–764. https://doi.org/10.1007/s11229-016-1238-2

Weeks, J. M. (1995). The value of biomarkers for ecological risk assessment: Academic toys or legislative tools? *Applied Soil Ecology*, *2*(4), 215–216. https://doi.org/10.1016/0929-1393(95)00072-2

Wiggins, A., & Crowston, K. (2011). From Conservation to Crowdsourcing: A Typology of Citizen Science. *2011 44th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1–10. https://doi.org/10.1109/HICSS.2011.207

Will-Wolf, S., Jovan, S., Neitlich, P., Peck, J. E., & Rosentreter, R. (2015). Lichen-based indices to quantify responses to climate and air pollution across northeastern U.S.A. *The Bryologist. 118(1): 59-82. 25 p.*, *118*, 59–82. https://doi.org/10.1639/0007-2745-118.1.059

World health organisation. (2019). *Healthy environments for healthier populations: Why do they matter, and what can we do?* https://www.who.int/publications/i/item/WHO-CED-PHE-DO-19.01

World health organisation. (2021). *WHO Global Air Quality Guidelines: Particulate Matter (PM2. 5 and PM10), Ozone, Nitrogen Dioxide, Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide* (1st ed). World Health Organization.

World health organisation. (2024, July 3). *Compendium of WHO and other UN guidance in health and environment, 2024 update*. https://www.who.int/publications/i/item/9789240095380

9. Annexes

ANNEXE A : Enquête : difficultés et facilités rencontrées dans Lichens GO

Le détail complet de l'enquête envoyée aux participants est repris ci-dessous. Les questions obligatoires sont indiquées à l'aide du symbole « * », les QRU à l'aide du symbole « • » et les QRM à l'aide du symbole « ◦ ». Les champs de réponses ouvertes sont également explicités tout comme les redirections.

Retour d'expérience sur la participation au programme Lichens GO

Ce questionnaire a pour but de recueillir vos retours, que vous ayez déjà participé ou non au programme Lichens GO, afin d'évaluer votre perception du dispositif ainsi que les éventuelles facilités ou difficultés identifiées. Grâce à vos réponses, nous allons pouvoir imaginer une nouvelle version simplifiée du protocole en complément de la version actuelle, afin de mieux répondre aux besoins de certains secteurs. En y consacrant environ 10 minutes, vous contribuerez à améliorer l'accessibilité du programme à un plus grand nombre.

Les données collectées serviront uniquement à évaluer les aspects simplifiables du protocole. En répondant à ce questionnaire, vous acceptez que vos réponses soient utilisées dans le cadre d'un travail de fin d'études. Le questionnaire se déroule de manière anonyme sauf dans le cas où vous renseigneriez votre adresse de contact à la fin du questionnaire dans le but d'être recontacté·e pour tester le protocole simplifié.

Lorsque vous soumettez ce formulaire, il ne collecte pas automatiquement vos détails, tels que le nom et l'adresse e-mail, sauf si vous le fournissez vous-même.

1. Comment avez-vous connu le programme Lichens GO ?
    - Par le biais PartiCitaE
    - Par le biais de Vigie Nature
    - Par le biais de Tela Botanica
    - Par le biais de Sciences.be (Scienceinfuse [UCLouvain], Inforsciences [ULB], Réjouisciences [ULiège], Confluent des savoirs [UNamur])
    - Par le biais de l'association française de lichénologie (AFL)
    - Bouche à oreille
    - Autre : (champ libre)
2. Avez-vous déjà participé à une activité Lichens GO ou en avez-vous déjà organisé une ? *
    - Oui, j'ai déjà participé ou organisé (→ section 2)

- Non, je n'ai jamais participé ou organisé (→ section 1)

Section 1 : Questions à destination des personnes n'ayant jamais participé à Lichens GO

3. Pourquoi n'avez-vous jamais participé à Lichens GO ?
    - Je n'ai pas eu le temps
    - Je n'en ai pas eu l'envie ou pas d'intérêt particulier
    - Je n'ai pas compris comment cela fonctionnait
    - Je n'ai pas réussi à identifier les différentes espèces
    - Je n'ai pas trouvé d'autres personnes pour le faire avec moi
    - J'ai fait des observations mais je n'ai pas pris le temps de les saisir sur la plateforme
    - J'ai fait des observations mais je n'ai pas réussi à les saisir sur la plateforme
    - Autre : (champ libre)
4. Pouvez-vous préciser plus en détails les raisons qui vous ont amené·e à ne plus participer à Lichens GO ? (OUVERT) (→ section 10)

Section 2 : Historique de votre participation à Lichens GO

5. Au total, combien de fois avez-vous réalisé des relevés Lichens GO ?
    - 1 fois
    - De 2 à 5 fois
    - De 6 à 10 fois
    - De 11 à 20 fois
    - Plus de 20 fois
6. En quelle année avez-vous participé à Lichens GO pour la première fois ?
    - 2017
    - 2018
    - 2019
    - 2020
    - 2021
    - 2022
    - 2023
    - 2024

- 2025
- 2026

7. En quelle année avez-vous participé à Lichens GO pour la dernière fois ?
    - 2017
    - 2018
    - 2019
    - 2020
    - 2021
    - 2022
    - 2023
    - 2024
    - 2025
    - 2026

(→ section 3)

Section 3 : Rapport aux sciences participatives

8. A quel niveau évaluez-vous votre sensibilité face aux sujets suivants ?

	Pas du tout sensible	Pas sensible	Ni sensible ni pas sensible	Sensible	Très sensible	Pas d'avis sur la question
La nature	○	○	○	○	○	○
Les lichens	○	○	○	○	○	○
La qualité de l'air	○	○	○	○	○	○
Les sciences participatives	○	○	○	○	○	○

9. A quel niveau évaluez-vous vos connaissances sur les sujets suivants ?

	Très faibles	Faibles	Moyennes	Élevées	Très élevées	Pas d'avis sur la question
La nature	○	○	○	○	○	○
Les lichens	○	○	○	○	○	○
La qualité de l'air	○	○	○	○	○	○
Les sciences participatives	○	○	○	○	○	○

10. A quelle fréquence participez-vous à des activités d'observation ou d'étude de la nature (faune, flore, *etc*.) ?
    - 1 fois ou plus par semaine
    - 1 fois ou plus par mois
    - Quelques fois par an
    - 1 fois par an ou moins
    - Jamais
11. Dans quel cadre avez-vous principalement participé à Lichens GO ?
    - Enseignement (primaire, secondaire et supérieur) (→ section 4)
    - Associations/Éducation à l'environnement (→ section 5)
    - Cadre personnel (→ section 6)
    - Autre (→ section 7)

Section 4 : Questions à destination du secteur de l'enseignement (primaire, secondaire et supérieur)

12. Dans quelle(s) classe(s) l'activité a-t-elle été menée ? (OUVERT)
13. Quelle était la moyenne d'âge des élèves participant aux activités Lichens GO ? (OUVERT)
14. Combien d'élèves en moyenne ont participé par séance ? (OUVERT)
15. Les élèves ont-ils travaillé en sous-groupes ? Si oui, combien par groupe en moyenne et pour quelles missions ? (Précisez si c'était par arbre.) (OUVERT)
16. D'un point de vue organisationnel, pourriez-vous décrire le mode opératoire suivi et les dispositifs pédagogiques utilisés ? (OUVERT)
17. Dans quel(s) cadre(s) l'activité Lichens GO est-elle introduite dans vos cours ?
    - Qualité de l'air
    - Environnement
    - Biodiversité ou éducation à la nature
    - Sciences participatives
    - Impacts de l'humain
    - Collecte de données
    - Autre (champ libre)
18. Comment Lichens GO permet-il d'illustrer ou d'enrichir vos cours ? (OUVERT)

(→ section 8)

Section 5 : Questions à destination des secteurs associatifs et de l'éducation à l'environnement

19. Quel est le nom de la structure avec laquelle vous avez pratiqué Lichens GO ? (OUVERT)
20. Quelle était la moyenne d'âge des participants aux activités Lichens GO ? (OUVERT)
21. Combien de personnes en moyenne ont participé par séance ? (OUVERT)
22. Les participants ont-ils travaillé en sous-groupes ? Si oui, combien par groupe en moyenne et pour quelles missions ? (Précisez si c'était par arbre.) (OUVERT)
23. D'un point de vue organisationnel, pourriez-vous décrire le mode opératoire suivi et les dispositifs pédagogiques utilisés ? (OUVERT)
24. Dans quel(s) cadre(s) l'activité Lichens GO est-elle introduite par cette structure ?
    - Qualité de l'air
    - Environnement
    - Biodiversité ou éducation à la nature
    - Sciences participatives
    - Impacts de l'humain
    - Collecte de données
    - Autre (champ libre)
25. Comment Lichens GO permet-il d'illustrer ou d'enrichir les activités de cette structure ? (OUVERT)

(→ section 8)

Section 6 : Questions à destination des personnes participant à Lichens GO dans un cadre personnel

26. En général, participez-vous à Lichens GO seul·e ou accompagné·e ? Si accompagné·e, de combien de personnes ? (OUVERT)
27. Si l'activité a été réalisée en groupe : Quelle était la moyenne d'âge des participants à vos activités Lichens GO ? (OUVERT)
28. Si l'activité a été réalisée en groupe : Les participants ont-ils travaillé en sous-groupes ? Si oui, combien par groupe en moyenne et pour quelles missions ? (Précisez si c'était par arbre.) (OUVERT)
29. D'un point de vue organisationnel, pourriez-vous décrire le mode opératoire et les dispositifs pédagogiques éventuels ? (OUVERT)
30. Dans quel(s) cadre(s) réalisez-vous l'activité Lichens GO ?
    - Qualité de l'air

- Environnement
- Biodiversité ou éducation à la nature
- Sciences participatives
- Impacts de l'humain
- Collecte de données
- Autre (champ libre)

31. Quelles sont vos motivations pour participer à / organiser vous-même une activité Lichens GO ? (OUVERT)

(→ section 8)

Section 7 : Questions à destination des personnes participant à Lichens GO dans un autre cadre

32. Dans quel cadre avez-vous participé à Lichens GO ? (OUVERT)
33. Combien de personnes en moyenne ont participé par séance ? (OUVERT)
34. Si l'activité a été réalisée en groupe : Quelle était la moyenne d'âge des participants aux activités Lichens GO ? (OUVERT)
35. Si l'activité à été réalisée en groupe : Les participants ont-ils travaillé en sous-groupes ? Si oui, combien par groupe en moyenne et pour quelles missions ? (Précisez si c'était par arbre.) (OUVERT)
36. D'un point de vue organisationnel, pourriez-vous décrire le mode opératoire et les dispositifs pédagogiques éventuels ? (OUVERT)
37. Dans quel(s) cadre(s) l'activité Lichens GO est-elle introduite ?
    - Qualité de l'air
    - Environnement
    - Biodiversité ou éducation à la nature
    - Sciences participatives
    - Impacts de l'humain
    - Collecte de données
    - Autre (champ libre)

(→ section 8)

Section 8 : Organisation d'une activité Lichens GO complète

Cette section a pour but d'évaluer plus en détails la dynamique temporelle dans laquelle vous pratiquez le programme Lichens GO.

Dans cette section seront différenciées les différentes phases du programme : la phase de préparation (sélection du site, obtention du matériel, déplacements, définition du but, consignes, explications théoriques…), la phase de terrain (mise en place du matériel et réalisation des observations), la phase de saisie/encodage des données sur la plateforme et la phase d'analyse des données (si vous prenez le temps d'examiner et d'interpréter vos résultats, visualiser les résultats sur la plateforme).

38. Combien de temps allouez-vous en moyenne à chacune de ces phases du projet ?

	Moins de 15 min	15 – 30 min	1 – 2 h	2 – 3 h	Plus de 3 h	Je ne réalise pas cette phase
Phase de préparation	○	○	○	○	○	○
Phase de terrain	○	○	○	○	○	○
Phase de saisie/encodage des données	○	○	○	○	○	○
Phase d'analyse des données	○	○	○	○	○	○

39. Divisez-vous généralement le protocole complet (préparations, terrain, saisie/encodage des données, analyse des données) en plusieurs jours ?
    - Non, je réalise le protocole en un seul jour
    - Oui, sur deux jours
    - Oui, sur trois jours
    - Oui, sur plus de trois jours
40. Divisez-vous généralement la phase de terrain (observations) en plusieurs jours ?
    - Non, je réalise mes observations en un seul jour
    - Oui, sur deux jours
    - Oui, sur trois jours
    - Oui, sur plus de trois jours

(→ section 9)

Section 9 : Facilités et difficultés du protocole actuel

Cette section vise à identifier les facilités et difficultés que vous avez pu rencontrer lors de l'utilisation du protocole Lichens GO sous sa forme actuelle.

Dans cette section seront différenciées les différentes phases du programme : la phase de préparation (sélection du site, obtention du matériel, déplacements, définition du but,

consignes, explications théoriques…), la phase de terrain (mise en place du matériel et réalisation des observations), la phase de saisie/encodage des données sur la plateforme et la phase d'analyse des données (si vous prenez le temps d'examiner et d'interpréter vos résultats, visualiser les résultats sur la plateforme).

41. Selon votre expérience, à quel point avez-vous rencontré des difficultés dans la phase de préparation ?

	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Ni d'accord ni pas d'accord	D'accord	Totalement d'accord	Pas concerné·e
D'un point de vue général, j'ai rencontré des difficultés dans la phase de préparation.	○	○	○	○	○	○
Il n'y a pas assez d'informations théoriques disponibles pour bien comprendre le sujet.	○	○	○	○	○	○
Il est difficile de trouver un site répondant aux critères (3 arbres, distance < 50 m entre les arbres, circonférence > 50 cm…).	○	○	○	○	○	○
Le matériel est difficilement disponible.	○	○	○	○	○	○

42. Selon votre expérience, à quel point avez-vous rencontrer des difficultés dans la phase de terrain (observations) ?

	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Ni d'accord ni pas d'accord	D'accord	Totalement d'accord	Pas concerné·e
D'un point de vue général, j'ai rencontré des difficultés dans la phase de terrain.	○	○	○	○	○	○
La durée du protocole est trop longue.	○	○	○	○	○	○
Le lexique présent en début de livret n'est pas suffisamment clair.	○	○	○	○	○	○
Il y a trop d'espèce de lichens différentes.	○	○	○	○	○	○
La clé d'identification ne permet pas d'arriver facilement à un résultat fiable.	○	○	○	○	○	○
La matériel est difficile à utiliser seul.	○	○	○	○	○	○

Le matériel est difficile à utiliser en groupe.	○	○	○	○	○	○
La fiche de terrain n'est pas facile à comprendre et/ou à utiliser.	○	○	○	○	○	○
Le protocole n'est pas accessible à des non-initiés.	○	○	○	○	○	○
Réaliser l'activité en grands groupes rend les observations difficiles.	○	○	○	○	○	○

43. Selon votre expérience, à quel point avez-vous rencontrer des difficultés dans la phase de saisie/encodage des données ?

	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Ni d'accord ni pas d'accord	D'accord	Totalement d'accord	Pas concerné·e
D'un point de vue général, j'ai rencontré des difficultés dans la phase de saisie/encodage des données.	○	○	○	○	○	○
La plateforme de saisie/encodage des données n'est pas facile à trouver.	○	○	○	○	○	○
La plateforme de saisie/encodage des données n'est pas facile à comprendre et/ou à utiliser.	○	○	○	○	○	○

44. Selon votre expérience, à quel point avez-vous rencontré des difficultés dans la phase d'analyse des données ?

	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Ni d'accord ni pas d'accord	D'accord	Totalement d'accord	Pas concerné·e
D'un point de vue général, j'ai rencontré des difficultés dans la phase d'analyse des données.	○	○	○	○	○	○
La plateforme de visualisation n'est pas facile à comprendre et/ou à utiliser.	○	○	○	○	○	○
Il est difficile d'interpréter les résultats obtenus.	○	○	○	○	○	○
Il n'y a pas assez d'outils/d'informations disponibles pour	○	○	○	○	○	○

l'interprétation des résultats.						

45. En termes d'identification des espèces, tenant compte des informations fournies dans le livret de terrain, à quel point êtes-vous à l'aise dans l'observation de ces différents éléments ?

	Pas du tout à l'aise	Pas à l'aise	Ni à l'aise ni pas à l'aise	A l'aise	Totalement à l'aise	Je ne vois pas ce dont il s'agit
Différence entre les lichens crustacés, foliacés ou fruticuleux	○	○	○	○	○	○
Différence entre les différents lichens bruns	○	○	○	○	○	○
Les lirelles (structures en virgules)	○	○	○	○	○	○
Les apothécies (organe reproductif en forme de coupelle ou de boules colorées)	○	○	○	○	○	○
Les lobes et leurs caractéristiques	○	○	○	○	○	○
La pruine (couche de dépôts blanchâtres en face supérieure du thalle)	○	○	○	○	○	○
Les soralies (organes de reproduction asexuée prenant un aspect granuleux)	○	○	○	○	○	○
Les isidies (organes de reproduction asexuée prenant la forme de petits boutons ou de cylindres)	○	○	○	○	○	○
Les cils (filaments en bord de thalle)	○	○	○	○	○	○
Les pseudocyphelles (réseau de lignes blanches sur la face supérieure du lichen)	○	○	○	○	○	○
Les rhizines (petits filaments insérés sur la face intérieure du lichen)	○	○	○	○	○	○

46. Avez-vous été confronté à d'autres difficultés particulières ? Si oui, lesquelles et dans quelles mesures ? (OUVERT)

47. Si vous n'avez pas rencontré de difficulté particulière, identifiez-vous des aspects sur lesquels d'autres personnes pourraient avoir rencontré des difficultés ? (OUVERT)

48. Avez-vous des propositions de modifications qui pourraient améliorer votre expérience ? (OUVERT)

(→ section 10)

Section 10 : Renseignements généraux et contact

La version simplifiée du protocole sera testée dans le courant du printemps 2026. Si vous êtes intéressé de tester cette nouvelle version du protocole et d'en donner un feedback, vous pouvez laisser une adresse mail de contact ci-dessous. Attention, fournir une adresse mail de contact désanonymise vos réponses.

49. Quel est votre pays de résidence ?*
    - France
    - Belgique
    - Autre : (champ libre)
50. Quel âge avez-vous ?*
    - < 20 ans
    - 20 – 39 ans
    - 40 – 59 ans
    - 60 – 79 ans
    - >= 80 ans
51. Souhaitez-vous être recontacté·e afin de tester une version simplifiée du protocole ? Si oui, veuillez indiquer votre adresse mail de contact : (OUVERT)
52. Avez-vous une remarque ou un dernier commentaire à ajouter concernant cette enquête ? (OUVERT)

ANNEXE B : Fiche taxa (« Fiches espèces ») adaptée aux simplifications proposées

LICHENS GO

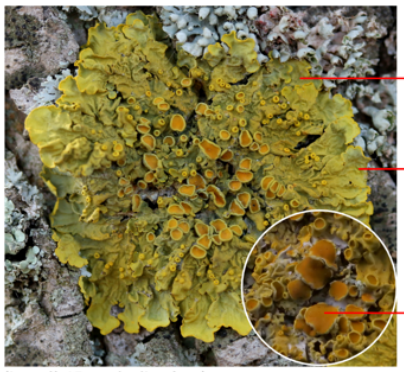
FICHES ESPECES
(protocole simplifié : scénarios 1 & 2)

Lecanora sp. — crustacé



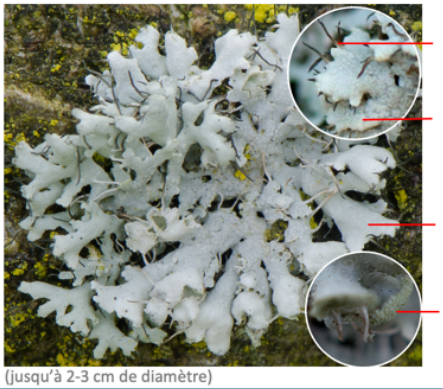
(jusqu'à 12 cm de diamètre)

Xanthoria parietina — foliacé



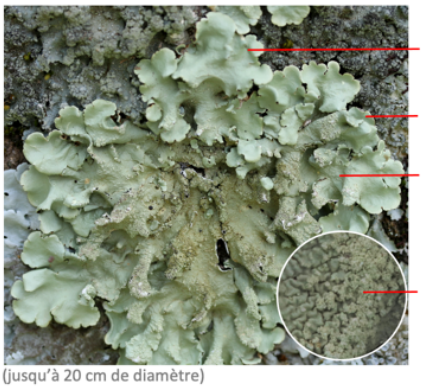
(jusqu'à 15 cm de diamètre)

Physcia ascendens / P. tenella — foliacé



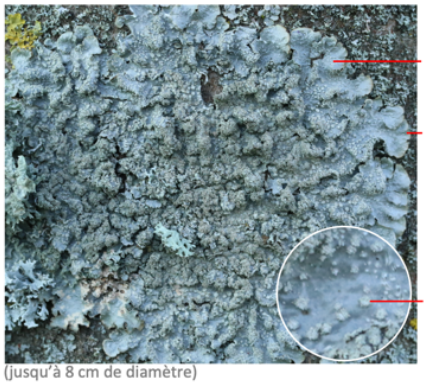
(jusqu'à 2-3 cm de diamètre)

Flavoparmelia caperata / F. soredians — foliacé



(jusqu'à 20 cm de diamètre)

Punctelia sp. — foliacé



(jusqu'à 8 cm de diamètre)

Parmelia sulcata — foliacé



(jusqu'à 15 cm de diamètre)

© Photographies : Hugo Counoy

www.lichensgo.eu

1

LICHENS GO

Physconia grisea — foliacé



- Lobes étroits
- Thalle gris-brunâtre verdissant à l'eau
- Soralies granuleuses plus sombres
- Pruine (poudre blanche)

(jusqu'à 8 cm de diamètre)

Hypogymnia physodes / H. tubulosa — foliacé



- Lobes allongés à aspect gonflé
- Thalle gris clair
- Soralies verdâtres aux extrémités des lobes

(jusqu'à 10 cm de diamètre)

Evernia prunastri — fruticuleux



- Thalle verdâtre-grisâtre
- Branches à lanières ramifiées, pendantes
- Face inférieure plus claire
- Soralies sur la face supérieure

(jusqu'à 10 cm de long et 5 mm de large)

Ramalina farinacea — fruticuleux



- Thalle de la même couleur sur les deux faces
- Branches à lanières étroites et ramifiées, pendantes
- Soralies ellipsoïdes marginales

(jusqu'à 10 cm de long et 3 mm de large)

© Photographies : Hugo Counoy

LEXIQUE DES TERMES DE LA CLÉ DE DÉTERMINATION



LE THALLE

Corps du lichen (terme utilisé pour les organismes qui n'ont ni feuille, ni tige, ni racine).



LES SORALIES

Organes de reproduction asexuée prenant un aspect granuleux (amas de poudre).



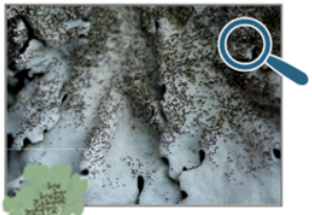
LES RHIZINES

Petits filaments insérés sur la face inférieure de certains lichens foliacés permettant la fixation au support.



LE LOBE

Division au bord du thalle, ayant l'aspect d'une petite feuille.



LES ISIDIES

Organes de reproduction asexuée prenant la forme de petits boutons ou de cylindres.



LES CILS

Filaments insérés généralement sur le bord du thalle.



LES PSEUDOCYPHELLES

Petites veines blanches sur la face supérieure du lichen donnant un aspect gaufré.



LES APOTHÉCIES

Organes de reproduction sexuée formant de petites coupelles ou des boules colorées.



LA PRUINE

Couche poudreuse à aspect de givre recouvrant le thalle.

© Lichens GO : https://www.lichensgo.eu/Files/Other/livret_lichensgo.pdf

LES 3 GRANDS TYPES DE LICHENS

L'observation de la morphologie du thalle permet de regrouper les lichens dans trois grandes catégories décrites ci-dessous.



Amandinea punctata



Parmelina sulcata



Evernia prunastri



Lecanora sp.



Xanthoria parietina



Usnea sp.

LICHENS CRUSTACÉS

En forme de croûte ou de tache poudreuse. Très bien fixés au tronc sur toute la surface du lichen. On ne peut pas les détacher sans arracher l'écorce.

LICHENS FOLIACÉS

Composés de lobes, ressemblant à de petites feuilles. Fixés au tronc par presque toute la surface du thalle sauf au bord où les lobes sont décollés. Peuvent être facilement détachés avec l'ongle.

LICHENS FRUTICULEUX

En forme de lanières ou de buissons. Fixés au tronc par une toute petite partie. Se détachent du tronc très facilement.

> Attention, une même espèce de lichen peut avoir une apparence différente selon son stade de développement. Pour identifier les lichens plus facilement, essayez de repérer des spécimens bien développés. La présence d'individus juvéniles (peu développés) ou nécrosés (en fin de vie) peut également être notée sur la fiche de terrain. Les trois images ci-dessous illustrent différents stades de vie de l'espèce *Xanthoria parietina*.



Juvénile → Adulte → Nécrosé

© Lichens GO : https://www.lichensgo.eu/Files/Other/livret_lichensgo.pdf

ANNEXE C : Fiches de relevés de terrain adaptées aux simplifications proposées

LICHENS GO

FICHE DE TERRAIN

(protocole simplifié **scénario 1**)

Observateur **Date** **Météo**

Localisation

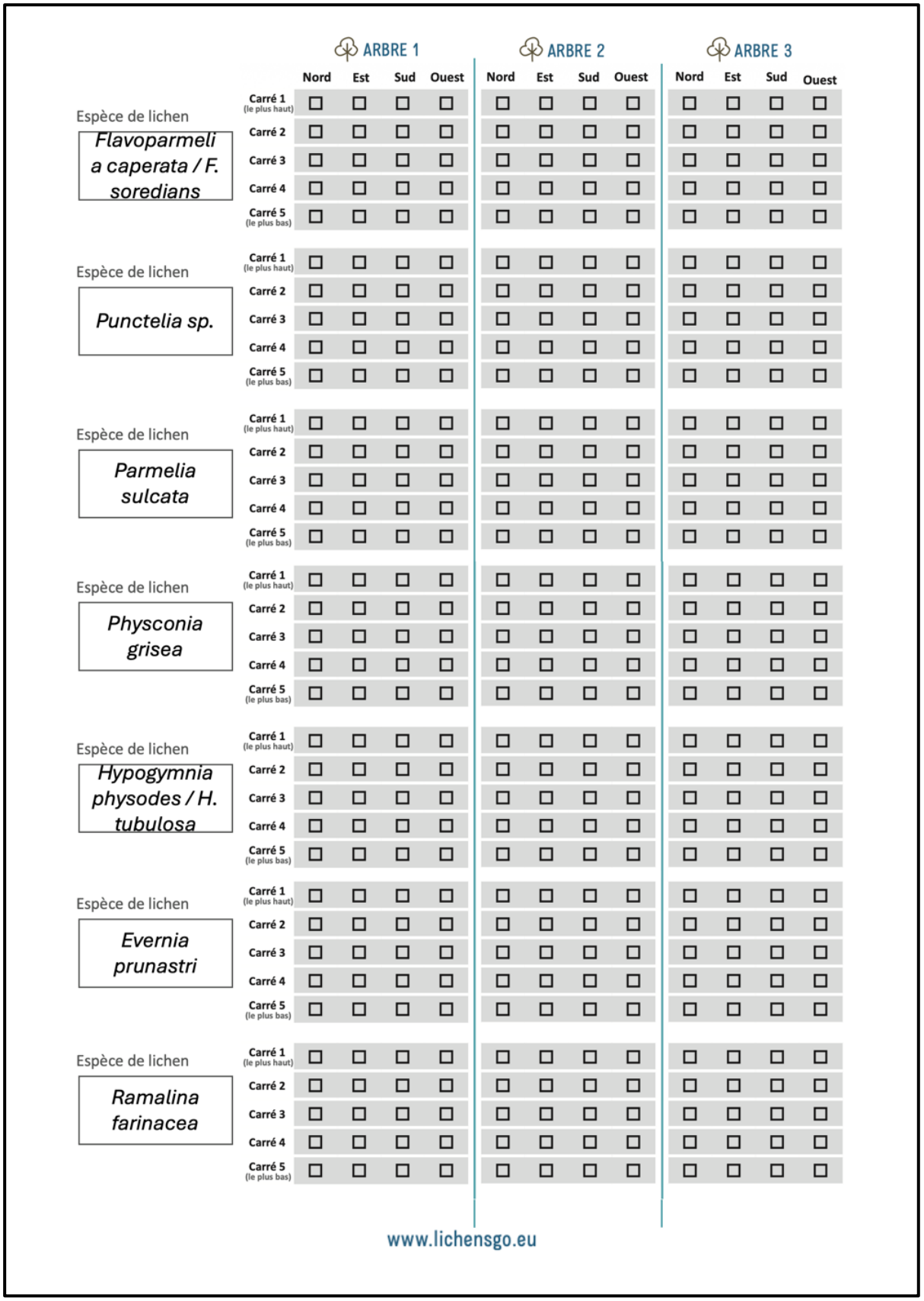
Type d'environnement

- ☐ axe routier à faible circulation
- ☐ axe routier à forte circulation
- ☐ parking
- ☐ zone piétonne
- ☐ parc
- ☐ jardin privé
- ☐ cimetière
- ☐ prairie
- ☐ en bordure d'un champ
- ☐ en bordure d'une forêt

	ARBRE 1				ARBRE 2				ARBRE 3			
Espèce de l'arbre												
Circonférence du tronc à 1 m 30 du sol												
Certaines faces sont-elles ombragées en permanence (bâtiment/arbre) ?	Nord ☐	Est ☐	Sud ☐	Ouest ☐	Nord ☐	Est ☐	Sud ☐	Ouest ☐	Nord ☐	Est ☐	Sud ☐	Ouest ☐
Présence de lichens juvéniles (peu développés) ?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Présence de lichens nécrosés (fin de vie) ?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Présence de mousses ?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Espèce de lichen		Nord	Est	Sud	Ouest	Nord	Est	Sud	Ouest	Nord	Est	Sud	Ouest
Lecanora sp.	Carré 1 (le plus haut)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 5 (le plus bas)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Xanthoria parietina	Carré 1 (le plus haut)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 5 (le plus bas)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Physcia adscendens / P. tenella	Carré 1 (le plus haut)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
	Carré 5 (le plus bas)	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

www.lichensgo.eu


ARBRE 1
ARBRE 2
ARBRE 3
Nord Est Sud Ouest
Carré 1 (le plus haut)
Carré 2
Carré 3
Carré 4
Carré 5 (le plus bas)
Espèce de lichen
Flavoparmelia caperata / F. soredians
Espèce de lichen
Punctelia sp.
Espèce de lichen
Parmelia sulcata
Espèce de lichen
Physconia grisea
Espèce de lichen
Hypogymnia physodes / H. tubulosa
Espèce de lichen
Evernia prunastri
Espèce de lichen
Ramalina farinacea
www.lichensgo.eu

LICHENS GO — FICHE DE TERRAIN

(protocole simplifié **scénario 2**)

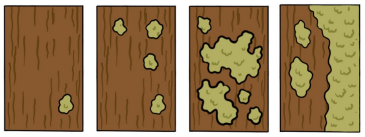
Observateur _____ **Date** _____ **Météo**

Localisation _____

Type d'environnement

- ☐ axe routier à faible circulation
- ☐ axe routier à forte circulation
- ☐ parking
- ☐ zone piétonne
- ☐ parc
- ☐ jardin privé
- ☐ cimetière
- ☐ prairie
- ☐ en bordure d'un champ
- ☐ en bordure d'une forêt

Echelle de recouvrement :



Très peu présente (< 1 %) | Peu présente (1 – 10 %) | Moyennement présente (1 - 50 %) | Très présente (> 50 %)

	ARBRE 1	ARBRE 2	ARBRE 3
Espèce de l'arbre			
Circonférence du tronc à 1 m 30 du sol			

	ARBRE 1 Oui	ARBRE 1 Non	ARBRE 2 Oui	ARBRE 2 Non	ARBRE 3 Oui	ARBRE 3 Non
Certaines faces sont-elles ombragées en permanence (bâtiment/arbre) ?	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Présence de lichens juvéniles (peu développés) ?	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Présence de lichens nécrosés (fin de vie) ?	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Présence de mousses ?	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Espèce de lichen	ARBRE 1	ARBRE 2	ARBRE 3
Lecanora sp.	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐
Xanthoria parietina	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐
Physcia adscendens / P. tenella	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐	Absente ☐ / Très peu présente ☐ / Peu présente ☐ / Moyennement présente ☐ / Très présente ☐

	ARBRE 1	ARBRE 2	ARBRE 3
Espèce de lichen *Flavoparmelia caperata / F. soredians*	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐
Espèce de lichen *Punctelia sp.*	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐
Espèce de lichen *Parmelia sulcata*	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐
Espèce de lichen *Physconia grisea*	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐
Espèce de lichen *Hypogymnia physodes / H. tubulosa*	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐
Espèce de lichen *Evernia prunastri*	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐
Espèce de lichen *Ramalina farinacea*	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐	Absente ☐ Très peu présente ☐ Peu présente ☐ Moyennement présente ☐ Très présente ☐

ANNEXE D : Fiches explicatives des scénarios de tests

EXPLICATIONS DÉTAILLÉES : SCÉNARIO 1

Ce document résume en détails le scénario de test numéro 1 ainsi que les différentes étapes attendues durant cette phase de test.

Rappel du Scénario 1 :

- 10 espèces à observer :
  - *Evernia prunastri*
  - *Flavoparmelia caperata/soredians*
  - *Hypogymnia physodes/tubulosa*
  - *Lecanora sp.*
  - *Parmelia sulcata*
  - *Physcia adscendens*
  - *Physconia grisea*
  - *Punctelia sp.*
  - *Ramalina farinacea*
  - *Xanthoria parietina*

  ➔ Fiche espèces disponible sur le drive, présentant les caractéristiques morphologiques de chaque espèce afin d'en faciliter l'identification sur le terrain.
- Méthode de quantification : utilisation de la grille conformément au protocole Lichens GO classique (voir point suivant)

Étapes sur le terrain :

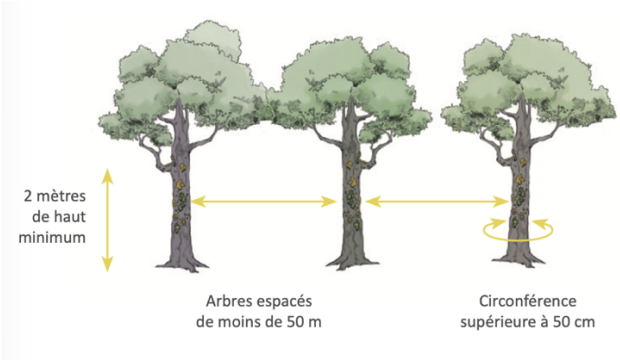
1. Choix du site :

Le site que vous étudierez doit comporter trois arbres :

- localisés dans un espace ouvert (ni forêt, ni bosquet) ;
- distants de moins de 50 m ;
- si possible de la même espèce.

2. Choix des arbres :

Vous devrez réaliser l'inventaire des lichens présents sur trois arbres.



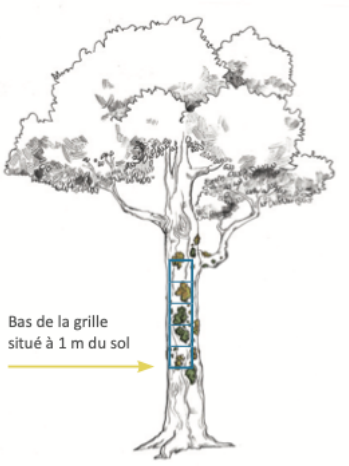
Ces arbres doivent être :

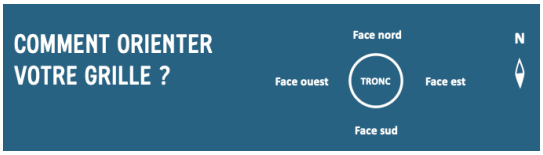
- bien droits (sans blessure ni déformation), de circonférence supérieure à 50 cm ;
- ni des résineux (pins, épicéas...) dont l'écorce est trop acide, ni des espèces dont l'écorce est régulièrement renouvelée (platanes, bouleaux...) ;
- peu ou pas recouverts de mousse ou de lierre ;
- avec les branches les plus basses à au moins 2 mètres de haut ;
- exposés de la même manière à la lumière (évitez par exemple qu'un des arbres soit à l'ombre d'un bâtiment si les autres sont au soleil).

3. Observations des lichens :

Complétez les informations demandées sur la fiche de terrain :

- coordonnées GPS (ex : 48.8434, 2.3370) ou adresse précise du site (aidez-vous de votre smartphone) ;
- conditions météorologiques lors du relevé ;
- type d'environnement (ex : zone piétonne, parc...) ;
- espèce et circonférence de chaque arbre.





Pour chaque arbre, repérez avec une boussole (ou votre smartphone) la face qui est exposée au nord (c'est-à-dire tournée vers le nord). Fixez ensuite verticalement la grille composée de 5

carrés (10 cm x 10 cm) sur le tronc avec des ficelles ou des sangles. Le bas de la grille doit être placé à un mètre du sol, soit deux fois la hauteur de la grille. Déterminez ensuite lesquelles des dix espèces de lichens sont présentes à l'aide de la fiche des dix espèces disponible sur le drive. Pour chaque espèce, indiquez, sur la fiche d'observation disponible sur le drive, le ou les carrés de la grille où elle est présente.

Faites de même pour les faces est, sud et ouest de l'arbre. Pensez à compléter au fur et à mesure la fiche de terrain.

Étapes postérieures aux observations :

1. Après avoir testé un ou deux des scénarios de changement, vous pouvez compléter le formulaire d'opinion suivant : Retour d'expérience sur les scénarios de simplification du protocole de Lichens GO – Remplir le formulaire



   Ce formulaire est anonyme et constitue le résultat principal de cette phase de test. Il permettra de déterminer si les changements proposés constituent bien une réponse aux difficultés des participants ou s'ils sont insuffisants, voire contre-productifs.

2. Vous pouvez m'envoyer par mail (à cette adresse : helena.snoeck@student.uclouvain.be) des photos ou un scan de vos fiches de terrain afin que je puisse observer l'impact des changements sur les résultats obtenus (par exemple le nombre d'espèces observées).

Calendrier :

Idéalement, dans le cadre de mon travail, j'aurais besoin de recevoir vos résultats avant le 17 mai, et au plus tard le 24 mai.

Je ne pourrai pas garantir l'analyse des informations reçues après cette date dans le cadre de mon travail. Cependant, si vous disposez d'informations après cette échéance, elles pourront tout de même être très intéressantes pour la suite du projet.

Si des questions persistent, n'hésitez pas à me contacter à l'adresse mail rappelée juste au-dessus afin que nous puissions en discuter.

EXPLICATIONS DÉTAILLÉES : SCÉNARIO 2

Ce document résume en détails le scénario de test numéro 2 ainsi que les différentes étapes attendues durant cette phase de test.

Rappel du Scénario 2 :

- 10 espèces à observer :
  - *Evernia prunastri*
  - *Flavoparmelia caperata/soredians*
  - *Hypogymnia physodes/tubulosa*
  - *Lecanora sp.*
  - *Parmelia sulcata*
  - *Physcia adscendens*
  - *Physconia grisea*
  - *Punctelia sp.*
  - *Ramalina farinacea*
  - *Xanthoria parietina*

  ➔ Fiche espèces disponible sur le drive, présentant les caractéristiques morphologiques de chaque espèce afin d'en faciliter l'identification sur le terrain.
- Méthode de quantification : utilisation d'une échelle de recouvrement par espèce et par arbre.

Étapes sur le terrain :

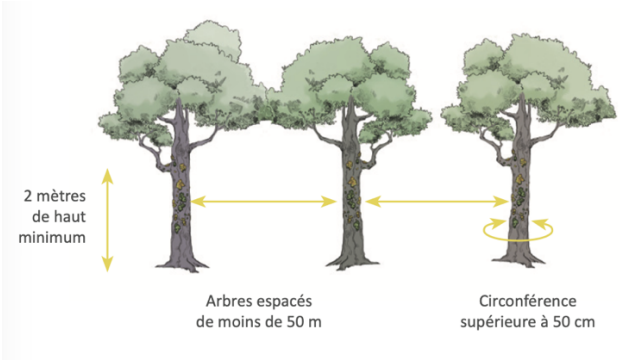
1. Choix du site :

Le site que vous étudierez doit comporter trois arbres :

- localisés dans un espace ouvert (ni forêt, ni bosquet) ;
- distants de moins de 50 m ;
- si possible de la même espèce.

2. Choix des arbres :

Vous devrez réaliser l'inventaire des lichens présents sur trois arbres.



Ces arbres doivent être :

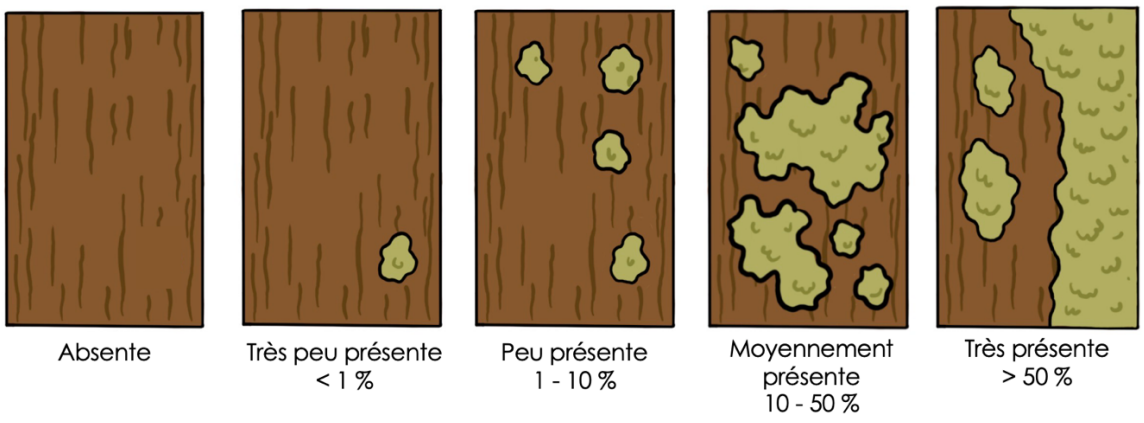
- bien droits (sans blessure ni déformation), de circonférence supérieure à 50 cm ;
- ni des résineux (pins, épicéas...) dont l'écorce est trop acide, ni des espèces dont l'écorce est régulièrement renouvelée (platanes, bouleaux...) ;
- peu ou pas recouverts de mousse ou de lierre ;
- avec les branches les plus basses à au moins 2 mètres de haut ;
- exposés de la même manière à la lumière (évitez par exemple qu'un des arbres soit à l'ombre d'un bâtiment si les autres sont au soleil).

3. Observations des lichens :

Complétez les informations demandées sur la fiche de terrain :

- coordonnées GPS (ex : 48.8434, 2.3370) ou adresse précise du site (aidez-vous de votre smartphone) ;
- conditions météorologiques lors du relevé ;
- type d'environnement (ex : zone piétonne, parc...) ;
- espèce et circonférence de chaque arbre.

Pour chaque arbre, observez la présence des dix espèces de lichens à l'aide de la fiche des espèces disponible sur le drive. Pour chacune de ces dix espèces, estimez son recouvrement sur l'ensemble du tronc entre 1 m et 1,5 m de hauteur, sur la base de l'échelle de recouvrement suivante :



Faites de même pour les autres arbres. Pensez à compléter au fur et à mesure la fiche de terrain.

Étapes postérieures aux observations :

1. Après avoir testé un ou deux des scénarios de changement, vous pouvez compléter le formulaire d'opinion suivant : Retour d'expérience sur les scénarios de simplification du protocole de Lichens GO – Remplir le formulaire



   Ce formulaire est anonyme et constitue le résultat principal de cette phase de test. Il permettra de déterminer si les changements proposés constituent bien une réponse aux difficultés des participants ou s'ils sont insuffisants, voire contre-productifs.

2. Vous pouvez m'envoyer par mail (à cette adresse : helena.snoeck@student.uclouvain.be) des photos ou un scan de vos fiches de terrain afin que je puisse observer l'impact des changements sur les résultats obtenus (par exemple le nombre d'espèces observées).

Calendrier :

Idéalement, dans le cadre de mon travail, j'aurais besoin de recevoir vos résultats avant le 17 mai, et au plus tard le 24 mai.

Je ne pourrai pas garantir l'analyse des informations reçues après cette date dans le cadre de mon travail. Cependant, si vous disposez d'informations après cette échéance, elles pourront tout de même être très intéressantes pour la suite du projet.

Si des questions persistent, n'hésitez pas à me contacter à l'adresse mail rappelée juste au-dessus afin que nous puissions en discuter.

ANNEXE E : Formulaire de retours sur les tests de scénarios du protocole simplifié

Le détail complet du formulaire de retours, mis à disposition des participants suite aux tests des scénarios de simplification, est disponible ci-dessous. Les questions obligatoires sont indiquées à l'aide du symbole « * », et les QRU à l'aide du symbole « • ». Les champs de réponses ouvertes sont également explicitées tout comme les redirections.

Retour d'expérience sur les scénarios de simplification du protocole de Lichens GO

Bonjour,

Ce formulaire a pour objectif de recueillir vos avis à la suite du test de deux scénarios de protocoles simplifiés de Lichens GO.

Pour rappel, ces scénarios étaient définis comme suit :

- *Scénario 1 : liste d'espèces restreinte (10 espèces) + utilisation d'une grille*
- *Scénario 2 : liste d'espèces restreinte (10 espèces) + utilisation de l'échelle de recouvrement du tronc par espèce (sans grille)*

Le formulaire est anonyme, et ne vous prendra que quelques minutes.

Lorsque vous soumettez ce formulaire, il ne collecte pas automatiquement vos détails, tels que le nom et l'adresse e-mail, sauf si vous le fournissez vous-même.

1. Combien de fois avez-vous pratiqué le protocole complet de Lichens GO (35 espèces + grille) ?
   - 0 fois
   - 1 fois
   - <= 5 fois
   - > 5 fois

(→ section 1)

Section 1 : Scénario 1

liste d'espèces restreinte (10 espèces) + utilisation d'une grille

2. Avez-vous testé le Scénario 1 ?*
   - Oui (→ section 2)
   - Non (→ section 3)

Section 2 : Scénario 1

liste d'espèces restreinte (10 espèces) + utilisation d'une grille

3. J'ai testé le Scénario 1 dans le cadre :
    - Scolaire
    - Non-scolaire
4. Pouvez-vous préciser le nombre de personnes ayant réalisé ce test, leur âge moyen, et si cela a été fait dans un contexte scolaire, la classe et l'option des élèves ou le club scolaire concerné ? (OUVERT)
5. Si vous deviez donner une note globale au Scénario 1, quelle serait-elle sur une échelle de 1 à 10 ?
6. Combien de temps avez-vous pris environ, pour la phase de terrain (observation des lichens), en suivant le Scénario 1 ? (OUVERT)
7. Quels sont, selon vous, les points positifs (s'il y en a) du Scénario 1 ? (OUVERT)
8. Quels sont, selon vous, les points négatifs (s'il y en a) du Scénario 1 ? (OUVERT)
9. Quelle a été l'impression des participants, des élèves, *etc*. ? (OUVERT)
10. Voyez-vous des éléments à améliorer dans le scénario 1 que vous avez testé ? Par exemple, des espèces à retirer ou à ajouter, ou encore des structures morphologiques qui restent difficiles à observer parmi les espèces sélectionnées, *etc*. (OUVERT)
11. Souhaitez-vous ajouter un commentaire concernant ce scénario, un avis général, une recommandation ou une comparaison avec le protocole complet (35 espèces + grille) ? (OUVERT)

(→ section 3)

Section 3 : **Scénario 2**

liste d'espèces restreinte (10 espèces) + utilisation de l'échelle de recouvrement du tronc par espèce (sans grille)

12. Avez-vous testé le Scénario 2 ?*
    - Oui (→ section 4)
    - Non (→ FIN)

Section 4 : **Scénario 2**

liste d'espèces restreinte (10 espèces) + utilisation de l'échelle de recouvrement du tronc par espèce (sans grille)

13. Si vous avez également testé le Scénario 1, dans quel ordre avez-vous testé les scénarios ?
    - 1 puis 2
    - 2 puis 1

- Autre : (champ libre)

14. Si vous avez testé les deux scénarios, était-ce avec les mêmes groupes et sur les mêmes arbres ?
    - Mêmes groupes et mêmes arbres
    - Mêmes groupes mais PAS mêmes arbres
    - PAS mêmes groupes mais mêmes arbres
    - PAS mêmes groupes et PAS mêmes arbres
    - Autre : (champ libre)
15. J'ai testé le Scénario 2 dans le cadre :
    - Scolaire
    - Non-scolaire
16. Pouvez-vous préciser le nombre de personnes ayant réalisé ce test, leur âge moyen, et si cela a été fait dans un contexte scolaire, la classe et l'option des élèves ou le club scolaire concerné ? (OUVERT)
17. Si vous deviez donner une note globale au Scénario 2, quelle serait-elle sur une échelle de 1 à 10 ?
18. Combien de temps avez-vous pris environ, pour la phase de terrain (observation des lichens), en suivant le Scénario 2 ? (OUVERT)
19. Quels sont, selon vous, les points positifs (s'il y en a) du Scénario 2 ? (OUVERT)
20. Quels sont, selon vous, les points négatifs (s'il y en a) du Scénario 2 ? (OUVERT)
21. Quelle a été l'impression des participants, des élèves, *etc.* ? (OUVERT)
22. Voyez-vous des éléments à améliorer dans le scénario 2 que vous avez testé ? Par exemple, des espèces à retirer ou à ajouter, ou encore des structures morphologiques qui restent difficiles à observer parmi les espèces sélectionnées, *etc.* (OUVERT)
23. Souhaitez-vous ajouter un commentaire concernant le Scénario 2, un avis général, une recommandation ou une comparaison avec le protocole complet (35 espèces + grille) ou une comparaison avec le Scénario 1 (si vous l'avez également réalisé) ? (OUVERT)

(→ FIN)

ANNEXE F : Analyse des réponses obtenues par l'enquête — graphes et tableaux complémentaires

Profils des répondants

Les figures présentées ci-dessous décrivent le profil des répondants à l'enquête, qu'il s'agisse de l'ensemble des répondants ou dans certains cas uniquement des participants au programme. Elles portent notamment sur l'âge, l'historique de participation à Lichens GO et à d'autres programmes d'étude ou d'observation de la nature, ainsi que le cadre de réalisation de l'activité.

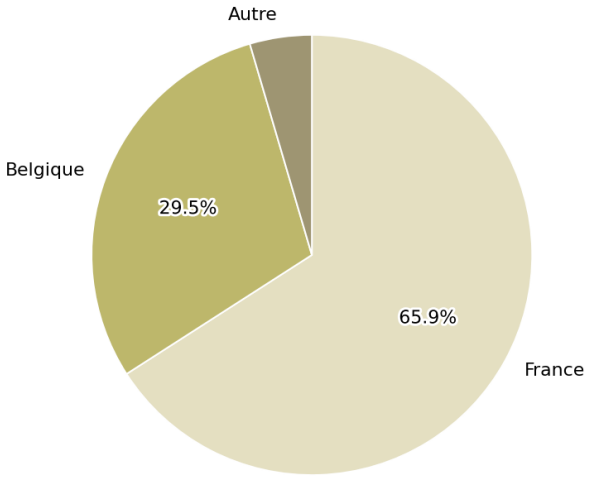


Figure 35 : Répartition des répondants à l'enquête selon leur pays de résidence. La catégorie « Autre » regroupe le Royaume-Uni, la Suisse et l'Italie.

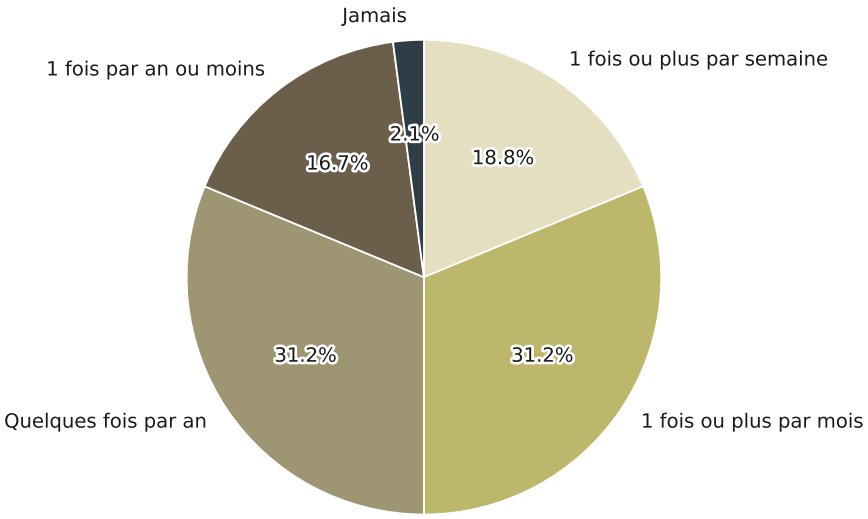


Figure 36 : Fréquence de participation des répondants participant à Lichens GO (n = 48) à des programmes d'étude ou d'observation de la nature.

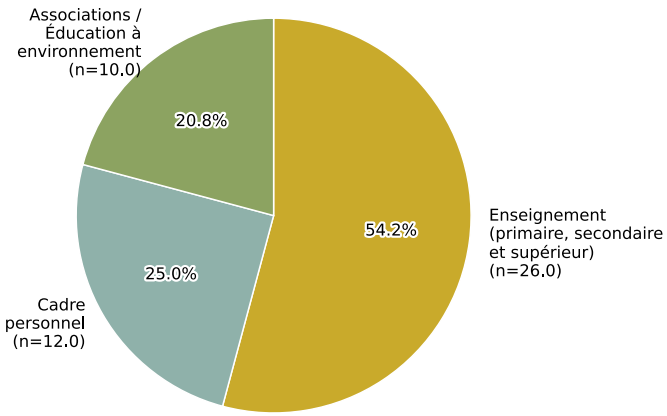


Figure 37 : Répartition des répondants (n = 48) selon leur cadre de participation : enseignement/scolaire, associations ou éducation à l'environnement, et cadre personnel.

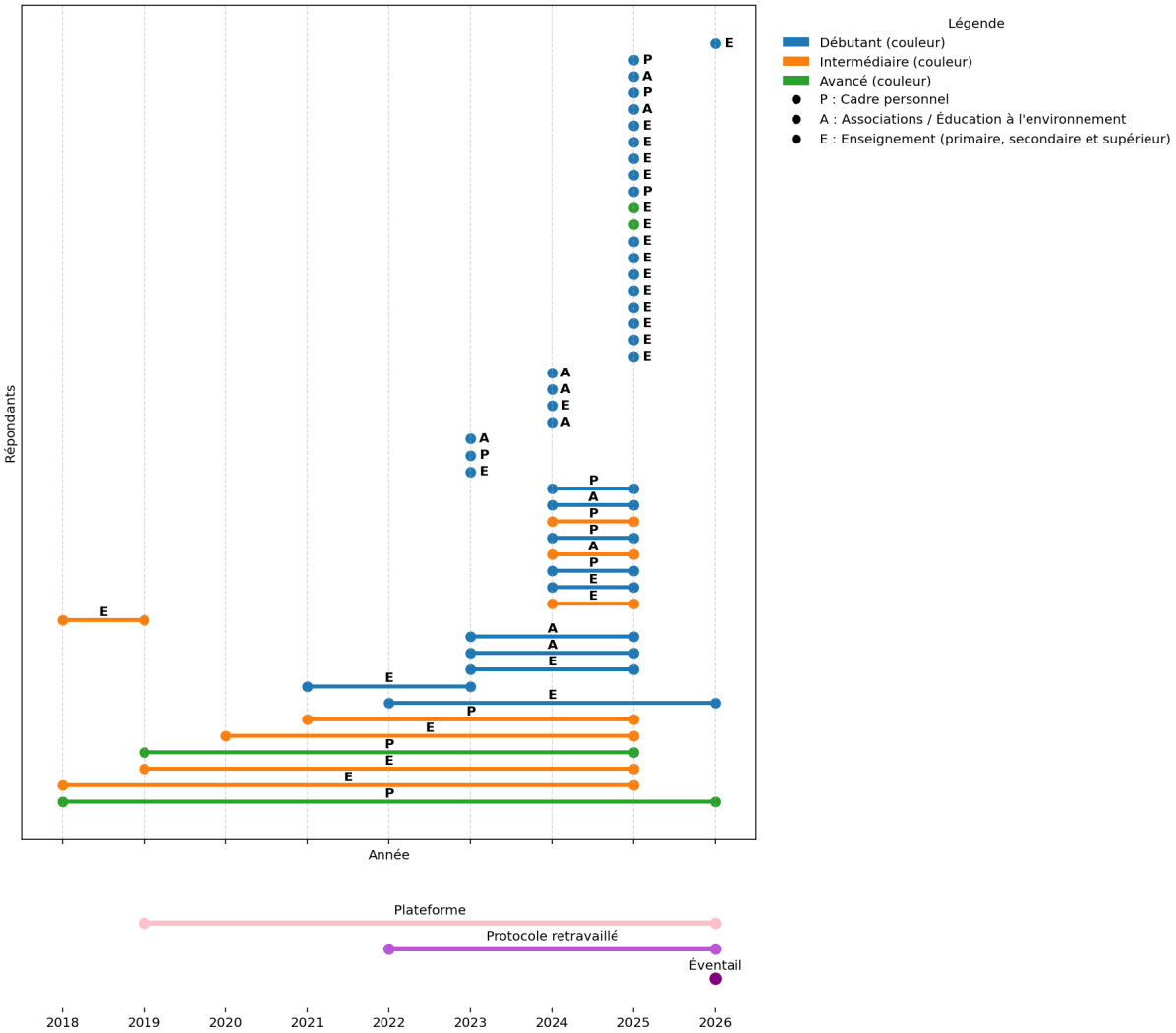


Figure 38 : Historique de participation à Lichens GO des répondants à l'enquête, indiquant les années de première et de dernière participation. Le nombre de participations est représenté par la couleur des barres et le cadre de participation est précisé pour chaque répondant. En parallèle sont indiquées les années de lancement de différentes ressources utiles à la participation.

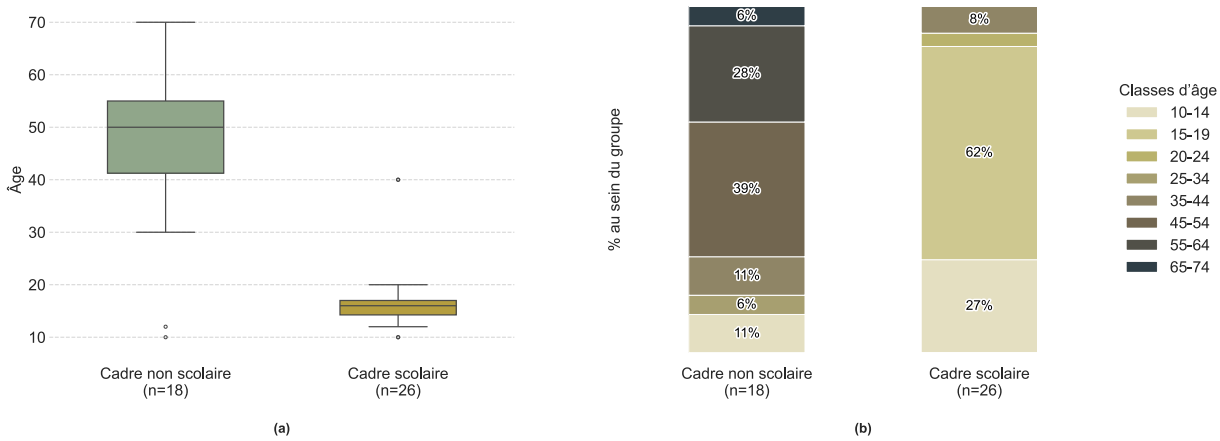


Figure 39 : Distribution des âges des participants selon le cadre de participation. (a) Distribution des âges des participants à Lichens GO dans les cadres scolaire et non scolaire. (b) Répartition des participants par classe d'âge au sein de chaque cadre de participation, exprimée en pourcentage.

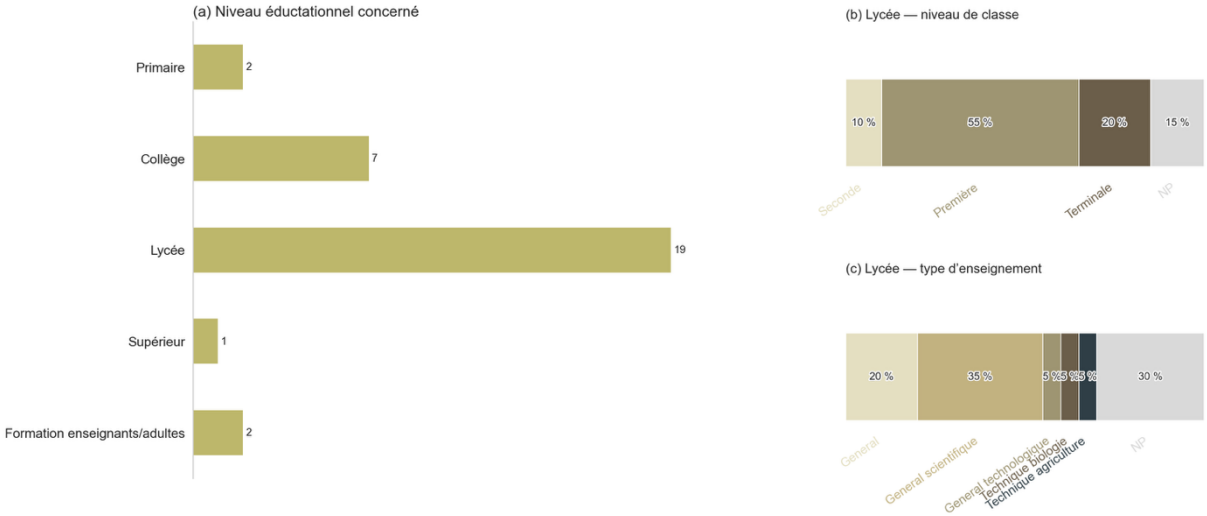


Figure 40 : Milieux scolaires des répondants. (a) Répartition des niveaux d'enseignement concernés dans le cadre scolaire. (b) Répartition des niveaux de classe au lycée (Seconde = quatrième secondaire, Première = cinquième secondaire, Terminale = sixième secondaire ; NP = non précisé). (c) Répartition des types d'enseignement au lycée.

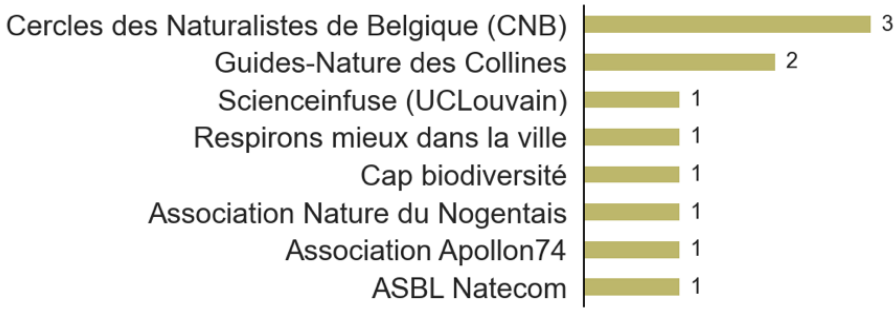


Figure 41 : Structures associatives pratiquant Lichens GO citées par les participants du cadre associatif et de l'éducation à l'environnement.

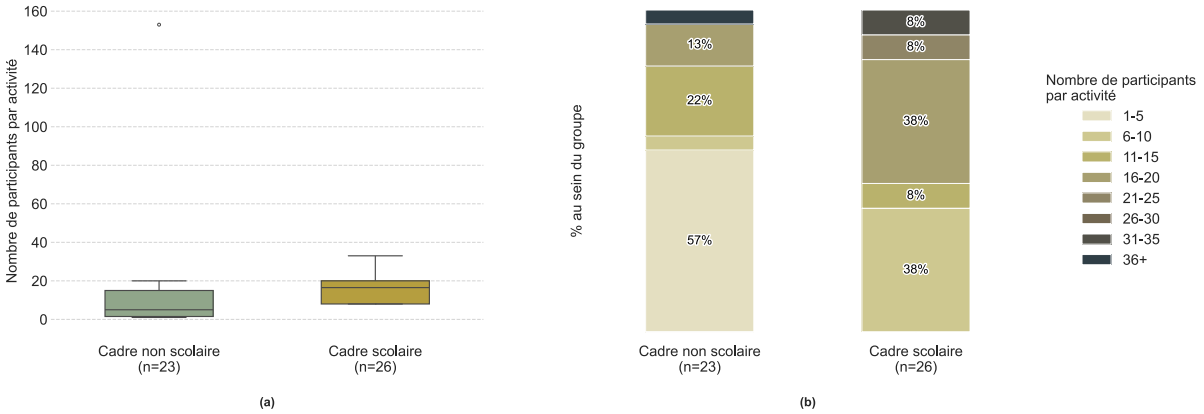


Figure 42 : Distribution du nombre de participants par activité Lichens GO selon le cadre de participation. (a) Distribution du nombre de participants par activité dans les cadres scolaire et non scolaire. (b) Répartition des activités selon des classes de nombre de participants.

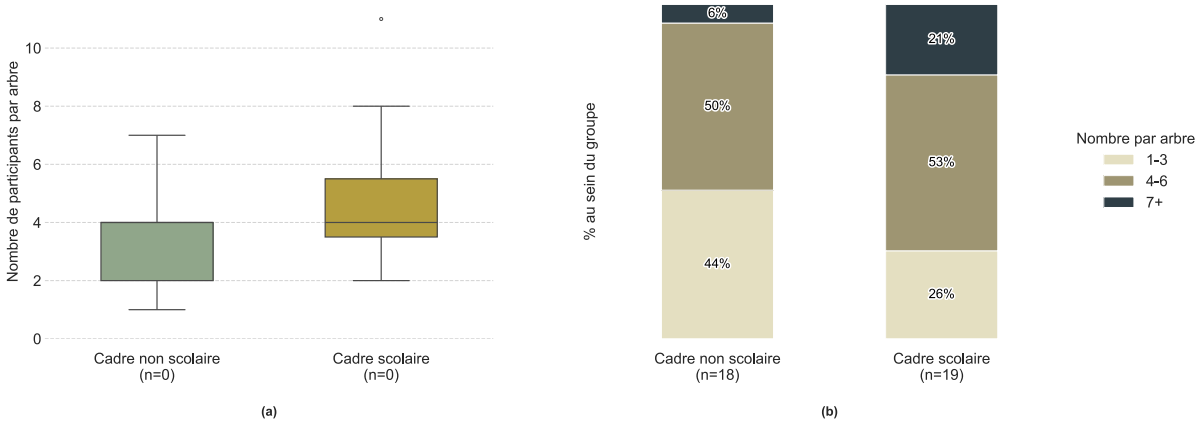


Figure 43 : Distribution du nombre moyen de participants par arbre selon le cadre de participation. (a) Distribution du nombre moyen de participants par arbre dans les cadres scolaire et non scolaire. (b) Répartition des répondants par classe de nombre moyen de participants par arbre au sein de chaque cadre de participation, exprimée en pourcentage.

Tableau 4 : Types de thématiques et de notions illustrées par Lichens GO dans les secteurs de l'enseignement et de l'éducation à l'environnement.

Catégories d'illustration	Éléments illustrés	Enseignement (n = 22)	Associations (n = 8)
Apports scientifiques	Étude de la biodiversité	6	1
	Qualité de l'air	5	—
	Compréhension des écosystèmes	1	—
	Fonctionnement des organismes	1	—
	Introduction à l'existence des lichens	—	1
	Total catégorie	7	2
Démarche scientifique	Sciences participatives	4	—
	Démarche scientifique	3	—
	Suivre un protocole	2	—
	Méthodes de recensement de la biodiversité	2	—
	Total catégorie	5	1
Pédagogie / didactique	Articulation théorie–pratique	5	—
	Observation et identification	1	—
	Travail de groupe et coopération	1	—
	Total catégorie	4	—
Sensibilisation environnementale	Impact de l'humain sur l'environnement	4	—
	Éducation au développement durable	1	—
	Citoyenneté	1	—
	Total catégorie	4	—
Animation / médiation	Animation nature	—	1
	Nouveau thème à exploiter	—	1
	Élargissement des connaissances	—	1
	Total catégorie	—	3
Données / analyse	Fourniture de données	1	—
	Analyse de données	1	—
	Total catégorie	2	—

Aspects temporels de l'activité

Les figures présentées ci-dessous portent sur différents aspects temporels de l'activité et complètent les résultats présentés à la section 5.1.2. Elles décrivent le temps consacré aux différentes phases du protocole par cadre, la durée totale de celui-ci et la répartition de sa réalisation sur un ou plusieurs jours selon le cadre de participation.

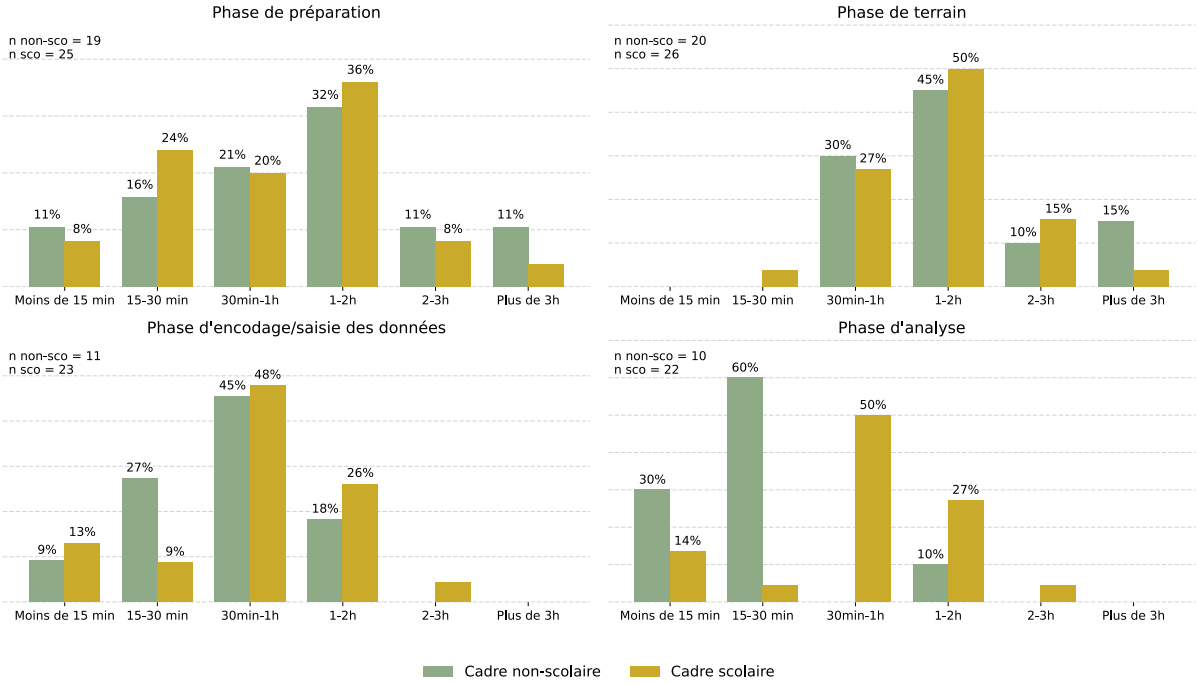


Figure 44 : Distribution de la durée des différentes phases du protocole pour les cadres scolaire et non scolaire, exprimée en pourcentage des participants.

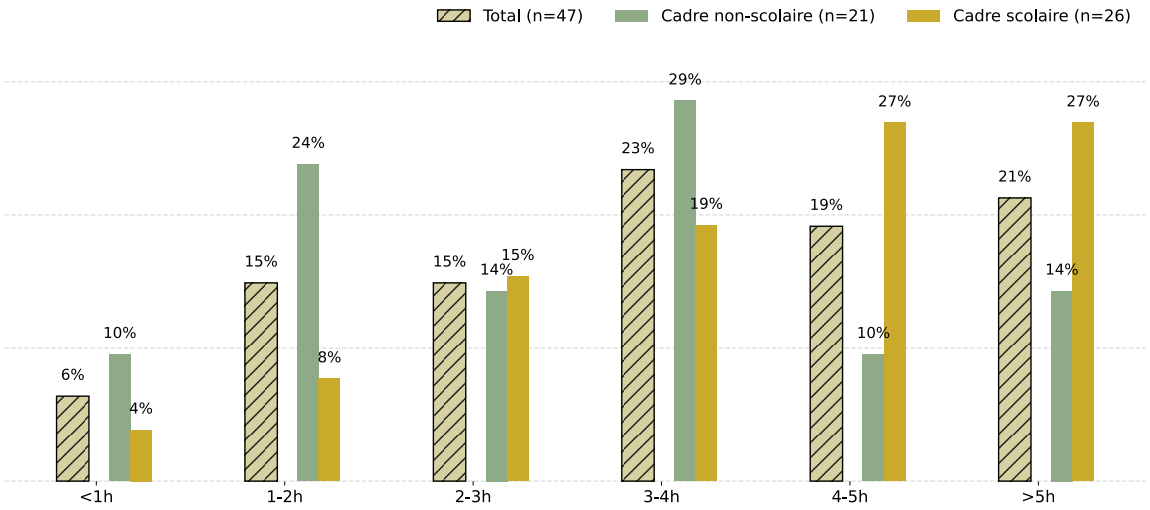


Figure 45 : Distribution de la durée totale du protocole pour l'ensemble des répondants ainsi que pour les cadres scolaire et non scolaire, exprimée en pourcentage des participants. Les durées correspondent à la somme des temps moyens déclarés pour chaque phase du protocole.

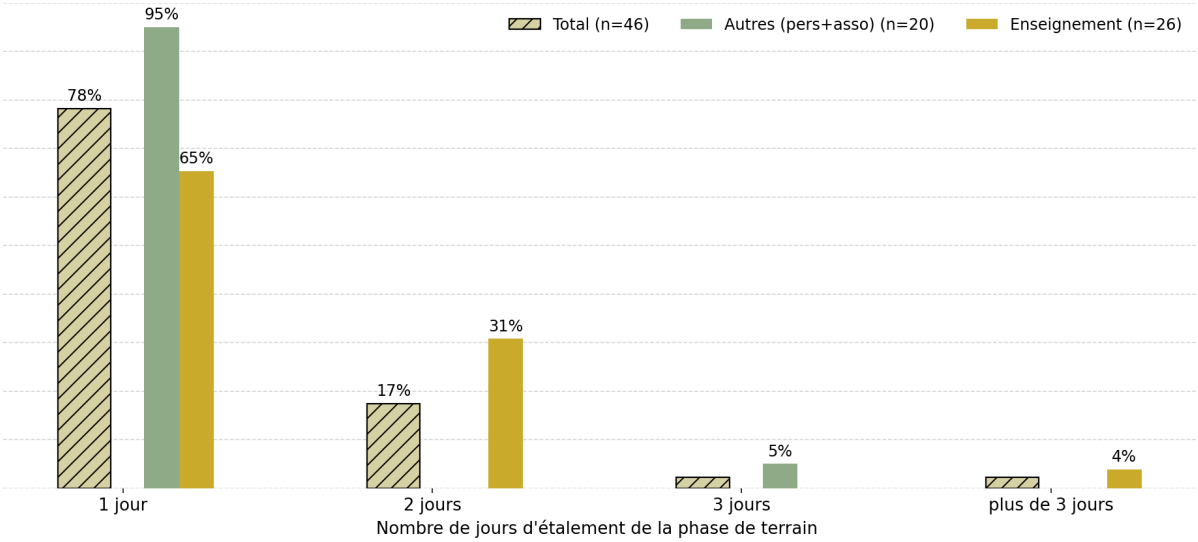


Figure 46 : Répartition des participants selon le nombre de jours sur lesquels la phase de terrain a été réalisée, en fonction du cadre de participation et comparée à la distribution globale.

Difficultés et facilités rencontrées par les participants

La présentation détaillée des difficultés générales rencontrées pour chacune des quatre phases du protocole ainsi que les difficultés sur des aspects précis de chacune d'entre elles, est disponible ci-dessous. Cette section reprend également le détail des difficultés générales et des difficultés d'observation rencontrées par cadre. Ces représentations viennent compléter les résultats du point 5.1.3.

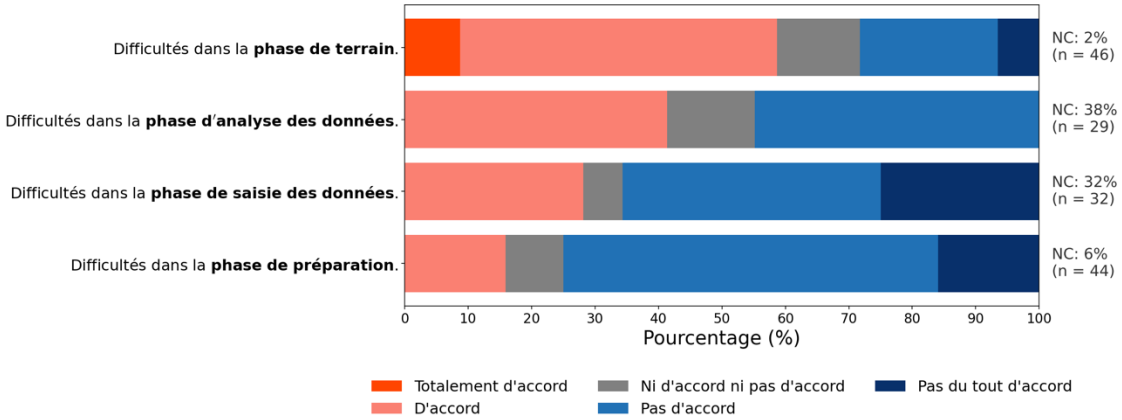


Figure 47 : Facilités et difficultés rencontrées par les participants au programme Lichens GO (n = 47) lors des différentes phases du protocole, exprimées en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « non concerné·e » (NC).

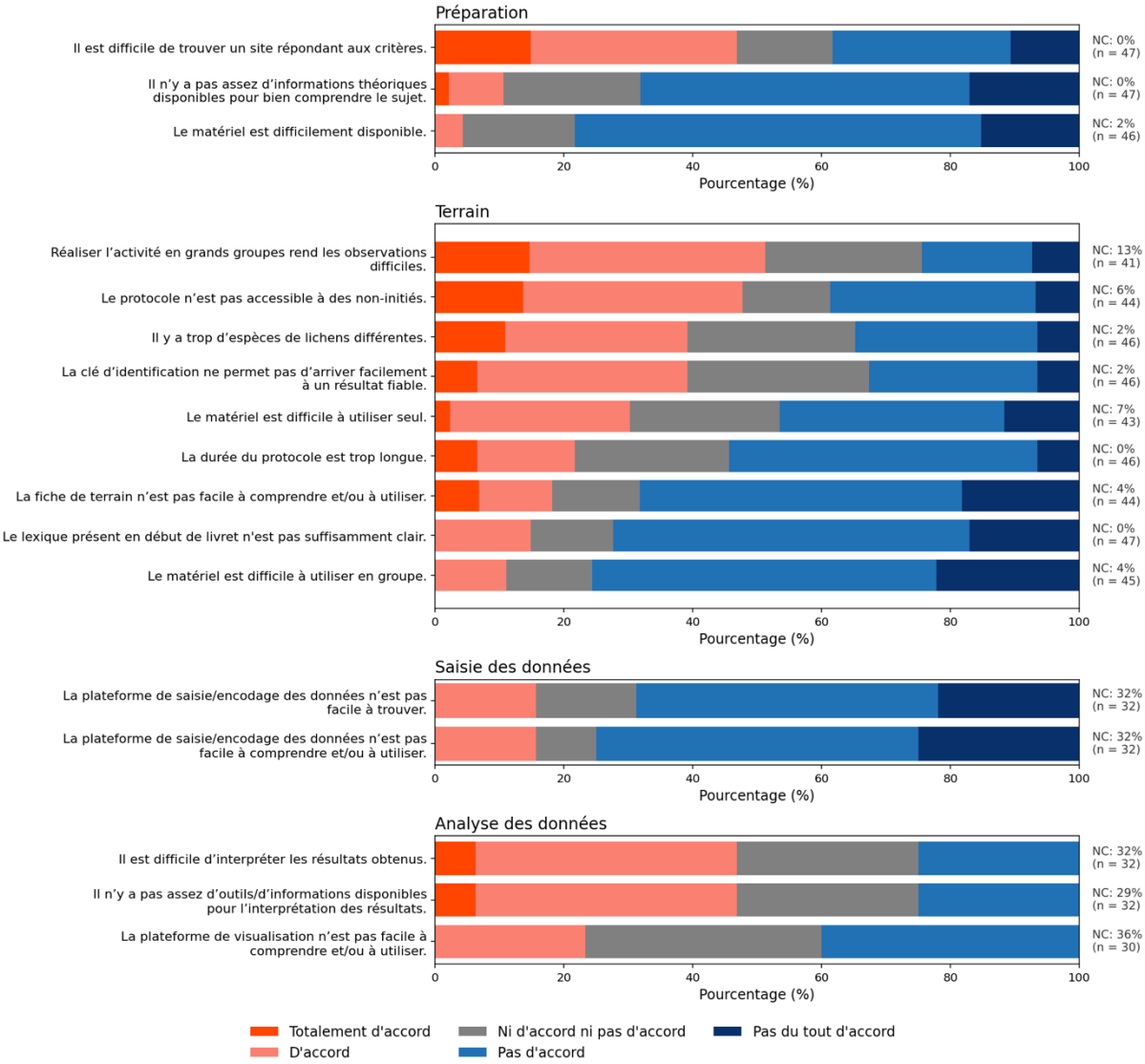


Figure 48 : Ressentis des participants au programme Lichens GO (n = 47) à l'égard des différents aspects des quatre phases du protocole, exprimés en pourcentages normalisés après exclusion des réponses « non concerné·e » (NC).

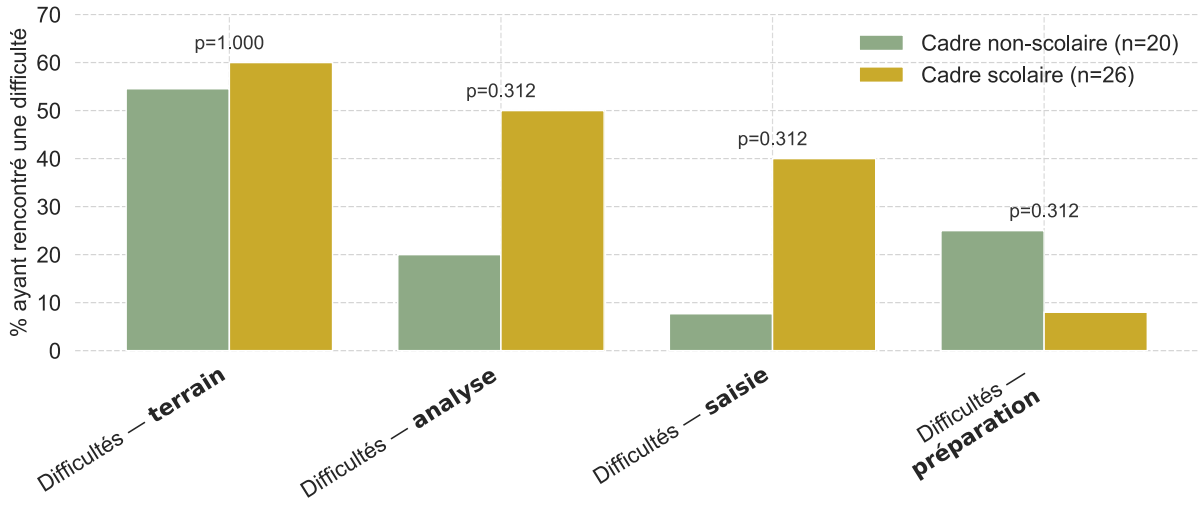


Figure 49 : Pourcentage de participants ayant rencontré des difficultés dans les différentes phases du protocole selon le cadre de participation. Les valeurs de p correspondent aux tests exacts de Fisher bilatéraux, ajustés pour comparaisons multiples selon la méthode FDR de Benjamini–Hochberg.

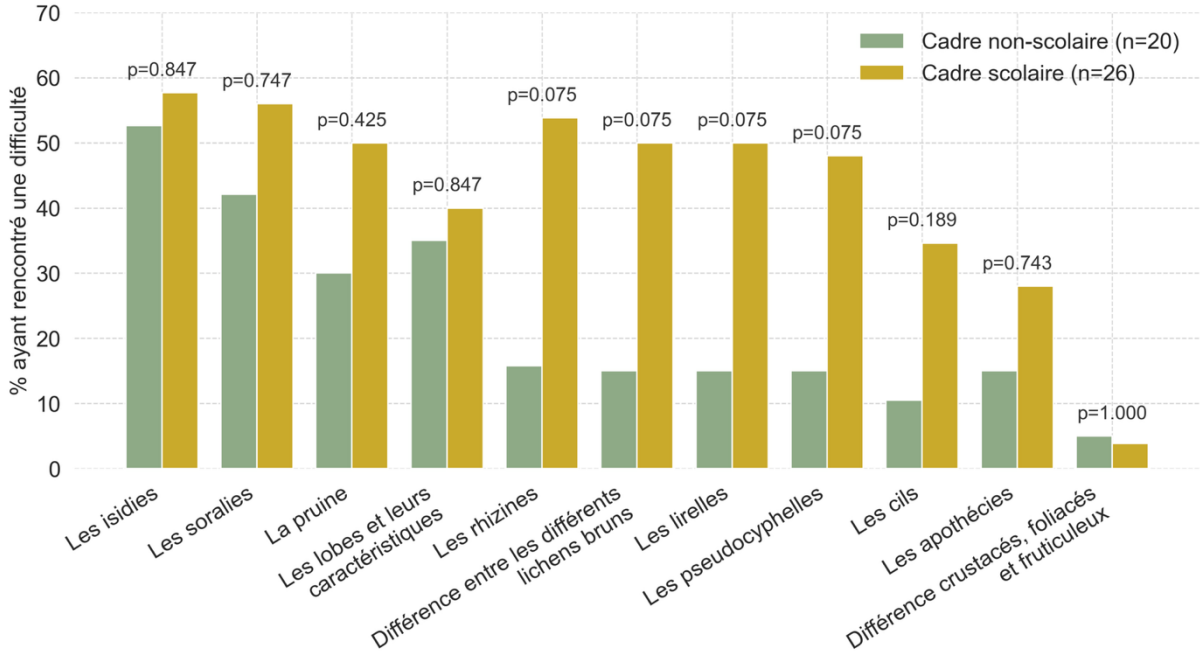


Figure 50 : Pourcentage de participants ayant rencontré des difficultés lors de l'observation de différentes structures et caractéristiques morphologiques des lichens selon le cadre de participation. Les valeurs de p correspondent aux tests exacts de Fisher bilatéraux, ajustés pour comparaisons multiples selon la méthode FDR de Benjamini–Hochberg.

Tableau 5 : Difficultés exprimées par les participants dans les questions ouvertes, classées par catégorie et selon le cadre de participation (non scolaire [NS], n = … ; scolaire [S], n = …). Les difficultés sont distinguées entre celles personnellement rencontrées et celles identifiées comme susceptibles d'être rencontrées par d'autres participants.

Catégories de difficultés	Éléments illustrés	*Personnelles*		*Imaginées pour les autres*	
		Cadre S	Cadre NS	Cadre S	Cadre NS
Identification / reconnaissance	Incertitudes sur l'identification	6	4	2	2
	Identification difficile des petits spécimens	1	—	—	1
	Identification difficile des spécimens juvéniles	—	1	—	—
	Identification difficile des spécimens nécrosés	—	3	—	—
	Identification difficile des spécimens se chevauchants	—	1	—	—
	Observations atypiques	2	1	—	—
	Apprentissage des différents types de lichens	—	—	1	—
	Total catégorie	8	6	3	3
Caractères morphologiques difficiles	Distinctions morphologiques	3	2	—	—
	Distinction isidies VS soralies	1	1	—	1
	Distinction cils	—	1	—	—
	Distinction rhizines	—	1	—	—
	Distinction soralies	—	1	—	—
	Distinction pruine	—	1	—	—
	Observation de la position des soralies sur les lobes	1	—	—	—
	Observation de la couleur	1	—		
	Total catégorie	4	2	—	1
Outils / clé d'identification	Utilisation de le clé	3	—	—	—
	Les schémas et les photos ne sont pas toujours clairs et lisibles	—	—	1	—
	Utilisation des noms latins	1	1	—	—
	Total catégorie	4	1	1	—
Protocole / contraintes méthodologiques	Protocole exigeant		1	—	1(0
	Prend du temps	6	4	—	1
	Préparation difficile	—	—	—	1
	Préparation longue nécessaire	—	—	—	1
	Saisie des données prend du temps	1		—	—
	Impossibilité de saisir des espèces hors protocole	—	2	—	—
	Impossibilité de saisir tous les résultats si hors protocole (ex. 4ème arbre)	1	—	—	—

	Impossibilité d'exporter sous fichier *calc*	1	—	—	—
	Total catégorie	9	6	—	3
Terrain / conditions pratiques	Trouver un site	1	2	—	1
	Fabriquer la grille	1	1	—	1
	Fixer la grille	—	1	—	—
	Nécessité de rester debout longtemps	—	1	—	—
	Dangerosité quand arbres près de la route	1	1	—	—
	Sujet à la météo	1	1	—	—
	Total catégorie	2	3	—	1
Manque de ressources / encadrement	Nécessite une personne qualifiée dans le groupe	—	—	1	1
	Manque d'expérience	2	2	—	—
	Manque d'accompagnement à la compréhension	1	—	—	—
	Limitations géographiques (pas de relais en Suisse)	1	—	—	—
	Total catégorie	4	2	1	1
Difficultés liées aux élèves	Manque de sérieux	1	—	—	—
	Décrochent vite	1	—	—	—
	Peu autonomes	1	—	—	—
	Nécessite plus d'un accompagnant par groupe	1	—	—	—
	Total catégorie	4	—	—	—
Charge cognitive / complexité	Théorie difficile	—	1	—	—
	Saturation de la mémoire de travail	1	—	—	—
	Total catégorie	1	1	—	—
Matériel	Nécessite un bon appareil photo	1	—	—	—
	Total catégorie	1	—	—	—

Propositions d'améliorations

À la fin du questionnaire, les participants étaient invités à partager les améliorations ou les changements qu'ils souhaiteraient voir apportés au programme. Les propositions recueillies ont ensuite été regroupées lorsque des idées similaires étaient exprimées par plusieurs répondants, puis organisées en grandes catégories afin d'en faciliter la lecture.

Tableau 6 : Propositions d'améliorations formulées par les participants, classées par catégorie et selon le cadre de participation (non scolaire, n = 10 ; scolaire, n = 11).

Catégories d'améliorations	Éléments illustrés	Cadre scolaire (n = 11)	Cadre non-scolaire (n = 10)
Support visuel / livret	Plus de photos par taxon dans le livret	1	2
	Des photos aux différents stades de développement (juvénile, adulte, nécrosé) pour chaque taxon	—	1
	Amélioration des fiches taxa	—	1
	Plus de descriptions et avec plus de nuances sur les variations possibles	—	1
	Fiches confusion	1	—
	Précision du degré de rareté du taxon dans les fiches	1	1
	Total catégorie	2	5
Pédagogie / accompagnement	Guide pédagogique détaillé avec exemples séquentiels	1	—
	Exercices résolus (raisonnement et identification)	—	1
	Plus de consignes	—	1
	Simplifier l'accès à l'analyse pour les jeunes	1	—
	Total catégorie	2	2
Clé d'identification / contenu scientifique	Clé plus efficace et plus simple	—	2
	Classement des taxa au sein de la clé selon certains critères (rareté…)	—	1
	Ajout de plus de taxa	—	1
	Total catégorie	—	3
Simplification / ergonomie	Plus simple et plus clair	1	—
	Diminuer le nombre de cases à observer	1	—
	Diminuer le nombre de faces à observer	2	—
	Total catégorie	3	—
Numérique / outils	Application mobile pour les relevés	—	1
	Application de reconnaissance d'images	2	—
	Total catégorie	2	1
Analyse / données	Accès à un suivi temporel	1	—
	Obtention d'un indice lichénique brut	1	—
	Total catégorie	2	—
Matériel	Accès à du matériel de meilleure qualité	—	1
	Total catégorie	—	1

ANNEXE G : Taxa lichéniques considérés dans Lichens GO et leurs caractéristiques

Cette section présente les principales caractéristiques des taxa lichéniques considérés dans Lichens GO. Elle rassemble à la fois des informations pratiques, telles que les confusions observées entre taxa et leur fréquence d'observation au sein du programme, ainsi que des informations écologiques et techniques, notamment leurs préférences écologiques et leur degré de tolérance à différents polluants atmosphériques.

Tableau 7 : Taxa lichéniques considérés dans le protocole complet Lichens GO, avec leurs principales confusions possibles, leur type de thalle, leurs structures reproductrices, leur fréquence d'occurrence et les types de climat auxquels elles sont associées. Les dix taxa retenus dans le protocole simplifié sont mis en évidence en gris.

Taxa	Confusion	Thalle	Reproduction	Occurrence (théorique)	Nombre de sites observés	Climat : milieu ensoleillé	Climat : milieu humide	Climat : milieu chaud
Amandinea punctata	aucun	crustacé	apothécies	4	298	non	non	non
Anaptychia ciliaris	*Physcia adscendens*, *Physcia leptalea*	fruticuleux	apothécies	1	16	oui	non	non
Candelaria concolor	*Candelariella* sp.	foliacé	soralies	4	274	oui	non	non
Candelariella sp.	*Candelaria concolor*, Lichens crustaces poudreux	crustacé	apothécies, soralies	3	165	oui	non	non
Diploicia canescens	aucun	crustacé	soralies	3	66	non	non	oui
Evernia prunastri	*Romalina farinacea*	fruticuleux	soralies	3	156	oui	non	non
Flavoparmelia caperata	aucun	foliacé	soralies	4	248	non	non	oui
Hyperphyscia adglutinata	*Phaeophyscia orbicularis*	foliacé	soralies	4	149	oui	non	oui
Hypogymnia physodes	*Parmotrema perlatum*	foliacé	soralies	3	63	non	non	non
Hypotrachyna afrorevoluta	*Parmotrema perlatum*, *Punctelia* sp.	foliacé	soralies	1	37	non	non	oui
Lecanora sp.	aucun	crustacé	apothécies	4	282	non	non	non
Lichens crustacés à lirelles	aucun	crustacé	apothécies	2	22	non	non	non
Lichens crustacés poudreux	*Candelariella* sp.	crustacé	soralies	3	161	non	non	non

Melanelixia glabratula	*Melanohalea exasperata*	foliacé	isidies	3	140	non	non	non
Melanohalea exasperata	*Melanelixia glabratula*	foliacé	apothécies	1	54	oui	non	non
Parmelia saxatilis	*Parmelia sulcata,* *Parmelina tiliacea*	foliacé	isidies	1	19	non	non	non
Parmelia sulcata	*Parmelia saxatilis*	foliacé	soralies	4	220	non	non	non
Parmelina tiliacea	*Parmelia saxatilis*	foliacé	isidies	3	126	non	oui	non
Parmotrema perlatum	*Hypogymnia physodes,* *Hypotrachyna afrorevoluta*	foliacé	soralies	3	76	non	non	oui
Pertusaria pertusa	aucun	crustacé	apothécies	2	70	non	non	non
Phaeophyscia orbicularis	*Hyperphyscia adglutinata,* *Physcia adscendens,* *Physconia grisea*	foliacé	soralies	4	206	oui	non	non
Physcia adscendens	*Anaptychia ciliaris,* *Physcia leptalea,* *Phaeophyscia orbicularis*	foliacé	soralies	4	410	oui	non	non
Physcia aipolia	*Physcia adscendens,* *Physcia leptalea,* *Anaptychia ciliaris*	foliacé	apothécies	3	160	oui	non	non
Physcia leptalea	*Anaptychia ciliaris,* *Physcia adscendens,* *Physcia aipolia*	foliacé	apothécies	2	29	oui	non	oui
Physconia distorta	*Physcia aipolia,* *Physconia grisea*	foliacé	apothécies	3	87	oui	non	non
Physconia grisea	*Phaeophyscia orbicularis,* *Physconia distorta*	foliacé	soralies	3	193	oui	non	non
Pleurosticta acetabulum	aucun	foliacé	apothécies	2	113	oui	non	non
Polycauliona polycarpa	*Xanthoria parietina*	foliacé	apothécies	2	15	oui	non	non
Pseudevernia furfuracea	*Evernia prunastri,* *Ramalina farinacea*	fruticuleux	isidies	1	9	non	non	non

Punctelia sp.	*Hypotrachyna afrorevoluta, Parmelia sulcata*	foliacé	soralies	3	234	non	non	oui
Ramalina farinacea	*Evernia prunastri*	fruticuleux	soralies	3	37	oui	oui	oui
Ramalina fastigiata	*Ramalina fraxinea*	fruticuleux	apothécies	2	29	oui	non	oui
Ramalina fraxinea	*Ramalina fastigiata*	fruticuleux	apothécies	2	25	oui	non	non
Usnea sp.	aucun	fruticuleux	apothécies, soralies	1	24	non	oui	non
Xanthoria parietina	*Polycauliona polycarpa*	foliacé	apothécies	4	469	oui	non	non

Tableau 8 : Taxa lichéniques considérés dans le protocole complet Lichens GO, avec leur sensibilité au dioxyde de soufre, aux oxydes d'azote et à l'ammoniac, ainsi que leur caractère toxitolérant, eutrophe et acidophile. Les dix taxa retenus dans le protocole simplifié sont mis en évidence en gris.

Taxa	Pollution : dioxyde de soufre	Pollution : oxyde d'azote	Pollution : ammoniac	Toxitolérance	Eutrophisation	Acidité
Amandinea punctata	neutre	neutre	résistant	résistant	mésotrophe	neutrophile
Anaptychia ciliaris	sensible	sensible	sensible	intermédiaire	mésotrophe	neutrophile
Candelaria concolor	sensible	neutre	résistant	résistant	eutrophe	neutrophile
Candelariella sp.	sensible	neutre	résistant	résistant	eutrophe	neutrophile
Diploicia canescens	neutre	neutre	neutre	intermédiaire	mésotrophe	basophile
Evernia prunastri	sensible	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	acidophile
Flavoparmelia caperata	sensible	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	neutrophile
Hyperphyscia adglutinata	sensible	neutre	résistant	résistant	eutrophe	basophile
Hypogymnia physodes	neutre	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	acidophile
Hypotrachyna afrorevoluta	sensible	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	acidophile
Lecanora sp.	sensible	neutre	résistant	intermédiaire	inconnu	inconnu
Lichens crustacés à lirelles	neutre	neutre	neutre	intermédiaire	inconnu	inconnu

Lichens crustacés poudreux	résistant	neutre	sensible	intermédiaire	inconnu	acidophile
Melanelixia glabratula	sensible	neutre	neutre	résistant	mésotrophe	neutrophile
Melanohalea exasperata	sensible	neutre	sensible	intermédiaire	mésotrophe	neutrophile
Parmelia saxatilis	neutre	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	acidophile
Parmelia sulcata	sensible	neutre	sensible	résistant	oligotrophe	acidophile
Parmelina tiliacea	sensible	neutre	sensible	intermédiaire	mésotrophe	neutrophile
Parmotrema perlatum	sensible	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	neutrophile
Pertusaria pertusa	sensible	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	acidophile
Phaeophyscia orbicularis	sensible	résistant	résistant	résistant	eutrophe	neutrophile
Physcia adscendens	sensible	résistant	neutre	résistant	eutrophe	basophile
Physcia aipolia	sensible	sensible	sensible	résistant	eutrophe	neutrophile
Physcia leptalea	sensible	neutre	neutre	intermédiaire	mésotrophe	neutrophile
Physconia distorta	sensible	sensible	sensible	résistant	eutrophe	neutrophile
Physconia grisea	sensible	résistant	résistant	résistant	eutrophe	neutrophile
Pleurosticta acetabulum	sensible	neutre	neutre	intermédiaire	mésotrophe	neutrophile
Polycauliona polycarpa	neutre	neutre	neutre	intermédiaire	mésotrophe	neutrophile
Pseudevernia furfuracea	neutre	neutre	sensible	intermédiaire	oligotrophe	acidophile
Punctelia sp.	sensible	neutre	neutre	résistant	oligotrophe	neutrophile
Ramalina farinacea	sensible	sensible	sensible	intermédiaire	oligotrophe	neutrophile
Ramalina fastigiata	sensible	sensible	neutre	intermédiaire	oligotrophe	neutrophile
Ramalina fraxinea	sensible	neutre	sensible	sensible	mésotrophe	neutrophile
Usnea sp.	sensible	sensible	sensible	sensible	oligotrophe	acidophile
Xanthoria parietina	sensible	sensible	résistant	résistant	eutrophe	neutrophile

ANNEXE H : Analyse de la dégradation des jeux de données — graphes et tableaux complémentaires

Cette section présente des résultats complémentaires à ceux exposés dans la section 6.1. Elle présente notamment l'analyse NMDS réalisée sur le jeu de données de Clermont-Ferrand, l'analyse supplémentaire sur les corrélations d'occurrence entre taxa et un complément d'information sur la perte de taxa observée dans les jeux de données par la dégradation.

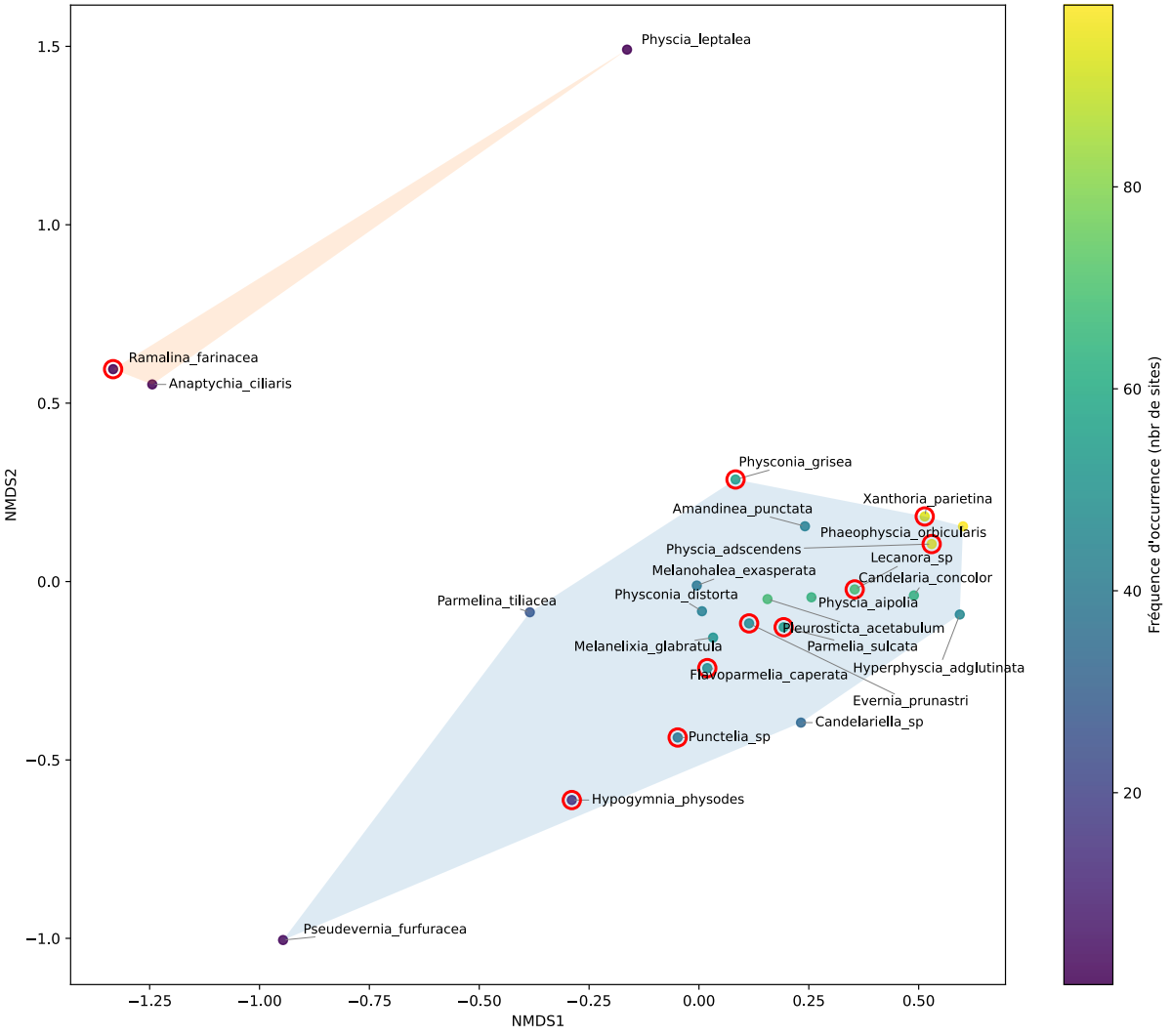


Figure 51 : Représentation NMDS des taxa lichéniques du jeu de données de Clermont-Ferrand, basée sur la distance de Bray-Curtis. Les polygones délimitent les groupes identifiés par un clustering k-means (k = 2). Les taxa retenus dans le protocole simplifié sont surlignés en rouge. La couleur des points indique la fréquence d'occurrence des taxa (nombre de sites), reflétant leur abondance relative dans le jeu de données.

Afin de venir renforcer les résultats NMDS, les relations de co-occurrence entre taxa ont été analysées à partir des abondances observées sur les différents sites. Pour chaque paire de taxa, un coefficient de corrélation de Pearson ainsi que la p-valeur associée ont été calculés à l'aide de la fonction numpy.corrcoef, afin d'évaluer la force et la significativité des associations.

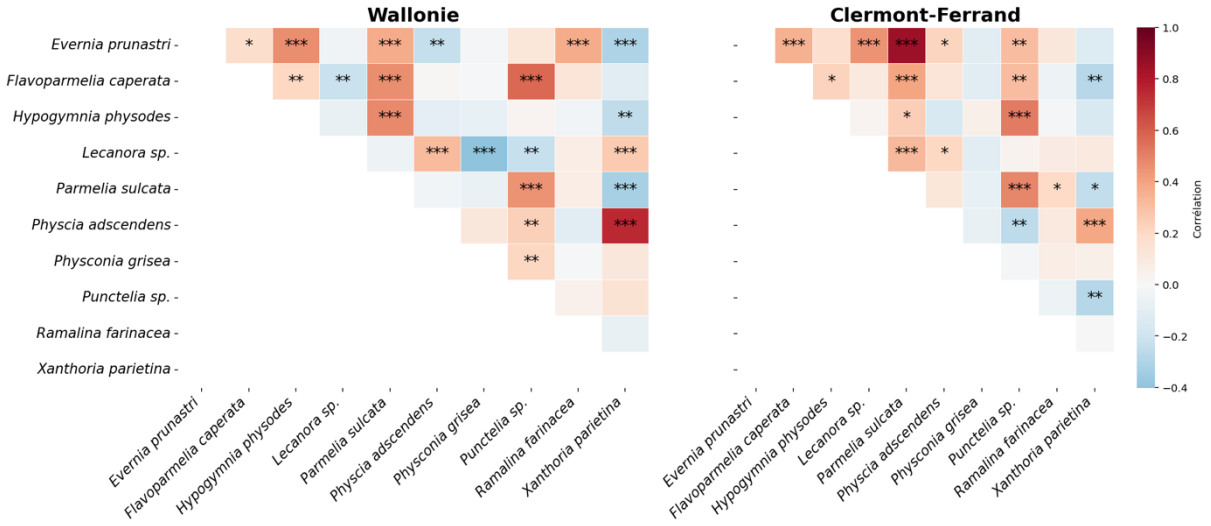


Figure 52 : Corrélations de Pearson entre les taxa de lichens retenues dans le protocole simplifié pour les jeux de données de Wallonie (gauche) et de Clermont-Ferrand (droite). Les corrélations positives sont représentées en rouge et les corrélations négatives en bleu. Les astérisques indiquent le niveau de significativité statistique (*: p < 0,05 ; **: p < 0,01 ; ***: p < 0,001).

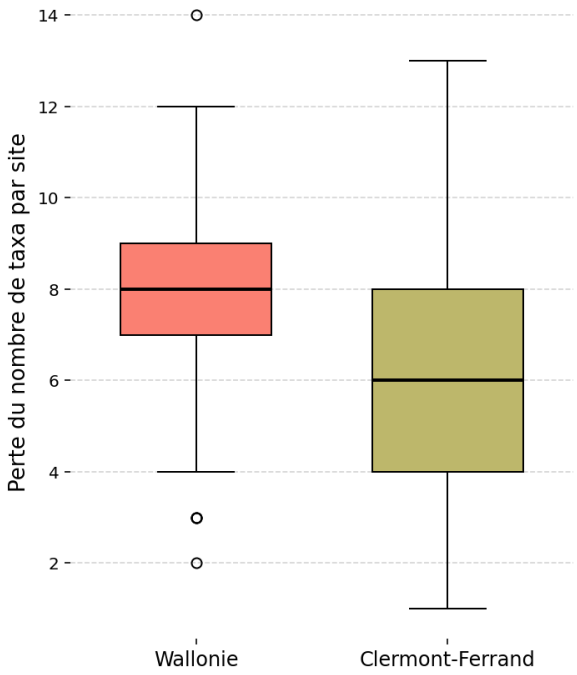


Figure 53 : Distribution de la perte de taxa lichéniques par site étudié pour les deux jeux de données.

ANNEXE I : Analyse du nombre de taxa retenus dans le protocole simplifié

Apport de l'ajout de taxa

Une analyse a été réalisée, au travers d'une recherche exhaustive des combinaisons d'espèces parmi les 25 restantes, afin de déterminer si une augmentation d'un, deux ou trois taxa pouvait fortement diminuer le score d'erreur (Tableau 9). Pour le jeu de Wallonie, l'ajout de *Candelaria concolor* et de *Hyperphyscia adglutinata* permettrait, par exemple, de réduire le score de 3,50 points, tandis que pour le jeu de Clermont-Ferrand, l'ajout de *Phaeophyscia orbicularis* et *Physcia aipolia* apporterait un gain de score de 3,10 points. En augmentant un peu la difficulté pour les participants de meilleurs résultats peuvent donc être obtenus. Cependant, cela montre aussi la divergence des jeux de données qui ne demandent pas l'ajout des mêmes espèces pour minimiser le score. De plus, le choix des espèces a volontairement exclu certaines espèces pour la confusion ou les subtilités qu'elles amenaient. L'ajout de *Hyperphyscia adglutinata* ou de *Phaeophyscia orbicularis* demande l'introduction des « petits gris » de petites espèces de lichens grises qui sont apparues souvent non comptabilisées par les participants dans de précédentes études. *Physcia aipolia*, quant à elle, possède trois confusions possibles au sein des taxa du protocole Lichens GO complet, ce qui implique une plus grande difficulté potentielle dans son observation. *Candelaria concolor,* et sa confusion *Candelariella* sp. pourraient être ajoutées.

Tableau 9 : Exploration de l'impact d'ajout de taxa dans le protocole. La ligne grisée représente les résultats obtenus avec la proposition de sélection de taxa utilisée dans ce travail

Wallonie		Clermont-Ferrand	
Nbr de taxa	*Score d'erreur min*	*Nbr de taxa*	*Score d'erreur min*
10	9,02	10	8,23
11	6,66	11	4,84
12	5,52	12	3,97
13	4,17	13	3,60

Considérant la proposition d'ajout de *Candelaria concolor* et de *Candelariella* sp., le score d'erreur obtenu pour ce groupe de 12 taxa s'élève, pour la Wallonie, à 5,86 et pour Clermont-Ferrand à 6,18, et leur LDV respectives restent proches (0,42 et 0,44).

Apport de la réduction de taxa

A l'inverse, une autre analyse a été réalisée afin de déterminer si une réduction de taxa parmi ceux sélectionnés pouvait permettre une réduction de l'erreur (Tableau 10). En testant la suppression de toutes les combinaisons de taxa possibles, il a été montré qu'il était possible de diminuer le nombre de taxa de 10 à 7 tout en améliorant légèrement les résultats. Les mêmes constatations sont réalisées sur les deux jeux de données avec cependant, des sélections d'espèces pour arriver aux meilleurs résultats légèrement différentes. L'impact sur la relation LDV_{10}/LDV_{35} a montré que, bien qu'il diminuait, le rapport restait relativement comparable entre les jeux de données (W : 0,29, CF : 0,27) permettant une correction. Cela reste à nouveau

un compromis entre plusieurs facteurs. D'un côté, une nouvelle réduction peut éventuellement apporter une simplification et un gain de temps supplémentaire et, de l'autre, cela limite les structures lichéniques à observer ainsi que le nombre de taxa différents identifiés sur site.

Tableau 10 : Exploration de l'impact de retrait de taxa dans le protocole. La ligne grisée représente les résultats obtenus avec la proposition de sélection de taxa utilisée dans ce travail

Wallonie		Clermont	
Nbr de taxa	*Score d'erreur min*	*Nbr de taxa*	*Score d'erreur min*
1	16,4	1	15,6
2	12,5	2	11,8
3	10,8	3	10,6
4	9,71	4	9,44
5	9,29	5	8,51
6	9,06	6	8,28
7	8,88	7	8,24
8	8,81	8	8,21
9	8,77	9	8,20
10	9,02	10	8,23

ANNEXE J : Analyse des résultats des tests sur Louvain-la-Neuve — graphes et tableaux complémentaires

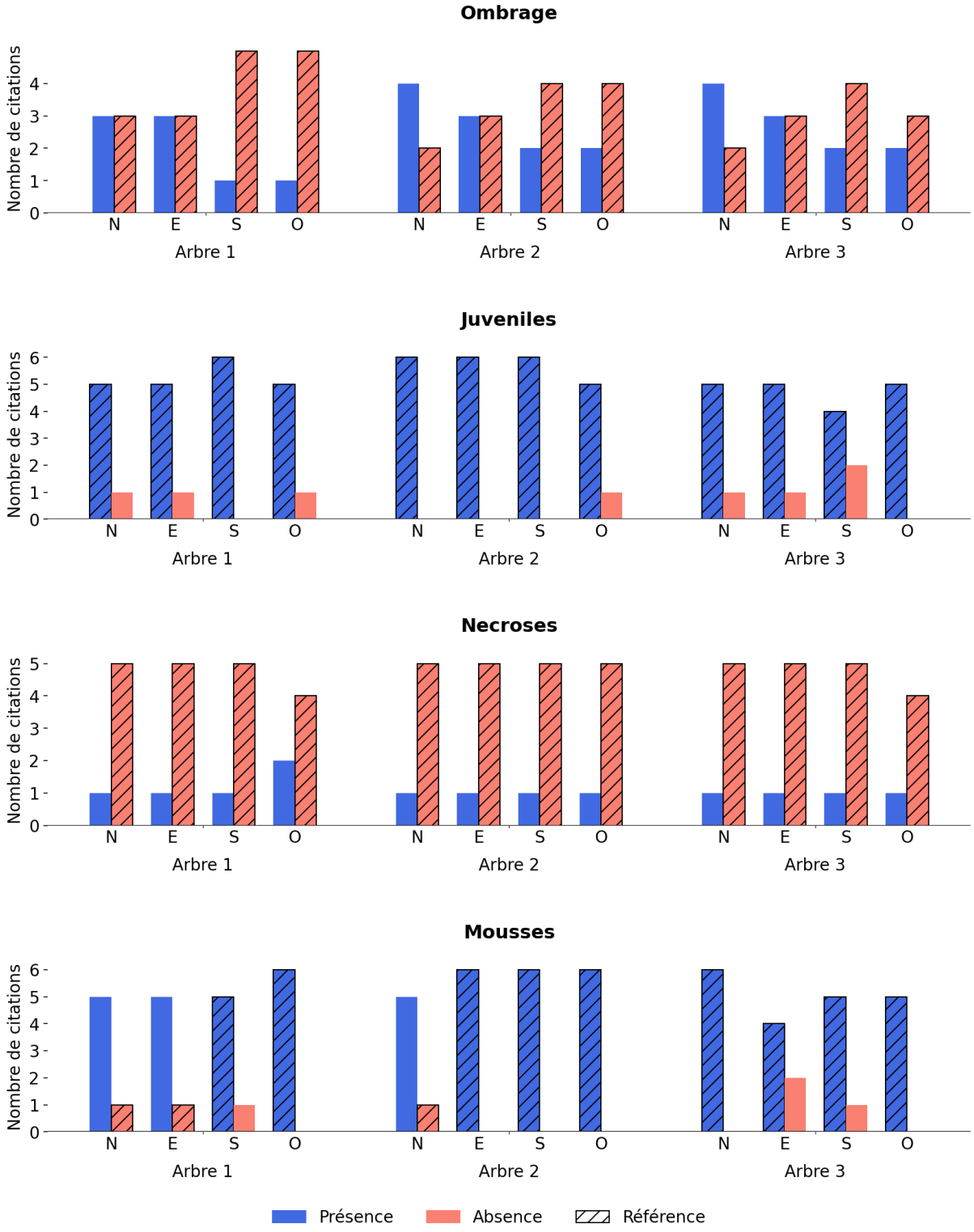


Figure 54 : Comparaison des réponses des groupes de participants aux quatre premières questions de la fiche de relevé (ombre permanente, lichens juvéniles, lichens nécrosés et mousses) avec les réponses de référence, pour chaque face de chaque arbre du scénario 1.

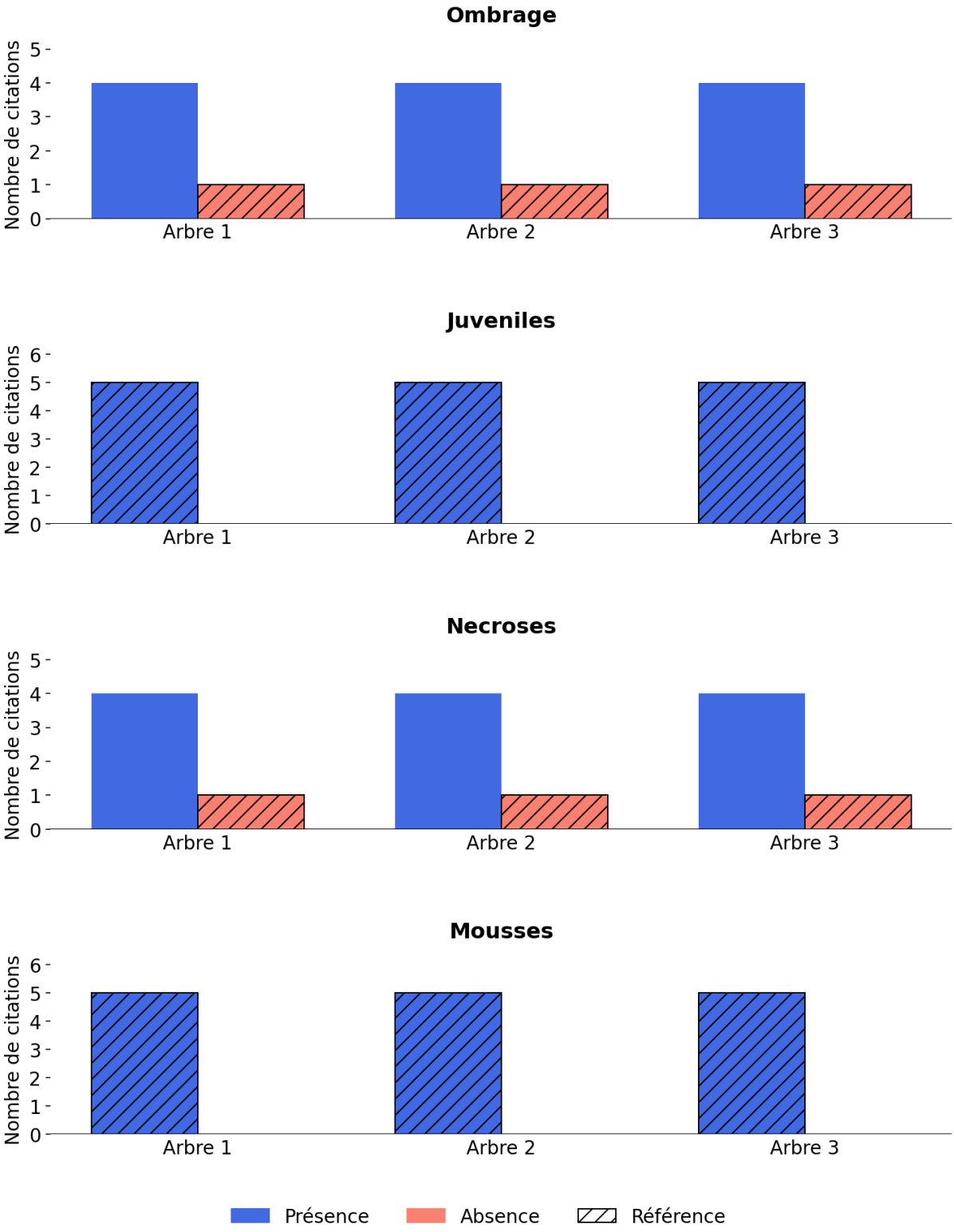


Figure 55 : Comparaison des réponses des groupes de participants aux quatre premières questions de la fiche de relevé (ombre permanente, lichens juvéniles, lichens nécrosés et mousses) avec les réponses de référence, pour chaque arbre du scénario 2.

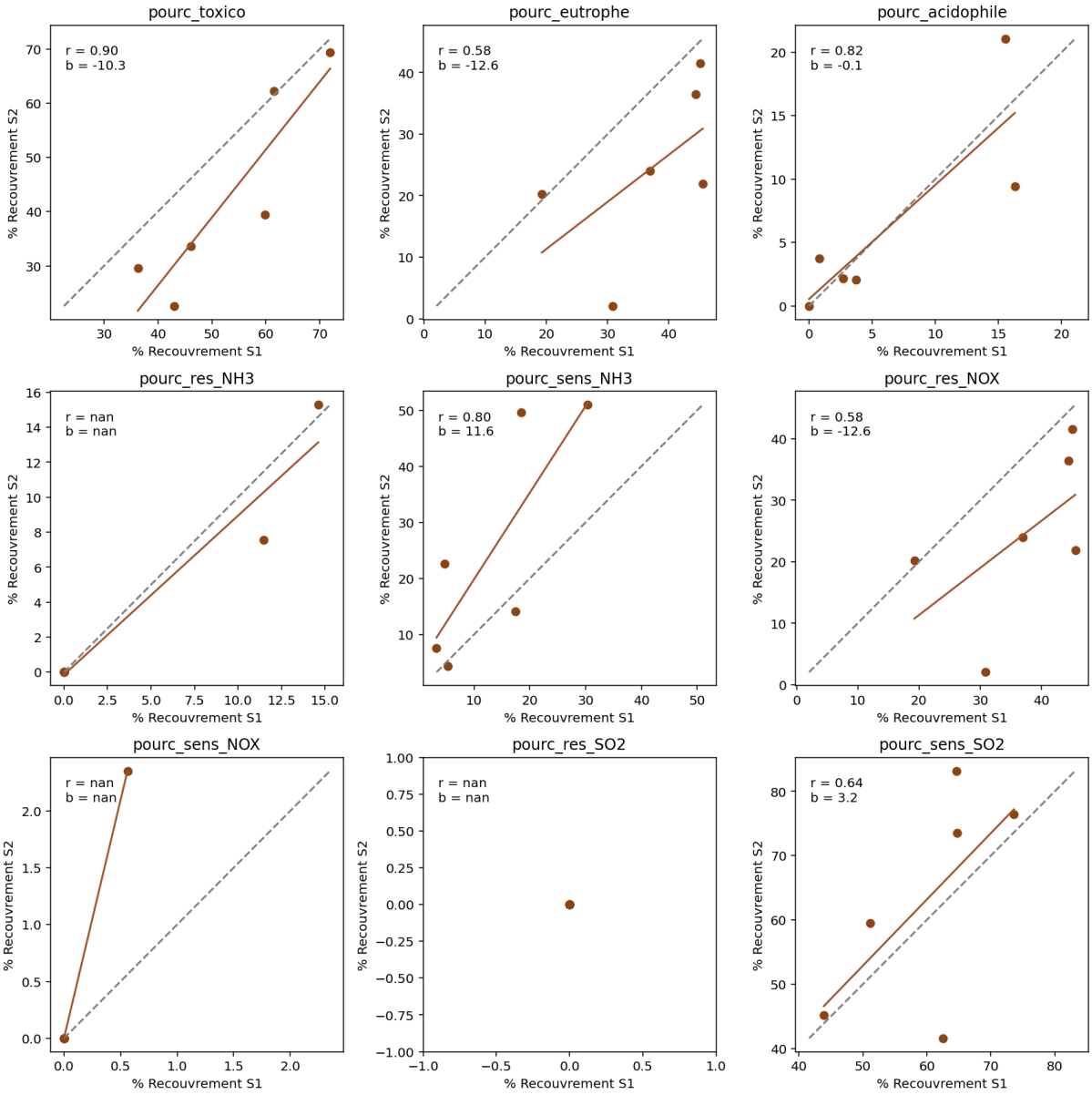


Figure 56 : Comparaison des valeurs des différents indices écologiques calculés à partir des estimations de recouvrement obtenues dans les scénarios 1 et 2 pour le site de Louvain-la-Neuve. Les coefficients de corrélation (r) et les biais moyens sont indiqués pour chaque indice.

Proposition d'un protocole simplifié pour le programme de sciences participatives Lichens GO

Héléna Snoeck

La qualité de l'air demeure une préoccupation environnementale et sanitaire importante qu'il est nécessaire de surveiller. Les limites des mesures conventionnelles ouvrent la voie au développement de nouvelles méthodes, telle que la bioindication par les lichens. Cette méthode peut s'étendre au travers de programmes de sciences participatives comme Lichens GO. Cependant, son protocole reste, aujourd'hui encore, trop complexe pour certains publics, tels que les scolaires et les novices. L'objectif de ce mémoire est par conséquent de proposer une version simplifiée du protocole actuel : (1) en identifiant au travers d'une enquête les difficultés rencontrées et (2) en concevant et en testant des scénarios de modifications pour y répondre. Les retours des participants ont montré que les plus gros problèmes résidaient au niveau de la longueur de l'activité ainsi qu'au niveau de la difficulté d'identification des taxa. Dans le but d'y répondre, deux changements principaux ont été retenus : une réduction du nombre de taxa de 35 à 10, ainsi qu'un changement de la méthode de quantification du recouvrement, passant du quadrat à une estimation visuelle par échelle à quatre classes. La réduction du nombre de taxa, évaluée quantitativement par dégradation de jeux de données, a montré une dégradation de certains indices mais une conservation possible de certains autres. La comparaison des erreurs obtenues à partir de combinaisons de 10 taxa a également pu situer le choix posé comme relativement bon. L'évaluation de la méthode de quantification s'est appuyée sur une série de tests réalisés auprès de participants (scolaires et non-scolaires), à distance et à Louvain-la-Neuve. Les participants ont appliqué deux scénarios se distinguant par la méthode d'estimation du recouvrement, permettant de recueillir leurs ressentis par rapport aux modifications proposées. Les deux scénarios se sont montrés plus rapides et plus accessibles, chacun présentant ses propres forces et faiblesses. Les relevés réalisés sur un même site à Louvain-la-Neuve ont ensuite été comparés entre groupes, entre participants et expert, et entre scénarios, mettant en avant une subsistance de variations inter-groupes et des écarts relativement importants à la réalité. L'ensemble de ces résultats a finalement permis d'affiner la réflexion autour du protocole simplifié.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
Faculté des bioingénieurs
Croix du Sud, 2 bte L7.05.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/agro**