

**OBSERVATOIRE ÉCOLICHÉNIQUE**

# SURVEILLANCE DE LA QUALITÉ DE L'AIR PAR L'OBSERVATION DES PEUPLEMENTS DE LICHENS ÉPIPHYTIQUES

QUALITÉ DE L'AIR

**D'ËMWELTVERWALTUNG**

Am Déngscht vu Mënsch an Ëmwelt



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère de l'Environnement, du Climat  
et de la Biodiversité

Administration de l'environnement

# BIOMONITOR

CONSEIL & EXPERTISE  
EN ENVIRONNEMENT



LE GOUVERNEMENT  
DU GRAND-DUCHÉ DE LUXEMBOURG  
Ministère de l'Environnement, du Climat  
et de la Biodiversité

Administration de l'environnement

## RESEAU NATIONAL DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DE L'AIR PAR L'OBSERVATION DES PEUPELEMENTS DE LICHENS EPIPHYTIQUES

Observatoire écolichénique

Quatrième et cinquième relevés en 2017 et en 2021



*Punctelia borrieri*

ADMINISTRATION DE L'ENVIRONNEMENT

Unité Surveillance et Evaluation de l'Environnement

1, Avenue du Rock'n'roll

L-4361 ESCH-SUR-ALZETTE

**SOMMAIRE**

<b>1. Cadre général et objectifs</b>	4
<hr/>	
<b>2. Fondements du diagnostic écolichénique</b>	
2.1. Présentation générale	5
2.2. Lichens et qualité de l'environnement	5
2.3. Biosurveillance lichénique	5
<hr/>	
<b>3. Méthodes et moyens techniques</b>	
3.1. Inventaire des peuplements de lichens	6
3.2. Procédures standardisées	6
3.3. Indices de qualité écophysiological et autres indicateurs	7
3.4. Taxonomie lichénique	7
3.5. Réalisation des relevés	7
<hr/>	
<b>4. Réseau d'observation écolichénique</b>	
4.1. Présentation du réseau de stations	8
4.2. Localisation et marquage des arbres	8
4.3. Tournées d'inspection et mises à jour du réseau d'observation	9
<hr/>	
<b>5. Inventaire lichénique</b>	
5.1. Liste de référence de taxons lichéniques et liste étendue	12
5.2. Inventaire d'ensemble du réseau	15
<hr/>	
<b>6. Indice de la qualité de l'air</b>	
6.1. Procédure pratique	17
6.2. Interprétation des données	18
6.3. Résultats et commentaires	19
6.4. Appréciation de synthèse	22

---

---

<b>7. Biodiversité lichénique</b>	
7.1. Procédure pratique	24
7.2. Biodiversité par station	25
7.3. Biodiversité moyenne par arbre	26
7.4. Appréciation de synthèse	27

---

<b>8. Indices de qualité écophysiological</b>	
8.1. Procédure pratique	27
8.2. Indice de toxisensibilité	29
8.3. Indice d'acido-basicité	30
8.4. Indice trophique	32
8.5. Indice thermique	33

---

<b>9. Indication de changement climatique</b>	
9.1. Procédure pratique	35
9.2. Indice climatique 1	36
9.3. Indice climatique 2	37
9.4. Sensibilité de l'indice climatique 2	37

---

<b>10. Contributions spécifiques</b>	
10.1. Procédure pratique	38
10.2. Contribution spécifique d'acido-basicité	40
10.3. Contribution spécifique d'eutrophisation	41
10.4. Contribution spécifique d'indication de changement climatique	42
10.5. Synthèse des contributions spécifiques	42

---

<b>11. Synthèse et conclusion</b>	43
-----------------------------------	----

---

<b>Références bibliographiques</b>	47
------------------------------------	----

---

<b>Liste des annexes</b>	48
--------------------------	----

---

## 1. CADRE GENERAL ET OBJECTIFS

---

En 2005, le Département Air/bruit de l'Administration de l'environnement, actuellement Unité surveillance et évaluation de l'environnement, a initié la mise en place d'un **réseau de suivi de la qualité de l'air** sur la base de l'observation des peuplements de lichens qui se développent de façon naturelle sur les troncs d'arbres [1]. L'observatoire écolichénique présente deux pôles d'intérêt principaux : (1) il rend compte de la qualité de l'environnement ambiant dans sa globalité et (2) il intègre de façon dynamique les changements qui interviennent dans le milieu atmosphérique sur le moyen et sur le long terme. De très nombreuses villes et régions à l'échelle de l'Europe se sont dotées de ce type d'outil pour réaliser un suivi de la qualité de l'environnement, comme en témoignent les multiples références disponibles sur Internet.

L'**observatoire écolichénique du Luxembourg** est composé d'un ensemble de huit stations, réparties principalement dans la moitié sud du pays. Chacune des placettes est représentée par six arbres. Au départ, les 48 arbres ont été répertoriés de façon précise et ont fait l'objet d'un marquage afin de pouvoir réaliser des inventaires répétés dans des conditions strictement équivalentes. Préalablement à chaque nouveau relevé, le réseau est inspecté et remis à jour, le cas échéant par le remplacement à l'équivalent des arbres manquants.

Après l'inventaire initial en juin 2005 [1], quatre campagnes de relevés ont été réalisées : en 2009 [2], en 2013, année à laquelle la commune de Schifflange s'est jointe au projet [3], en 2017 et en 2021. Dans l'esprit d'un observatoire de la qualité de l'environnement au moyen de la flore lichénique, un intervalle de **quatre ans entre deux relevés** doit être jugé comme approprié : il est, d'une part, suffisamment long vis-à-vis de l'inertie naturelle de la dynamique des peuplements lichéniques et, d'autre part, suffisamment court pour ne pas risquer d'omettre des étapes essentielles dans des évolutions progressives.

L'**objectif** de ce quatrième compte rendu, qui regroupe les inventaires de 2017 et de 2021, consiste à évaluer la qualité globale du compartiment atmosphérique en 2021 et à caractériser les évolutions dans l'espace et dans le temps par la comparaison avec les relevés antérieurs de 2005, 2009, 2013 et 2017, soit désormais sur une durée de 16 ans.

## **2. FONDEMENTS DU DIAGNOSTIC ECOLICHENIQUE**

---

### **2.1. Présentation générale**

Le diagnostic écolichénique est une méthode biologique d'évaluation de la qualité globale de l'air ambiant fondée sur la diversité et les caractéristiques écophysologiques des peuplements de lichens qui colonisent les troncs d'arbres.

### **2.2. Lichens et qualité de l'environnement**

Les lichens sont des organismes complexes formés par une association permanente entre un champignon et une algue. Il existe de nombreuses espèces différentes, capables de coloniser les milieux les plus divers. Des observations menées depuis les années 1950 ont montré que parmi les lichens, particulièrement ceux qui colonisent les troncs d'arbres (épiphytes), certaines espèces étaient sensibles et d'autres moins sensibles à des changements dans leur environnement immédiat. Lorsque les conditions du milieu se dégradent, notamment en raison de la pollution de l'air ambiant, les espèces disparaissent progressivement en fonction de leur sensibilité. D'autres espèces plus résistantes peuvent alors proliférer jusqu'à ce que l'environnement change de nouveau et que des espèces plus adaptées aux nouvelles conditions écophysologiques prennent voire reprennent leur place. Par une simple observation des peuplements de lichens à un endroit donné, il est donc possible de tirer des conclusions quant à la qualité de l'air ambiant et plus généralement des conditions environnementales dans leur ensemble.

La synthèse de ces observations a donné lieu à des procédures méthodologiques harmonisées d'appréciation de la qualité du compartiment atmosphérique. Toutes les méthodes retenues à un niveau international préconisent l'observation des espèces de lichens épiphytes. Des procédures normées ont été élaborées dans de nombreux pays (dont la France, l'Allemagne, l'Italie et la Grande-Bretagne). Un travail de synthèse a été finalisé en 2014 par le Comité européen de normalisation (CEN) sous la forme d'une norme européenne [4].

### **2.3. Biosurveillance lichénique**

Le diagnostic écolichénique fournit une appréciation de la qualité de l'air en intégrant l'influence exercée sur l'écosystème par les pollutions diverses en fonction des caractéristiques (micro)climatiques locales.

Les principaux atouts de la biosurveillance lichénique sont de cinq ordres :

- l'information n'est pas ponctuelle mais intégrée dans le temps, la situation actuelle étant la résultante d'un ensemble d'événements - dégradation ou amélioration - survenus dans un passé local plus ou moins récent,
- l'évaluation reflète une modification globale de l'écosystème, c'est-à-dire l'impact biologique de l'association d'un mélange complexe de polluants et de facteurs microclimatiques,

- le suivi peut être effectué à de nombreux points répartis sur un territoire plus ou moins étendu (ville, commune, région), chaque observation étant spécifique pour l'endroit précis du relevé,
- la méthode est didactique et accessible à un large public, car la compréhension ne nécessite pas de connaissances préalables ni en biologie ni en chimie,
- l'absence d'appareillage sophistiqué maintient le coût à un niveau très raisonnable.

De par sa nature, le diagnostic écolichénique présente deux caractéristiques particulièrement intéressantes. D'une part, il vise une échelle de temps relativement importante, car la disparition ou, *a fortiori*, la recolonisation d'espèces (phénomène d'hystérésis) ne se fait que de façon très progressive. Cette inertie fait que la technique est particulièrement attrayante pour une surveillance à moyen et à long terme. D'autre part, l'inventaire lichénique s'intéresse à une échelle géographique très locale, ce qui permet d'obtenir une vision discriminante de la qualité de l'air sur un territoire d'une étendue restreinte.

### **3. METHODES ET MOYENS TECHNIQUES**

---

#### **3.1. Inventaire des peuplements de lichens**

Le relevé lichénique dans une unité d'observation donnée est défini comme un ensemble de taxons (agrémentés d'une appréciation quantitative ou semi-quantitative) capables de se développer ou du moins de se maintenir à l'endroit considéré, objectivant ainsi une adéquation suffisante entre les besoins écophysiologiques du cortège des espèces présentes et les conditions spécifiques de l'environnement local.

Il est important de souligner que l'inventaire lichénique est totalement séparé et indépendant de toute interprétation. Cela signifie en particulier que, moyennant l'application d'outils adaptés, les matrices de données actuelles et passées pourront être interprétées en fonction des changements futurs de la qualité de l'air. L'observatoire écolichénique présente de ce fait un pouvoir intrinsèque de rétrospection et donc de suivi d'une évolution.

#### **3.2. Procédures standardisées**

Lors de la mise en place de l'observatoire écolichénique en 2005, la procédure allemande VDI 3957/13 a été choisie comme référence pour l'acquisition de données standardisées [5]. Les principales raisons qui ont guidé ce choix ont été explicitées dans les comptes-rendus précédents [1, 2 et 3]. Elles tiennent pour l'essentiel à l'intégration d'un travail de synthèse réalisé préalablement à une échelle européenne et à la proximité géographique et donc climatique vis-à-vis du Luxembourg.

Avec la publication d'une méthode à portée européenne [4] par le Comité Européen de Normalisation (CEN) <sup>1</sup> en mars 2014, la norme européenne devient la nouvelle référence. D'un point de vue pratique, les procédures décrites dans la norme EN 16413 restent suffisamment proches des anciennes normes nationales, y compris de la norme allemande VDI 3957/13, pour valider les relevés effectués dans le cadre de cet observatoire écolichénique avant la finalisation de la norme européenne, soit en 2005, 2009 et en 2013.

### 3.3 Indices de qualité écophysiologique et autres indicateurs

Le deuxième axe d'interprétation reconduit depuis 2005 met en œuvre des indices écophysiologiques. Ceux-ci exploitent les propriétés bio-indicatrices individuelles des différents taxons qui composent un cortège lichénique. A chaque taxon est associée une cote qui traduit une qualité identifiée, comme son potentiel de résistance à la pollution globale de l'air, son positionnement dans la gamme d'acido-basicité, sa tolérance à l'azote ou ses besoins thermiques. Ce dernier critère prend de plus en plus d'importance, dès lors que les lichens sont également proposés comme des indicateurs du dérèglement climatique. Sur la base de cette appréciation, de nouveaux descripteurs sont proposés pour adapter et réorienter l'observatoire écolichénique vers les enjeux actuels et futurs.

### 3.4. Taxonomie lichénique

En matière de taxonomie lichénique, la flore de Diederich et Sérusiaux est utilisée comme référence [6]. La flore de Van Haluwyn et Asta est employée en complément [7]. Il est important de préciser que la taxonomie des lichens est loin d'être fixée, ce qui implique non seulement des changements dans les noms scientifiques, mais également des modifications à l'intérieur même des taxons. Ainsi, par exemple, le genre *Melanelia* a été scindé en trois nouveaux genres, à savoir *Melanelia*, *Melanelixia* et *Melanohalea*. L'espèce *Punctelia subrudecta* (anciennement *Parmelia subrudecta*) a été subdivisée en trois nouvelles espèces qui sont *Punctelia borrhieri*, *Punctelia jeckeri* et *Punctelia subrudecta*. Alors qu'un changement de dénomination d'un taxon bien identifié peut être intégré sans difficulté, il n'est pas possible d'effectuer une différenciation rétrospective de plusieurs nouveaux taxons à partir d'un ancien. Sur cet aspect particulier, il n'y a pas d'autre choix que de maintenir les inventaires correspondants inchangés.

### 3.5. Réalisation des relevés

Les relevés du quatrième inventaire lichénique ont été effectués les 20, 21 et 22 septembre, puis les 4 et 5 octobre 2017 en compagnie d'un lichénologue confirmé, Monsieur Norbert Stapper. La cinquième campagne a été réalisée en présence du même expert entre le 23 et le 27 août 2021.

Précisons que les trois relevés précédents avaient été confiés à Monsieur Dietmar Teuber, un autre spécialiste en lichénologie. Comme ces deux personnes ont suivi des cursus équivalents, il est pertinent d'admettre que l'influence sur les inventaires liée aux opérateurs est minimale.

---

<sup>1</sup> BioMonitor a fait partie du groupe de travail correspondant (CEN TC 264 / WG 31).

---

## 4. RESEAU D'OBSERVATION ECOLICHENIQUE

---

### 4.1 Présentation du réseau de stations

Le réseau de stations de l'observatoire écolichénique a été défini à l'occasion des inventaires initiaux de 2005 [1]. Il est composé de huit placettes dont certaines ont été choisies à l'intérieur d'agglomérations importantes et d'autres à proximité de petites localités (**figure 1**) :

- Beckerich (Be)
- Dudelange (Du)
- Esch-sur-Alzette (Es)
- Grosbous (Gr)
- Luxembourg-Bonnevoie (L-Bo)
- Luxembourg-Merl/Hollerich (L-MH)
- Mondorf-les-Bains (Mo)
- Pétange (Pe)

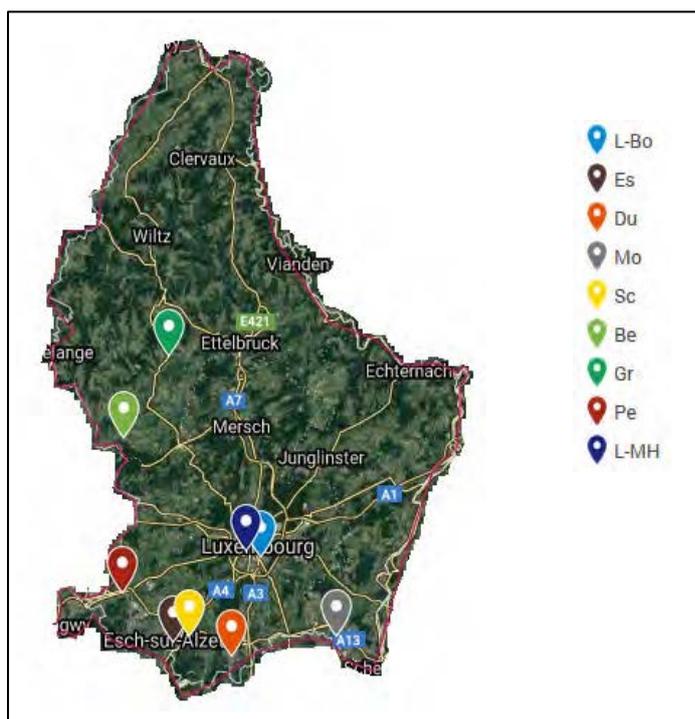
Les critères de choix des emplacements et les modalités de sélection des arbres ont été présentés en détail dans le compte-rendu de 2005 [1]. Rappelons ici que les six arbres que compte chacune des unités d'observation ont été choisis suivant deux principes : (1) la représentativité vis-à-vis de l'ambiance locale d'ensemble, à l'écart d'influences polluantes directes et (2) la bioindication à discrimination positive. Ce second critère signifie que les arbres retenus sont ceux qui portent le peuplement lichénique le plus développé en terme de diversité et de recouvrement. La stratégie équivaut à admettre que la qualité la plus représentative d'un endroit donné est la plus élevée possible.

En 2013, la commune de Schifflange (Sc) a proposé d'intégrer l'observatoire écolichénique moyennant une station supplémentaire sur son territoire. A cette fin, un relevé préparatoire avait été effectué en 2009 [8], en complément d'un inventaire actualisé par rapport à une cartographie lichénique réalisée en 1999 [9].

### 4.2. Localisation et marquage des arbres

Sur le terrain, les arbres du réseau sont identifiés par une plaquette métallique. Des vis de repérage sont fixées sur l'écorce aux quatre autres points cardinaux (sud, ouest, nord et est). Ce marquage se situe à environ un mètre du sol ; il est destiné à une stricte répétabilité des relevés lors des inventaires lichéniques successifs (voir 6.1).

La localisation des différents arbres est précisée sur des extraits de cartes topographiques (**annexe 1**) combinés à un positionnement GPS (**annexe 2**). Un complément d'identification sur le terrain est assuré par deux critères supplémentaires qui sont le genre de l'arbre et sa circonférence à 1,5 mètres du sol.



**Figure 1.**  
Localisation des neuf placettes du réseau de l'observatoire écolichénique.  
Fond de carte : © Carte routière Google Earth.

### 4.3. Tournées d'inspection et mises à jour du réseau d'observation lichénique

#### *Tournée d'inspection de 2017*

En 2017, deux arbres ont dû être retirés du réseau, étant donné qu'il n'a pas été possible de les remplacer dans les conditions d'équivalence à proximité (**tableau 1**). Il s'agit de l'érable n° 4 de la placette de Pétange qui avait perdu la totalité de la flore lichénique, sans doute à la suite d'un traitement herbicide et de l'érable n° 3 à Schiffflange qui a été abattu en raison d'un réaménagement routier.

Trois arbres ont également dû être remplacés en 2017. D'abord, le peuplier n° 1 de la placette de Dudelange, abattu pour des raisons de sécurité, a été substitué par un aulne situé à proximité. Ensuite, l'arbre n° 2 de la station de Mondorf-les-Bains, un tilleul abattu le long de l'Avenue Frantz Clément, a été remplacé par un érable légèrement en retrait vers l'Avenue des villes jumelées. Enfin, l'érable n° 2 à Schiffflange, fortement endommagé, a été remplacé par un autre érable du même alignement.

**Tableau 1.**

Synthèse des remplacements de phorophytes au sein de l'observatoire écolichénique.

Station d'observation écolichénique	Arbre n°	Année de remplacement	Phorophyte remplacé	Nouveau phorophyte
Dudelange	3	2009	ailante	ailante
	3	2013	ailante	tilleul
	1	2017	peuplier	aulne
	4	2021	érable	ailante
	6	2021	érable	érable
Grosbous	3	2021	tilleul	tilleul
Luxembourg-Bonnevoie	2	2009	tilleul	tilleul
	1	2021	tilleul	tilleul
	5	2021	orme	orme
Mondorf-les-Bains	2	2017	tilleul	érable
	1	2021	érable	érable
Pétange	2	2013	tilleul	tilleul
	4	2013	érable	érable
	4	2017	érable	/
	4	2021	/	érable
Schifflange	2	2017	érable	érable
	3	2017	érable	/

### *Tournée d'inspection de 2021*

En 2021, un total de six arbres a dû être remplacé. A Dudelange, l'érable n° 4 devant l'église a été abattu dans le cadre d'un projet de réaménagement du parvis. Il a été substitué par un ailante situé de l'autre côté de la chaussée. Sur la même placette, l'érable n° 6 a été très fortement colonisé par des mousses ; par mesure de précaution, il a été remplacé par un érable juste à côté. Sur la placette de Luxembourg-Bonnevoie, les arbres n° 1 et 5 (tilleul et orme) ont présenté une flore lichénique fortement endommagée pour des causes inconnues ; ils ont été substitués par des phorophytes de la même espèce à proximité immédiate. A Grosbous, le tilleul n° 3 situé à la sortie Est du village présentait des signes marqués de dépérissement. Un arbre équivalent en terme d'âge et de couverture lichénique a été sélectionné plus loin le long de la N 21 en direction d'Ettelbruck. Finalement, à Mondorf-les-Bains, l'érable n° 1 de l'allée Jean Linster a été abattu, sans doute en raison de son mauvais état sanitaire ; il a été remplacé par un arbre de la même espèce à proximité directe.

Les changements opérés en 2021 ont été complétés par la réintroduction de l'érable n° 4 de la placette de Pétange, dont l'écorce a présenté quatre ans après un possible traitement herbicide plusieurs thalles de différents taxons nouvellement formés. Par rapport à la possibilité de maintenir un nombre stable d'arbres, le déséquilibre généré par ce mouvement a été considéré comme mineur. En revanche, l'impossibilité d'un remplacement à qualité équivalente de l'érable n° 3 de la station de Schifflange a été confirmée. Pour assurer l'homogénéité du dispositif, les données antérieures associées à cet arbre ont été retirées de la base de données.

### *Synthèse à l'échelle du réseau*

Depuis la mise en place du réseau en 2005, seules trois placettes d'observation n'ont subi aucun changement : il s'agit de celles de Beckerich, d'Esch-sur-Alzette et de Luxembourg-Merl/Hollerich. Aux six autres stations, les modifications sont ponctuelles, comme à Grosbous, ou plus conséquentes, comme à Dudelange.

Etant donné que chaque arbre abattu ou jugé déficient a pu être remplacé par un phorophyte équivalent (à une exception près à Schifflange) selon des critères d'espèce, d'âge, de conditions stationnelles et de couverture lichénique, il est pertinent de considérer que le réseau a pu être maintenu rigoureusement homogène lors des inventaires successifs sur une durée de 16 ans.

### *Renouvellement des marquages*

Lors des tournées d'inspection successives, les fixations des placettes métalliques et les quatre vis servant de repères au positionnement de la grille de lecture sont systématiquement renouvelées. La plaquette elle-même est remplacée selon les besoins. Son contenu informatif ainsi que son aspect *in situ* sont illustrés sur la **figure 2**.

Il est utile de préciser que les marquages ont toujours été retrouvés en vue de la campagne suivante, c'est-à-dire au bout de quatre ans. Sur plusieurs arbres à croissance rapide, les plaquettes peuvent être distendues et les fixations devenir lâches. Concernant les vis de repérage, la croissance du tronc peut mener à leur intériorisation complète dans la biomasse ligneuse. L'endroit précis est alors repérable sur la base d'une cicatrisation particulière qui laisse un cône de fermeture au-dessus de la vis. Le repérage se fait alors aisément au moyen d'un détecteur de métal.

### *Actualisation des paramètres de localisation et d'identification*

Lors du renouvellement des marquages, les coordonnées GPS ont fait l'objet d'une vérification et, si nécessaire, d'une mise à jour. L'actualisation des données biologiques des phorophytes a montré que, sur l'intervalle de quatre ans, tous les arbres du réseau ont augmenté de circonférence sauf deux tilleuls : l'arbre n° 2 de la placette de Beckerich et l'arbre n° 6 de la station de Mondorf-les-Bains. Il est intéressant de noter que la croissance est plus marquée pour les arbres jeunes que pour les individus plus âgés et pour ceux qui se trouvent dans les conditions écophysologiques les plus favorables (**annexe 2**).



**Figure 2.**

Plaquette métallique fixée aux arbres du réseau de l'observatoire écolichénique.

## 5. INVENTAIRE LICHENIQUE

### 5.1. Liste de référence de taxons lichéniques et liste étendue

Dans l'objectif d'assurer au mieux la fiabilité et la répétabilité des relevés successifs, l'inventaire des peuplements lichéniques s'appuie sur une liste de référence fixe, formée d'un total de 78 taxons (**tableau 2**). Cette liste a été maintenue inchangée par rapport à celle de 2009 [2], si ce n'est que les nouvelles dénominations taxonomiques ont été intégrées (voir 3.4). Rappelons qu'une révision avait été réalisée en 2009 par rapport à l'inventaire initial de 2005 [1].

Le terme de taxon, tel qu'il est employé ici, désigne à la fois des espèces identifiées de façon individuelle et des groupes de deux ou plusieurs espèces apparentées ou proches qu'il n'est pas possible de distinguer *in situ* par des moyens simples. Pour des espèces regroupées, le nom scientifique est suivi de la désignation « gr » pour groupe.

Les différents taxons retenus sont caractérisés par trois propriétés fondamentales : (1) leurs qualités indicatrices sont bien établies, (2) ils sont naturellement communs, c'est-à-dire qu'ils colonisent les écorces d'arbres dès lors que les conditions spécifiques à leur développement sont réunies et (3) ils sont identifiables avec une assurance suffisante par un lichénologue confirmé.

Pour tenir compte des évolutions actuelles et futures en matière de bioindication lichénique, la liste de référence est complétée par une seconde liste composée de taxons indicateurs de changement climatique (**tableau 3**). Cette liste reprend 40 des 45 taxons répertoriés dans la norme VDI 3957/20 [10], les cinq autres figurant déjà dans l'inventaire de base. 14 autres taxons sont ajoutés à partir de la publication scientifique de Schmitz et *al.* [11], portant ainsi le dispositif à un total de 132 espèces ou taxons.

**Tableau 2.**

Liste de référence de l'observatoire écolichénique composée de 78 espèces (ou groupes d'espèces).

<i>Amandinea punctata</i>	<i>Parmelia saxatilis</i>
<i>Anaptychia ciliaris</i>	<i>Parmelia sulcata</i>
<i>Bryoria fuscescens</i>	<i>Parmelina pastillifera</i>
<i>Buellia griseovirens</i>	<i>Parmelina tiliacea</i>
<i>Caloplaca cerina</i>	<i>Parmeliopsis ambigua</i>
<i>Caloplaca citrina</i> *	<i>Parmotrema perlatum</i> **
<i>Caloplaca herbidella</i>	<i>Pertusaria albescens</i>
<i>Caloplaca holocarpa</i> *	<i>Pertusaria amara</i>
<i>Candelaria concolor</i>	<i>Pertusaria coccodes</i>
<i>Candelariella reflexa/xanthostigma</i>	<i>Pertusaria flavida</i>
<i>Candelariella vitellina</i>	<i>Pertusaria hemisphaerica</i>
<i>Cladonia sp.</i>	<i>Pertusaria pertusa</i>
<i>Evernia prunastri</i>	<i>Phaeophyscia nigricans</i> *
<i>Flavoparmelia caperata</i> **	<i>Phaeophyscia orbicularis</i> *
<i>Flavopunctelia flaventior</i>	<i>Phlyctis argena</i>
<i>Hypocenomyce scalaris</i>	<i>Physcia adscendens</i> *
<i>Hypogymnia physodes</i>	<i>Physcia aipolia</i>
<i>Hypogymnia tubulosa</i>	<i>Physcia caesia</i> *
<i>Hypotrachyna revoluta</i> **	<i>Physcia dubia</i> *
<i>Lecanora carpinea</i> (gr)	<i>Physcia stellaris</i>
<i>Lecanora conizaeoides</i>	<i>Physcia tenella</i> *
<i>Lecanora dispersa</i> (gr) *	<i>Physconia distorta</i> *
<i>Lecanora expallens</i>	<i>Physconia enteroxantha</i>
<i>Lecanora muralis</i> *	<i>Physconia grisea</i> *
<i>Lecanora pulicaris</i>	<i>Physconia perisidiosa</i>
<i>Lecanora saligna</i>	<i>Platismatia glauca</i>
<i>Lecanora subfusca</i> (gr)	<i>Pleurosticta acetabulum</i>
<i>Lecanora symmicta</i>	<i>Pseudevernia furfuracea</i>
<i>Lecidella elaeochroma</i>	<i>Punctelia subrudecta</i> (gr) **
<i>Lepraria incana</i> (gr)	<i>Ramalina farinacea</i>
<i>Lobaria pulmonaria</i>	<i>Ramalina fastigiata</i>
<i>Melanohalea elegantula</i> **/exasperatula	<i>Ramalina fraxinea</i>
<i>Melanohalea exasperata</i>	<i>Rinodina sp.</i> *
<i>Melanelixia glabra</i>	<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>
<i>Melanelixia glabratula</i>	<i>Tuckermanopsis chlorophylla</i>
<i>Melanelixia subargentifera</i>	<i>Usnea sp.</i>
<i>Melanelixia subaurifera</i>	<i>Xanthoria candelaria</i> (gr) *
<i>Ochrolechia androgyna</i>	<i>Xanthoria parietina</i> *
<i>Ochrolechia turneri/microstictoides</i>	<i>Xanthoria polycarpa</i> *

\* : taxons indicateurs d'eutrophisation suivant la norme VDI 3957/13 [5]

\*\* : taxons indicateurs de changement climatique suivant la norme VDI 3957/20 [10]

gr : groupe (voir explications dans le texte)

**Tableau 3.**

Liste des 54 espèces de lichens indicateurs de changement climatique, ajoutées en 2021.

<i>Alyxoria ochrocheila</i>	<i>Opegrapha vermicillifera</i>
<i>Arthonia pruinata</i>	<i>Parmelia submontana</i>
<i>Arthonia ruana</i>	<i>Parmelina quercina</i>
<i>Bacidina neosquamulosa</i>	<i>Parmotrema pseudoreticulatum</i>
<i>Bactrospora dryina</i>	<i>Parmotrema reticulatum</i>
<i>Collema fasciculare</i>	<i>Parmotrema stuppeum</i> *
<i>Coniocarpon cinnabarinum</i>	<i>Pertusaria hymenea</i>
<i>Degelia plumbea</i>	<i>Pertusaria trachythallina</i>
<i>Dendrographa decolorans</i>	<i>Phaeographis inusta</i>
<i>Diploicia canescens</i>	<i>Phaeophyscia endophoenicea</i> *
<i>Enterographa crassa</i> *	<i>Physcia clementi</i> *
<i>Felhanera bouteillei</i>	<i>Physcia tribacia</i> *
<i>Flavoparmelia soredians</i>	<i>Physcia tribacioides</i>
<i>Fuscidea lightfootii</i>	<i>Physciella chloantha</i> *
<i>Graphis elegans</i>	<i>Porina leptalea</i>
<i>Halecania viridescens</i>	<i>Punctelia borreri</i>
<i>Hyperphysia adglutinata</i> *	<i>Punctelia jeckeri</i>
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>	<i>Pyrenula nitida</i>
<i>Hypotrachyna laevigata</i>	<i>Pyrenula nitidella</i>
<i>Jamesiella anastomosans</i> *	<i>Rapalospora viridis</i>
<i>Lecanographa amylacea</i>	<i>Scoliciosporum gallurae</i> *
<i>Lecanora barkmaniana</i> *	<i>Strigula affinis</i> *
<i>Lecanora hybocarpa</i>	<i>Strigula jamesii</i> *
<i>Melanohalae laciniatula</i>	<i>Thelenella modesta</i> *
<i>Micarea adnata</i>	<i>Thelotrema lepadinum</i>
<i>Micarea viridileprosa</i>	<i>Usnea florida</i>
<i>Nephroma laevigatum</i>	<i>Xanthoria calcicola</i> *

\* : taxons de la publication de Schmitz et al. [11]

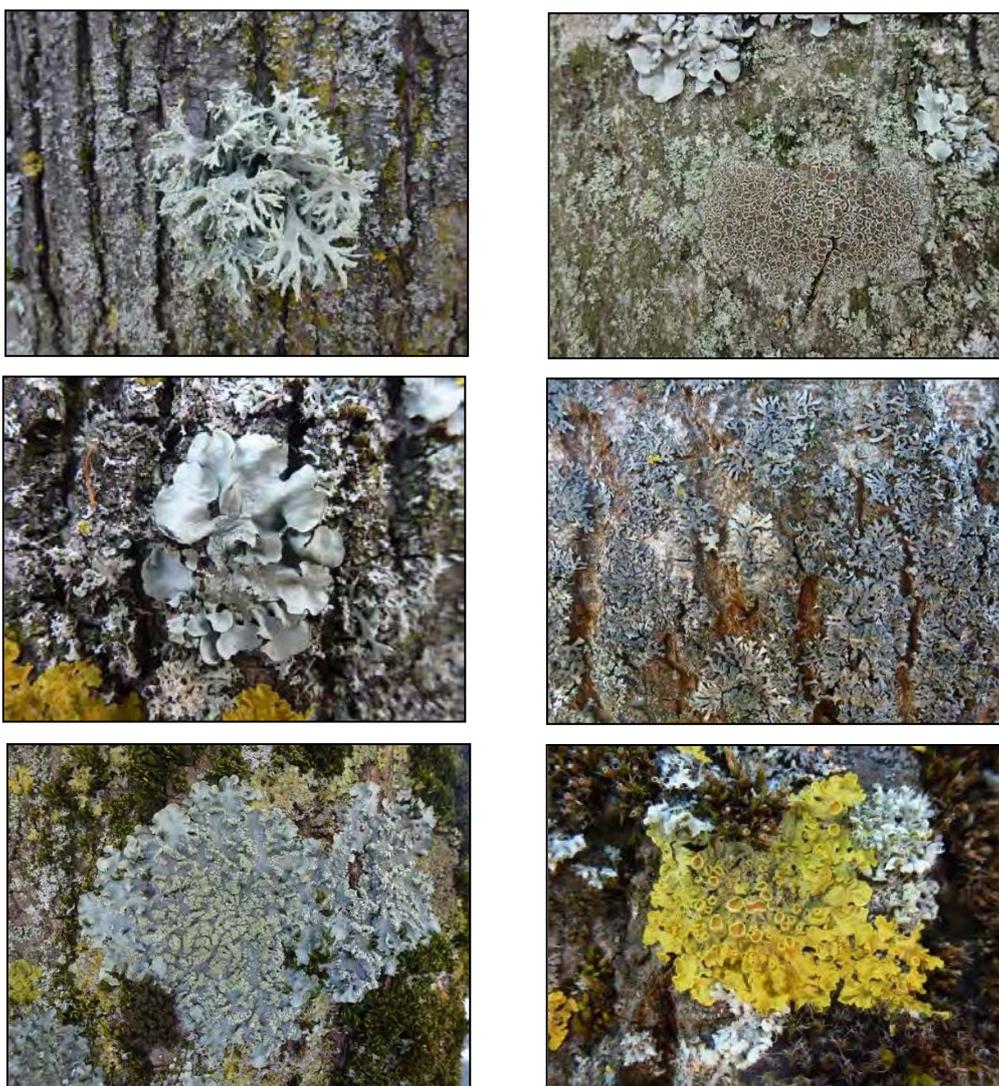
Les modalités pratiques de l'inventaire lichénique ainsi adoptées peuvent sembler quelque peu complexes, mais il est important, pour cet observatoire à moyen et long terme, de s'organiser au mieux, au risque de devoir réajuster la méthodologie à chaque nouvelle campagne <sup>2</sup>.

Le relevé de 2021 a été effectué en associant les deux listes. Pour le suivi à moyen terme depuis 2005, l'interprétation comparative et rétrospective dans l'espace et dans le temps s'appuie, dans la continuité des campagnes précédentes, sur la liste de référence des 78 taxons. En vue de l'intégration de nouveaux concepts, notamment sur la thématique du changement climatique, c'est dorénavant la liste étendue de 132 taxons qui est appliquée.

<sup>2</sup> L'effort ainsi engagé explique en grande partie le délai de la remise du présent compte rendu.

## 5.2. Inventaire d'ensemble du réseau

Parmi les 78 taxons de la liste de référence, 62 (79 %) ont été recensés à l'échelle du réseau. En revanche, 16 taxons (21 %) n'ont jamais été identifiés au cours des cinq relevés successifs. Les raisons en sont multiples : certaines espèces sont naturellement très rares comme *Melanelia subargentifera* et *Parmelina pastillifera* ; d'autres sont particulièrement sensibles à la pollution de l'air ambiant comme *Lobaria pulmonaria* et *Melanelia exasperata*. *Bryoria fuscescens* et *Parmeliopsis ambigua* sont inféodés à des milieux spécifiques en tant que lichens acidophiles et nitrophobes. A titre d'illustration, quelques espèces caractéristiques de la flore lichénique recensée sont présentées sur la **figure 3**.

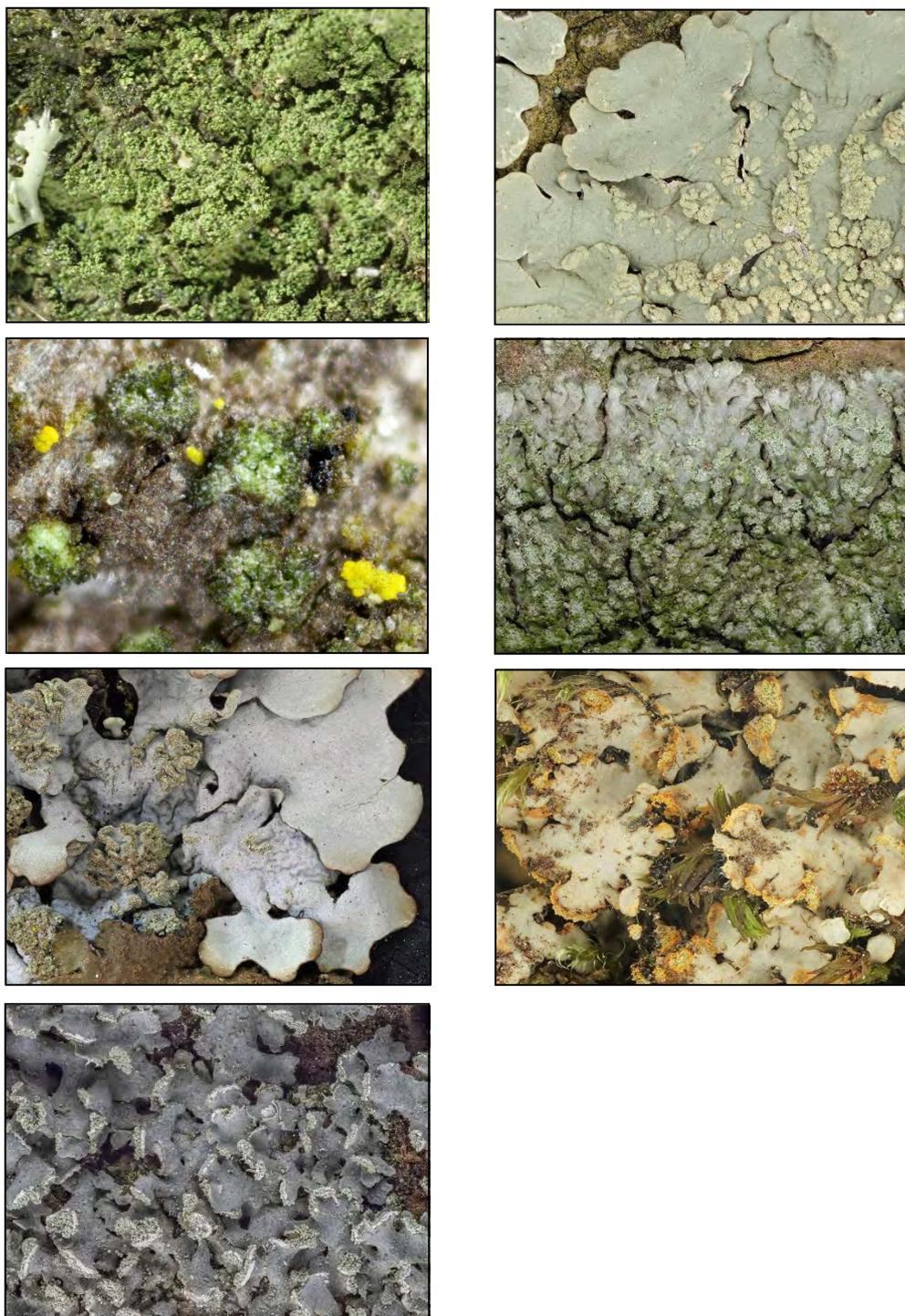


**Figure 3.**

Espèces caractéristiques de la flore lichénique du Luxembourg.

De gauche à droite et de haut en bas : *Evernia prunastri*, *Lecanora subfusca* (gr), *Parmotrema perlatum*, *Phaeophyscia orbicularis*, *Punctelia subrudecta*, *Xanthoria parietina*.

Parmi les 54 taxons indicateurs de changement climatique, seuls neuf ont été recensés lors de l'inventaire de 2021 (**figure 4**).



**Figure 4.**

Espèces indicatrices de changement climatique recensées à l'occasion de l'inventaire de 2021. De gauche à droite et de haut en bas : *Bacidina neosquamulosa*, *Flavoparmelia soredians*, *Halecania viridescens*, *Hypotrachyna adglutinata*, *Hypotrachyna afrorevoluta*, *Phaeophyscia endophoenicea* et *Physciella chloantha*.



**Figure 4 (suite).**

A gauche : *Punctelia borrieri*, à droite : *Punctelia jeckeri*.

## 6. INDICE DE LA QUALITE DE L'AIR

### 6.1. Procédure pratique

La procédure normée européenne EN 16413 [4], comme les normes nationales auparavant, s'appuie sur la diversité taxonomique des cortèges lichéniques. Le relevé sur les arbres est réalisé au moyen d'une grille de lecture verticale de 50 cm de hauteur sur 10 cm de largeur, divisée en 5 carrés de 10 cm de côté (**figure 5**).



**Figure 5.**

Grille de lecture de la flore lichénique et technique de l'inventaire ; la flèche indique la position de la vis de repérage.

La cote attribuée à chaque taxon identifié correspond au nombre de carrés dans lesquels il est présent. Cette opération est répétée suivant les quatre points cardinaux en positionnant la grille de façon à ce que le marquage se trouve chaque fois dans le coin droit en bas du carré inférieur. La matrice de données obtenue à chaque station est donc représentée par un inventaire de valeurs comprises entre 1 et 5, attribuée à chaque taxon recensé sur les quatre côtés des différents arbres qui composent la placette d'observation. Les relevés sont effectués successivement sur les six arbres de chacune des placettes.

D'un point de vue pratique, il est utile de souligner que malgré la pose des vis de repérage, la lecture ne couvre pas rigoureusement la même surface lors des inventaires successifs. En effet, les carrés de lecture dérivent avec la croissance du tronc des arbres et celle des lichens. Il est dès lors possible qu'un lichen donné rentre ou sorte de la plage de lecture d'une campagne à la suivante.

## 6.2. Interprétation des données

La norme européenne EN 16413 porte exclusivement sur l'acquisition de données et ne propose pas de modalités d'interprétation des résultats. Afin de pouvoir réaliser un suivi spatio-temporel, la solution la plus pertinente, à défaut d'alternative à ce stade, consiste à continuer à appliquer la procédure d'interprétation de la norme allemande VDI 3957/13 [5]. A ce titre, il est important de souligner que l'évaluation cible la qualité globale de l'air sous l'angle précis des caractéristiques eutrophisantes, liées principalement à la présence d'azote.

L'interprétation des données est réalisée suivant deux axes. Des calculs de fréquences sont effectués séparément pour les espèces dites de référence (*Referenzarten*), d'une part, et pour les espèces indicatrices d'eutrophisation (*Eutrophierungszeiger*), d'autre part. Pour faire la distinction entre les deux types d'espèces, la norme définit une liste de 17 taxons considérés comme des indicateurs d'azote et d'immissions de poussières (voir tableau 2). Toutes les autres espèces susceptibles d'être inventoriées figurent comme taxons de référence. Les calculs aboutissent à l'obtention de deux chiffres correspondant aux deux axes d'interprétation : une valeur de diversité des espèces de référence (*Diversitätswert der Referenzarten*) et une valeur de diversité des indicateurs d'eutrophisation (*Diversitätswert der Eutrophierungszeiger*).

Les couples de chiffres sont ensuite reportés dans une grille de qualité biaxiale portant les indicateurs d'eutrophisation en abscisse et les espèces de référence en ordonnée. Le point d'intersection attribue au résultat un indice à deux chiffres. Le premier rend compte de la qualité de l'air (*Bewertung der Luftgüte*) sur une échelle de 1 (très mauvaise) à 5 (très bonne). Le deuxième chiffre, précédé d'un "E" représente l'influence de polluants à caractère eutrophisant ; il évolue de E1 (très faible) à 5 (très forte). Pour les besoins d'illustration, des codes de couleurs sont associés aux différents niveaux de qualité (**tableau 4**). Ils ne concernent toutefois que l'indice relatif à la qualité globale de l'air.

**Tableau 4.**

Grille de qualité relative à la norme allemande VDI 3957/13 [5].

Indice de qualité de l'air	Dénomination et code de couleur	Eutrophisation
5	très bonne	E 5 : très forte
4	bonne	E 4 : forte
3	moyenne	E3 : moyenne
2	mauvaise	E2 : faible
1	très mauvaise	E1 : très faible

### 6.3. Résultats et commentaires

#### *Présentation des résultats*

Les résultats chiffrés des deux composantes de l'appréciation - qualité de l'air et influence eutrophisante - sont obtenus à partir de la matrice des données moyennant les calculs établis dans la norme. Les données brutes des campagnes successives de 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021 sont placées en **annexe 3**.

#### *Indices de la qualité de l'air en 2021*

Les indices de la qualité de l'air obtenus en 2021 aux neuf stations du réseau se répartissent en quatre catégories différentes (**tableau 5**). Les deux composantes de l'indice, la diversité des taxons de référence et la diversité des indicateurs d'eutrophisation, figurent chacune dans quatre classes de qualité : 5, 4, 3 et 2 pour la première et E2, E3, E4 et E5 pour la seconde.

En 2021, la qualité de l'air est jugée très bonne à Grosbous (couleur bleue) et bonne à Beckerich (vert). Six autres placettes se regroupent au niveau 3, synonyme d'un air de qualité moyenne (jaune). La station de Schifflange se démarque par une qualité de l'air mauvaise (orange). La classe de qualité la plus dégradée (rouge) n'est pas représentée au sein du réseau.

En terme d'eutrophisation, une majorité de stations, cinq sur neuf, figurent dans la classe E4 d'une richesse en azote forte. Luxembourg-Merl/Hollerich et Schifflange se classent dans la catégorie la plus dégradée (E5) d'une eutrophisation très forte. Les situations les plus favorables sont relevées aux stations rurales de Grosbous et de Beckerich avec un niveau d'enrichissement trophique jugé respectivement faible (E2) et moyen (E3). Avec des valeurs oscillant de part et d'autre de 10, la placette de Grosbous s'est située en 2005, en 2009 et en 2017 dans la classe supérieure du système d'interprétation d'une eutrophisation très faible (E1).

**Tableau 5.**

Valeurs de diversité des taxons de référence et des indicateurs d'eutrophisation aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021 ; interprétation en terme de qualité de l'air suivant la norme VDI 3957/13 [5].

Station d'observation écolichénique	Valeur de diversité des taxons de référence					Valeur de diversité des indicateurs d'eutrophisation				
	2005	2009	2013	2017	2021	2005	2009	2013	2017	2021
Beckerich	63	59	69	56	56	22	27	28	23	27
Dudelange	31	41	42	30	33	51	68	62	49	35
Esch-sur-Alzette	25	29	27	18	22	70	66	56	29	33
Grosbous	65	73	79	62	60	8,3	9,7	10	7,5	11
Luxembourg-Bonnevoie	34	44	41	28	32	37	47	38	43	35
Luxembourg-Merl/Hollerich	36	46	48	43	37	40	43	43	41	41
Mondorf-les-Bains	43	46	41	40	40	36	39	38	42	35
Pétange	32	35	32	27	22	41	46	47	42	36
Schifflange	/	26	29	25	28	/	61	67	59	46

Station d'observation écolichénique	Indice de la qualité de l'air				
	2005	2009	2013	2017	2021
Beckerich	4 E3	4 E3	4 E3	4 E3	4 E3
Dudelange	3 E5	3 E5	3 E5	3 E5	3 E4
Esch-sur-Alzette	2 E5	2 E5	2 E5	3 E3	3 E4
Grosbous	5 E1	5 E1	5 E2	5 E1	5 E2
Luxembourg-Bonnevoie	3 E4	3 E5	3 E4	2 E5	3 E4
Luxembourg-Merl/Hollerich	3 E5	3 E5	3 E5	3 E5	3 E5
Mondorf-les-Bains	3 E4	3 E4	3 E4	3 E5	3 E4
Pétange	3 E5	3 E5	3 E5	2 E5	3 E4
Schifflange	/	2 E5	2 E5	2 E5	2 E5

L'analyse combinée des deux composantes de l'indice de qualité de l'air permet de classer les neuf placettes du réseau d'observation en trois catégories. Dans la première figurent les deux situations pour lesquelles l'influence eutrophisante est la plus faible. Il s'agit de Grosbous et de Beckerich avec des valeurs de diversité des indicateurs d'azote qui représentent respectivement 15 % et 33 % de la diversité d'ensemble. La deuxième catégorie est formée par les stations auxquelles les deux composantes se tiennent en équilibre, soit : Mondorf-les-Bains (47 %), Dudelange (51 %), Luxembourg-Bonnevoie (52 %) et Luxembourg-Merl/Hollerich (53 %). Aux trois autres placettes, situées dans le sud du pays, la diversité des taxons nitrophiles dépasse celle des lichens de la liste de référence avec 60 % à Esch-sur-Alzette et chaque fois 62 % à Pétange et à Schiffflange.

#### *Evolution entre 2005 et 2021 de l'indice de la qualité de l'air*

En comparant la campagne de 2021 à celle du début en 2005, l'indice de la qualité de l'air est resté inchangé à huit des neuf stations du réseau d'observation. L'unique évolution est intervenue à l'emplacement d'Esch-sur-Alzette où la qualité de l'air s'est améliorée de mauvaise (classe 2) à moyenne (classe 3) entre 2013 et 2017. Aux placettes de Luxembourg-Bonnevoie et de Pétange, des déplétions sont constatées en 2017, évoluant d'un diagnostic de qualité moyenne (niveau 3) vers une qualité mauvaise (niveau 2). Cette dégradation correspond à la perte de taxons acidophiles, qui représentaient des résidus d'indication de l'acidité forte de l'atmosphère des années 1960 à 2000.

La composante relative à l'eutrophisation reste stable entre 2005 et 2021 à trois stations : Beckerich (E3), Luxembourg-Merl/Hollerich (E5) et Schiffflange (E5). Elle fluctue entre deux classes de qualité à Grosbous (E1 et E2), à Mondorf-les-Bains (E4 et E5) et à Luxembourg-Bonnevoie (E4 et E5). En revanche, une amélioration s'installe à Dudelange, à Pétange et à Esch-sur-Alzette, chaque fois de E5 à E4. Elle correspond à la diminution, voire à la disparition de taxons fortement nitrophiles. Cette évolution favorable devra se confirmer lors du prochain relevé.

#### *Evolution entre 2005 et 2021 des valeurs de diversité des espèces de référence*

La diversité des espèces de référence atteint les valeurs les plus élevées en 2009 ou en 2013. Ce constat vaut pour l'ensemble des stations, même si, pour certaines, les variations dans le temps sont relativement modestes, comme par exemple à Mondorf-les-Bains ou à Schiffflange. En revanche, le contraste spatial des maxima est très marqué avec la cote la plus élevée de 79 à Grosbous en 2013 et la plus faible de 29 à Esch-sur-Alzette en 2009 et à Schiffflange en 2013.

Les niveaux les plus faibles de la diversité lichénique des taxons de référence sont enregistrés en 2017 et en 2021. Vis-à-vis de la campagne initiale de 2005 et des maxima en 2009 ou en 2013, les baisses sont plutôt modestes aux stations qui affichent des valeurs moyennes, entre 30 et 50, mais nettement plus prononcées aux placettes de Grosbous, de Beckerich et, à l'autre bout du classement, de Pétange et d'Esch-sur-Alzette.

En termes de dynamique lichénique, les augmentations de la diversité des taxons de référence s'inscrivent dans une complexification des peuplements avec à la fois le maintien de taxons indicateurs d'acidité (p.ex. *Pseudevernia furfuracea*), d'ambiance fraîche (p.ex. *Parmelia saxatilis*), le développement des espèces ubiquitaires (p.ex. *Evernia prunastri*) et celui des taxons plus tolérants à la chaleur et à la sécheresse (p.ex. *Punctelia subrudecta*). La baisse des niveaux liés aux taxons de référence s'explique par la régression ou la perte des taxons franchement acidophiles (p.ex. *Hypogymnia physodes*) et surtout des difficultés croissantes pour des espèces sensibles à la sécheresse ou au stress thermique à se maintenir (p.ex. *Parmelia sulcata*).

#### *Evolution entre 2005 et 2021 des valeurs de diversité des indicateurs d'eutrophisation*

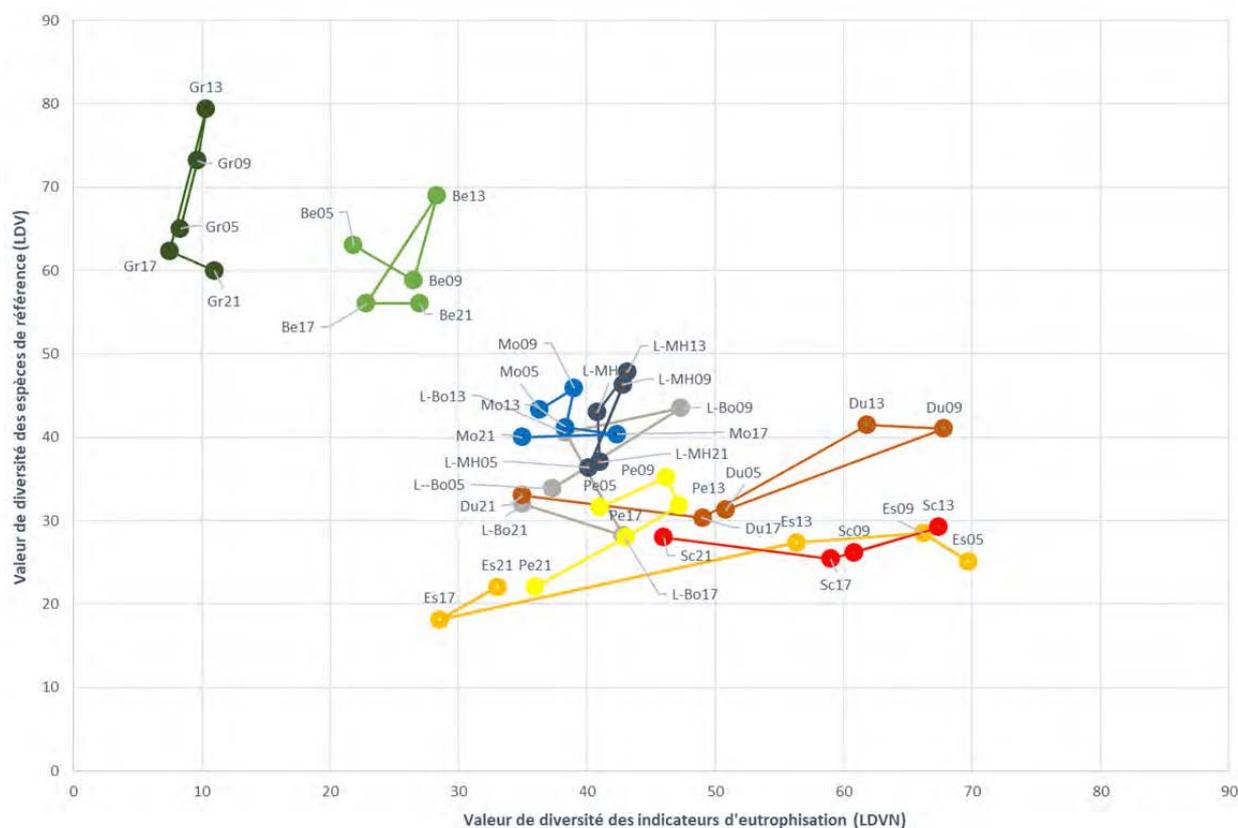
La tendance d'ensemble de l'eutrophisation du milieu ambiant dénote une large majorité de maxima lors des campagnes de 2009 et de 2013. Aux stations urbaines de Luxembourg-Merl/Hollerich, Luxembourg-Bonnevoie et Mondorf-les-Bains, les variations sont toutefois plutôt faibles sur l'ensemble de la période de 2005 à 2021. De façon équivalente, l'enrichissement en azote de l'air ambiant est resté modeste aux deux placettes rurales de Grosbous et de Beckerich. Les évolutions les plus marquées sont relevées dans les villes industrielles de Dudelange, de Schifflange et d'Esch-sur-Alzette. Ainsi, par exemple, la cote de l'eutrophisation à Esch-sur-Alzette a baissé de 70 en 2005 à 29 en 2017. Il est important de souligner que, vis-à-vis des maxima, les baisses se sont amorcées entre 2013 et 2017, puis se sont nettement amplifiées entre 2017 et 2021.

Les évolutions ainsi constatées traduisent des changements conséquents au niveau des cortèges lichéniques. En 2009 et en 2013, les taxons tolérants à l'azote dans l'air ambiant se sont développés en profitant de cet avantage compétitif (p.ex. *Xanthoria parietina*, *Phaeophyscia orbicularis*, *Physconia grisea*). De façon parallèle, des indicateurs strictement nitrophiles (p. ex. *Phaeophyscia nigricans*, *Physcia caesia*, *Lecanora dispersa*) ont pu s'installer. La campagne de 2017 objective l'amorce d'une dynamique dans le sens opposé avec à la fois une diminution du recouvrement d'espèces nitro-tolérantes et la raréfaction, voire la disparition des taxons nitrophiles.

Dans la finesse de l'appréciation, la situation est toutefois rendue plus complexe par le fait que des espèces nitro-tolérantes ou même nitrophiles peuvent en même temps être sensibles à une augmentation du stress hydrique ou du stress thermique. C'est le cas sans doute de *Xanthoria polycarpa*. Confronté à deux facteurs qui lui sont défavorables, ce taxon s'est éteint sur de nombreux arbres du réseau entre 2017 et 2021.

#### **6.4. Appréciation de synthèse**

Les évolutions constatées entre 2005 et 2021 sont illustrées moyennant un schéma de synthèse reprenant la combinaison des deux composantes de l'indice de la qualité de l'air, conformément aux définitions de la norme VDI 3957/13 (**figure 6**).



**Figure 6.**

Evolution des neuf placettes de l’observatoire écolichénique à l’intérieur du système d’interprétation de la norme VDI 3957/13 [5] entre 2005 et 2021.

Les deux emplacements ruraux, Grosbous (Gr) et Beckerich (Be), se positionnent durablement en haut à gauche du schéma, objectivant une diversité des taxons de référence élevée et une incidence eutrophisante faible. Leurs situations sont singulières, étant donné que leurs évolutions au cours des différentes campagnes ne se croisent pas entre elles, ni avec d’autres stations. De 2005 à 2021, la baisse de la diversité des taxons de référence (vers le bas) et l’enrichissement des taxons indicateurs d’eutrophisation (vers la droite) sont plus prononcés à Beckerich qu’à Grosbous.

Les stations de Mondorf-les-Bains (Mo), Luxembourg-Merl/Hollerich (L-MH) et Luxembourg-Bonnevoie (L-Bo) occupent une position centrale axée autour de la valeur de 40 suivant les deux composantes. L’évolution la plus marquée concerne la placette de Luxembourg-Bonnevoie (en gris clair) : après une augmentation conjointe des deux composantes entre 2005 et 2009, une perte des taxons nitrophiles est enregistrée en 2013, suivi d’une diminution de la biodiversité de référence en 2017 pour revenir en 2021 dans une situation proche de celle de 2005. Mondorf-les-Bains (en bleu) se distingue par la situation la plus stable du réseau. L’effet le plus marqué est une régression des lichens indicateurs d’azote entre 2017 et 2021. Malgré une progression des taxons de référence entre 2005 et 2013 (vers le haut), la station de Luxembourg-Merl/Hollerich (en gris foncé) se retrouve en 2021 pratiquement dans sa situation de départ de

2005. Les très faibles mouvements latéraux objectivent une stabilité de l'influence d'eutrophisation.

Les quatre stations des villes industrielles de Dudelange (Du), Esch-sur-Alzette (Es), Pétange (Pe) et Schifflange (Sc) présentent un point commun essentiel : il s'agit de l'augmentation de la diversité des taxons nitrophiles jusqu'en 2009 ou en 2013 (vers la droite), suivie d'une déplétion sévère en 2017 et/ou en 2021 (retour vers la gauche). Cette dynamique dans la pression azotée de l'air ambiant représente certainement l'enseignement le plus concluant de cette partie du diagnostic. Il est intéressant de noter que la perte de taxons d'eutrophisation est accompagnée à Dudelange, à Esch-sur-Alzette et à Schifflange par une légère augmentation de la diversité des espèces de référence (vers le haut).

## 7. BIODIVERSITE LICHENIQUE

---

### 7.1. Procédure pratique

#### *Principe*

La biodiversité lichénique, précisément le nombre de taxons par unité d'inspection, constitue un critère simple d'évaluation de la qualité du milieu. Cette appréciation part du constat en écologie qu'un milieu est d'autant plus sain qu'il est capable d'accueillir une large diversité d'espèces. A l'inverse, une perte d'espèces ou la domination d'un nombre restreint est le signe d'une perturbation, qu'elle soit d'origine naturelle ou provoquée par l'homme.

#### *Biodiversité par station et biodiversité moyenne par arbre*

La biodiversité par station est représentée par le nombre de taxons présents sur la totalité des arbres de la station d'observation sur la base de la liste de référence de 78 taxons. La biodiversité moyenne est obtenue en déterminant la moyenne des taxons sur les différents arbres de la placette. Notons que pour ce critère, il n'a pas été jugé pertinent d'adapter les données. De ce fait, la station de Schifflange compte cinq arbres depuis 2017 et celle de Pétange revient à six arbres en 2021 après l'élimination transitoire d'un arbre en 2017 (voir 4.3).

#### *Présentation des résultats*

Les résultats chiffrés relatifs aux deux critères de biodiversité (nombre total de taxons par station et nombre moyen de taxons par arbre) sont obtenus à partir de la base des données des relevés lichéniques successifs entre 2005 et 2021 (**annexe 4**).

## 7.2. Biodiversité par station

En 2021, la biodiversité lichénique est comprise entre un minimum de 25 taxons à Pétange et un maximum de 38 à Grosbous (**tableau 6**). Étonnamment, des valeurs très proches, entre 32 et 34 taxons, sont relevées à six des neuf stations, alors qu'elles sont aussi différentes que Beckerich, Dudelange, Luxembourg, Mondorf-les-Bains et Schiffflange. La placette d'Esch-sur-Alzette décroche légèrement avec 27 taxons.

En terme de dynamique entre 2005 et 2021, les deux placettes en tête du classement, Grosbous, et Mondorf-les-Bains, présentent une stabilité importante avec des variations d'un maximum de trois taxons entre les relevés successifs. Luxembourg-Bonnevoie subit une forte perte entre 2013 et 2017 pour récupérer légèrement en 2021. À l'inverse, Luxembourg-Merl/Hollerich présente un gain net avec une poussée sensible entre 2013 et 2017. Des progressions de la diversité lichénique sont également relevées à Schiffflange et à Dudelange. En revanche, les placettes de Beckerich, d'Esch-sur-Alzette et de Pétange accusent une érosion nette entre 2005 et 2021, avec des maxima en 2009 ou en 2013. Comme déjà indiqué plus haut, cette évolution s'explique par une colonisation par des taxons nitro-tolérants, suivie de leur régression à partir de 2017. À Beckerich, la déplétion inclut également la perte définitive des résidus de taxons acidophiles, c'est-à-dire typique de l'acidification de l'atmosphère de la deuxième moitié du 20<sup>ème</sup> siècle.

**Tableau 6.**

Biodiversité lichénique aux neuf stations de l'observatoire écolichénique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021.

Station d'observation écolichénique	Biodiversité par station				
	2005	2009	2013	2017	2021
Grosbous	37	40	40	41	38
Mondorf-les-Bains	35	35	33	34	34
Luxembourg-Bonnevoie	35	38	37	31	34
Luxembourg-Merl/Hollerich	28	31	29	35	34
Schiffflange	/	31	34	32	33
Beckerich	39	38	40	37	33
Dudelange	28	29	29	32	32
Esch-sur-Alzette	30	30	32	27	27
Pétange	30	33	27	30	25

Augmentation / diminution entre 2005 et 2009, puis entre 2009 et 2013, 2013 et 2017, 2017 et 2021

### 7.3. Biodiversité moyenne par arbre

La diversité biologique déterminée par arbre est comprise en 2021 entre un minimum de 12,5 taxons à Pétange et un maximum de 19,0 taxons à Grosbous (**tableau 7**). Avec une moyenne de 16,7 taxons, la station de Beckerich se hisse à la deuxième place du classement, ensemble avec celle de Mondorf-les-Bains qui, elle, se caractérise par une hétérogénéité plus importante. Les deux placettes de Luxembourg, Bonnevoie et Merl/Hollerich, précèdent les quatre villes à caractère industriel en fin de classement. Schiffflange se distingue par la variabilité (écart-type) la plus élevée, ce qui explique sa position comparativement favorable en terme de biodiversité par station (voir 7.2).

En termes évolutifs, une augmentation systématique de la biodiversité lichénique sur l'ensemble du réseau caractérise la période 2005 à 2009 ; elle traduit une dynamique des peuplements vers une complexification des cortèges lichéniques, combinant un résidu de taxons acidophiles et une colonisation par des taxons nitro-tolérants. Entre 2009 et 2021, l'évolution est plus contrastée, avec, en particulier, une inversion de tendance en 2017 et en 2021. Alors que la couleur verte synonyme d'une augmentation de la biodiversité domine à sept des neuf emplacements en 2017, une perte est constatée sur ces mêmes placettes en 2021. Cette diminution trace pour l'essentiel la déplétion des taxons nitrophiles. Sur l'ensemble de la période 2005 à 2021, la biodiversité progresse aux quatre placettes en tête de classement. A l'opposé, des pertes nettes sont enregistrées dans les quatre villes industrielles, Dudelange, Schiffflange, Esch-sur-Alzette et Pétange, situées en fin de classement.

**Tableau 7.**

Biodiversité moyenne par arbre aux neuf stations de l'observatoire écolichénique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021.

Station d'observation écolichénique	Biodiversité moyenne par arbre (écart-type)				
	2005	2009	2013	2017	2021
Grosbous	17,7 (2,7)	20,0 (1,8)	19,3 (3,3)	20,3 (2,7)	19,0 (3,6)
Beckerich	15,3 (1,5)	16,8 (2,4)	17,8 (1,8)	18,5 (2,3)	16,7 (2,2)
Mondorf-les-Bains	15,3 (4,1)	16,5 (3,6)	16,5 (4,0)	17,8 (2,3)	16,7 (5,5)
Luxembourg-Bonnevoie	15,2 (4,1)	17,8 (5,5)	15,2 (3,7)	16,8 (4,5)	16,0 (5,2)
Luxembourg-Merl/Hollerich	15,8 (2,5)	16,8 (4,4)	14,0 (3,0)	17,0 (5,2)	15,8 (3,7)
Dudelange	15,7 (2,9)	18,0 (3,2)	16,2 (1,2)	15,2 (2,3)	15,2 (2,8)
Schiffflange	/	15,7 (4,5)	16,3 (5,4)	16,4 (5,5)	14,6 (6,0)
Esch-sur-Alzette	14,7 (3,1)	16,2 (3,1)	15,7 (4,3)	12,3 (4,0)	13,5 (2,9)
Pétange	14,0 (2,5)	14,5 (3,3)	14,7 (2,9)	15,0 (3,1)	12,5 (3,9)

Augmentation / diminution entre 2005 et 2009, puis entre 2009 et 2013, 2013 et 2017, 2017 et 2021

## 7.4. Appréciation de synthèse

Même si la biodiversité lichénique, totale ou moyenne, représente un descripteur intéressant, ce critère à lui seul ne fournit pas d'indications suffisantes en terme de qualité de l'air ou de qualité de l'environnement. Ce propos peut être illustré par l'exemple des stations de Beckerich et de Mondorf-les-Bains qui présentent des diversités lichéniques par arbre équivalentes en 2021 (16,7) alors que l'indice de la qualité de l'air montre bien que les cortèges lichéniques sont de nature bien différente (voir 6.3 et 6.4). Pour affiner le diagnostic, il est dès lors nécessaire d'analyser les caractéristiques propres des taxons qui composent les communautés à chacune des stations de l'observatoire.

## 8. INDICES DE QUALITE ECOPHYSIOLOGIQUE

---

### 8.1. Procédure pratique

#### *Principe*

Les indices écophysiologiques sont destinés à fournir une appréciation différenciée d'un aspect particulier de la qualité de l'air et/ou de l'environnement. Ils s'appuient sur les propriétés bioindicatrices individuelles des différents taxons qui composent un cortège lichénique. La signification biologique précise de chacun des quatre descripteurs est présentée au début des paragraphes correspondants. Leur désignation est la suivante :

- indice de toxisensibilité
- indice d'acido-basicité
- indice trophique
- indice thermique

#### *Démarche technique*

Les indices écophysiologiques sont fondés sur la combinaison d'un inventaire semi-quantitatif de la flore lichénique et de cotes de qualité associées aux différents taxons. L'inventaire des lichens est réalisé en associant à chaque taxon observé une appréciation concernant son développement actuel sur l'ensemble de l'arbre à partir d'une hauteur de 50 cm du sol. L'échelle semi-quantitative appliquée est la suivante :

- cote 1 : 1 individu ou colonie
- cote 2 : 2 - 4 individus ou colonies
- cote 3 : 5 - 10 individus ou colonies
- cote 4 : taxon dominant ou surface recouverte > 100 cm<sup>2</sup>
- cote 5 : taxon très dominant ou surface recouverte >> 100 cm<sup>2</sup>

A première vue, cette appréciation peut paraître sommaire. Toutefois, la pratique montre que l'outil est performant, en ce sens que l'information obtenue par des moyens peu sophistiqués présente un caractère discriminant. La procédure semi-quantitative intègre en effet une certaine réalité écologique. Ainsi, la cote 1 est attribuée à un taxon qui a réussi à s'établir et à se maintenir. La cote 2 s'applique, lorsque le taxon montre une capacité modérée à se développer. Une confirmation de ce potentiel est obtenue au niveau de la cote centrale de 3. Les deux niveaux supérieurs sont attribués aux taxons qui se trouvent dans des conditions écophysologiques manifestement favorables, de sorte qu'ils dominent raisonnablement (cote 4) ou fortement (cote 5) le peuplement.

Les cotes de qualité relatives aux principales propriétés écophysologiques des végétaux ont été définies dans un ouvrage de référence élaboré sous la direction d'Ellenberg [12]. En 2010, Wirth a procédé à une actualisation des valeurs d'indication écologique (*ökologische Zeigerwerte*) vis-à-vis d'un inventaire étendu d'espèces lichéniques [13]. Dans le cadre du présent observatoire écolichénique, les cotes actualisées ont été intégrées à la campagne de 2013 et appliquées de façon rétrospective aux relevés antérieurs de 2009 et de 2005. Précisons encore que les cotes de toxissensibilité n'ont pas été reconduites par Wirth avec l'argument que cette approche a été validée à l'égard de la forte acidité atmosphérique des années 1960 à 2000, mais qu'elle n'est plus adaptée aux formes actuelles de la pollution atmosphérique. La liste des cotes écophysologiques est présentée en **annexe 5**.

Pour chacun des indices écophysologiques, une appréciation chiffrée pour chaque arbre est déterminée selon la formule :

$$\frac{\sum_{i=1}^n Q_i f_i}{\sum_{i=1}^n f_i}$$

n : le nombre de taxons de lichens observés

Q<sub>i</sub> : la cote écophysologique attribuée à l'espèce i (de 1 à 9)

f<sub>i</sub> : la cote d'abondance-recouvrement de l'espèce i (de 1 à 5)

Le fait de diviser la somme des produits de la cote écophysologique et de l'abondance par l'abondance totale (somme des abondances des différentes espèces) rend l'expression indépendante du nombre de lichens recensés à une station donnée. Les indices traduisent donc fidèlement les caractéristiques écophysologiques d'ensemble exprimées par les espèces qui composent un peuplement, indépendamment de la biodiversité.

### *Interprétation*

A chacune des stations du réseau, l'indice moyen déterminé à partir des arbres inventoriés est considéré comme représentatif de la situation locale. La base de données est la même que pour le critère de biodiversité (voir 7.1). Les données complètes des relevés lichéniques de 2005 à 2021 figurent en **annexe 4**.

Les indices écophysologiques sont interprétés sur la base d'une comparaison dans l'espace, c'est-à-dire une hiérarchisation des neuf stations du réseau. Les évolutions intervenues dans le temps sont évaluées par les variations (augmentation ou diminution) entre les cinq campagnes successives de 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021.

### *Précision complémentaire*

Les indices écophysologiques fournissent dans l'ensemble des expressions quantitatives relativement peu contrastées. Cette caractéristique est liée au fait que les communautés de lichens présentes aux différentes stations du réseau sont composées d'une ossature d'espèces à caractère plus ou moins ubiquitaire. Dans les faits, le contraste entre les placettes est formé essentiellement par les espèces qui se distinguent par des exigences écophysologiques les plus typées. Or, ces taxons sont naturellement présents à des fréquences comparativement plus faibles.

## **8.2. Indice de toxisensibilité**

### *Principe*

Ce premier indice traduit les caractéristiques de sensibilité ou, à l'opposé, de résistance du cortège lichénique vis-à-vis de la pollution de l'air à caractère toxique. Même si les cotes de toxisensibilité (*Empfindlichkeitszahl*) n'ont pas été reconduites lors de l'actualisation des indices écologiques par Wirth en 2010 (voir 8.1), le maintien dans le présent contexte d'une approche en terme de toxisensibilité est justifiée par le fait que les placettes d'observations du sud du pays ont subi pendant une durée longue des incidences de type toxique. Les cotes de qualité évoluent sur une échelle de 1 à 9 ; la valeur est d'autant plus élevée que l'espèce en question est sensible à la pollution (voir annexe 5).

### *Totalité du réseau d'observation*

A l'échelle de la totalité du réseau, la sensibilité des cortèges lichéniques à la toxicité du milieu ambiant a globalement progressé, comme en témoigne une dominante de chiffres de couleur verte (**tableau 8**). Entre 2005 et 2021, l'indice a augmenté à toutes les stations, à l'exception de celle de Pétange. Cette évolution indique que la composante de toxicité de la qualité de l'air ambiant a diminué au cours des 16 dernières années.

### *Classement et variations*

Le cortège lichénique de Grosbous présente incontestablement la toxisensibilité la plus élevée du réseau. Les taxons les plus caractéristiques sont *Anaptychia ciliaris*, *Ramalina fastigiata* et *Ramalina fraxinea* (cote 8), mais également les espèces du genre *Pertusaria* (cote 6). Entre 2005 et 2021, l'indice a progressé de 3,98 à 4,51. La placette de Beckerich se maintient durablement en deuxième position du classement avec une déplétion passagère en 2009, puis une remontée en 2017 et en 2021. Il est intéressant de noter que les indices relevés à Grosbous et à Beckerich ne se croisent pas.

**Tableau 8.**

Indice de toxisensibilité aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021.

Station d'observation écolichénique	2005	2009	2013	2017	2021	Tendance
Grosbous	3,98	4,18	4,11	4,44	4,51	
Beckerich	3,66	3,59	3,60	3,79	3,88	
Dudelange	3,30	3,31	3,38	3,40	3,48	
Luxembourg-Merl/Hollerich	3,22	3,25	3,28	3,46	3,39	
Luxembourg-Bonnevoie	3,17	3,25	3,34	3,32	3,38	
Mondorf-les-Bains	3,18	3,16	3,18	3,18	3,25	
Schifflange	/	3,08	3,09	3,04	3,14	
Esch-sur-Alzette	2,91	2,95	3,05	3,23	3,08	
Pétange	3,19	3,05	3,19	3,30	3,05	

Augmentation / diminution entre 2005 et 2009, puis entre 2009 et 2013, 2013 et 2017, 2017 et 2021

La position avantageuse de Dudelange, jugée surprenante au début de l'observatoire pour une ancienne cité industrielle, est une nouvelle fois confirmée avec une progression en 2021. Les deux stations de Luxembourg affichent des profils équivalents, avec toutefois des évolutions opposées en 2017 et en 2021. La placette de Mondorf-les-Bains se caractérise essentiellement par une forte stabilité. Ceci est également le cas de Schifflange, malgré l'arrêt de la production sidérurgique qui remonte désormais à près de 10 ans (octobre 2011).

Esch-sur-Alzette et Pétange figurent en fin de classement avec une forte perte de toxisensibilité entre 2017 et 2021, c'est-à-dire des cortèges lichéniques plus toxitolérants. Cette caractéristique est difficile à interpréter sur la base des indicateurs précédents, indice de la qualité de l'air et biodiversité lichénique, même si Esch-sur-Alzette affiche encore un gain net entre 2005 et 2021.

### 8.3. Indice d'acido-basicité

#### Principe

L'indice acido-basique des peuplements lichéniques indique le caractère acidophile ou basophile du cortège en présence. Les cotes sont faibles pour les espèces acidophiles ou acido-tolérantes et élevées pour les espèces basophiles ou baso-tolérantes (voir annexe 5). A côté de la qualité de l'air au sens strict, cette caractéristique est également influencée par le substrat géologique (acide ou alcalin), tout comme par des effets résiduels des pollutions du passé, qu'il s'agisse de l'acidité

forte de l'atmosphère ou des émissions alcalines de l'industrie sidérurgique. La situation actuelle doit être interprétée comme une résultante dynamique des conditions environnementales locales.

#### *Totalité du réseau d'observation*

L'indice d'acido-basicité évolue dans le sens de l'accroissement du caractère alcalin, c'est-à-dire le développement de cortèges lichéniques moins acidophiles et plus baso-tolérants. Cette tendance est tracée par une dominante de chiffres de couleur rouge (**tableau 9**). Une perte nette de basicité est uniquement enregistrée au niveau des placettes des agglomérations industrielles d'Esch-sur-Alzette et de Schiffflange.

**Tableau 9.**

Indice d'acido-basicité aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021.

Station d'observation écolichénique	Indice 2005	Indice 2009	Indice 2013	Indice 2017	Indice 2021	Tendance
Grosbous	4,85	4,96	5,09	5,15	5,12	
Mondorf-les-Bains	5,21	5,30	5,34	5,35	5,32	
Beckerich	5,17	5,33	5,37	5,43	5,37	
Luxembourg-Merl/Hollerich	5,38	5,45	5,35	5,45	5,55	
Luxembourg-Bonnevoie	5,19	5,54	5,58	5,67	5,58	
Dudelange	5,72	5,89	5,70	5,72	5,70	
Esch-sur-Alzette	6,16	6,12	5,91	5,61	5,76	
Pétange	5,60	5,70	5,79	5,55	5,82	
Schiffflange	/	6,14	6,02	5,91	5,93	

Augmentation / diminution entre 2005 et 2009, puis entre 2009 et 2013, 2013 et 2017, 2017 et 2021

#### *Classement et variations*

Malgré une hausse progressive de l'indice d'acido-basicité de son cortège, la station de Grosbous est solidement ancrée en tête du classement de la flore lichénique la plus acidophile. L'autre site en milieu rural, Beckerich, régresse de la deuxième place en 2005 à la troisième position, cédant la deuxième à Mondorf-les-Bains. Ce résultat est quelque peu surprenant, étant donné que le sud-est du pays présente un substrat géologique à dominante calcaire. Les deux placettes de Luxembourg-Merl/Hollerich et Luxembourg-Bonnevoie se caractérisent par une basicité élevée au regard du substrat gréseux. L'influence dominante y est clairement le caractère urbain. La deuxième moitié du classement est occupée par les quatre agglomérations industrielles avec des

évolutions contrastées de stabilité (Dudelange), de légère augmentation (Pétange) et de perte nette de basicité sur l'ensemble du suivi (Esch-sur-Alzette et Schiffflange).

L'évolution entre 2005 et 2021 vers des peuplements plus basophiles à six des neuf stations de l'observatoire écolichénique s'explique pour l'essentiel par une raréfaction, puis une perte des taxons acido-tolérants qui représentent des reliques de la forte acidité atmosphérique des années 1960 à 2000. Les taxons les plus typiques sont *Lecanora conizaeoides* et *Hypogymnia physodes*, mais également *Pseudevernia furfuracea* et *Parmelia saxatilis*. Une tendance inverse caractérise les placettes d'Esch-sur-Alzette et de Schiffflange qui évoluent à partir des valeurs historiquement les plus élevées du réseau en 2005 vers une flore moins basophile. Ici, c'est la réduction des rejets calcaires (à caractère alcalin) par l'industrie sidérurgique qui explique la mutation des peuplements lichéniques.

#### 8.4. Indice trophique

##### *Principe*

L'indice trophique décrit les caractéristiques des communautés lichéniques vis-à-vis d'un enrichissement en substances nutritives, principalement de l'azote, dans l'air ambiant. Les cotes associées aux différentes espèces varient de 1 à 9 depuis une nitrophobie franche à une forte nitrophilie (voir annexe 5). Les effets d'eutrophisation de l'air ambiant sont essentiellement à mettre en relation avec le trafic automobile.

##### *Totalité du réseau d'observation*

Sur l'ensemble du réseau d'observation, l'indice trophique trace une augmentation nette de l'eutrophisation à sept des neuf stations sur la période 2005 à 2021 (**tableau 10**). Toutefois, les profils intermédiaires sont plus contrastés ; ils mettent en lumière une large augmentation du caractère nitrophile des cortèges lichéniques en 2009, visualisée par une majorité de chiffres en rouge, une stabilisation en 2013, puis une large majorité d'indices en vert en 2017, signifiant une baisse de l'impact de l'azote dans l'air ambiant. Comme pour l'indice d'acido-basicité, les placettes d'Esch-sur-Alzette et de Schiffflange affichent une tendance opposée à la baisse de l'indice trophique sur l'ensemble du suivi.

##### *Classement et variations*

Les trois premières positions du classement sont occupées par les localités qui bénéficient d'un environnement à dominante rurale : Grosbous, Beckerich et Mondorf-les-Bains. Avec des évolutions dans le temps rigoureusement équivalentes, cette séquence est invariable depuis 2005. Les deux stations de la ville de Luxembourg se positionnent aux rangs 4 et 5 avec une inversion qui s'est produite dès 2009. Parmi les quatre agglomérations du sud du pays, Dudelange se caractérise de nouveau par une importante stabilité dans le temps. En raison d'une baisse nette de l'eutrophisation aux placettes de Schiffflange et d'Esch-sur-Alzette, Pétange se retrouve en fin de classement avec le cortège lichénique le plus nitrophile du réseau en 2021.

**Tableau 10.**

Indice trophique aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021.

Station d'observation écolichénique	Indice 2005	Indice 2009	Indice 2013	Indice 2017	Indice 2021	Tendance
Grosbous	5,31	5,34	5,54	5,52	5,46	
Beckerich	5,68	5,81	6,00	5,96	5,97	
Mondorf-les-Bains	6,26	6,40	6,43	6,42	6,41	
Luxembourg-Merl/Hollerich	6,42	6,53	6,43	6,44	6,54	
Luxembourg-Bonnevoie	6,24	6,59	6,59	6,75	6,62	
Dudelange	6,69	6,89	6,81	6,79	6,70	
Schifflange	/	7,01	6,96	6,86	6,88	
Esch-sur-Alzette	7,27	7,21	7,00	6,64	6,89	
Pétange	6,76	6,76	6,85	6,69	6,92	

Augmentation / diminution entre 2005 et 2009, puis entre 2009 et 2013, 2013 et 2017, 2017 et 2021

L'indice trophique affiche des analogies évidentes vis-à-vis de l'indice d'acido-basicité. Cette équivalence s'explique par les préférences écophysiologiques des différentes espèces de lichens : le caractère acidophile est associé à une certaine nitrophobie et, à l'inverse, la basophilie à la nitrophilie. L'augmentation des teneurs en azote dans l'air ambiant a favorisé le développement de taxons franchement nitrophiles, comme *Phaeophyscia nigricans*, *Physcia adscendens*, *Physconia grisea* ou *Xanthoria polycarpa*. Entre 2013 et 2017, les taxons les plus nitrophiles amorcent une tendance à la régression. Cet ajustement des cortèges lichénique traduit une diminution des charges d'azote atmosphérique.

## 8.5. Indice thermique

### Principe

L'indice thermique reflète le caractère thermophile ou thermophobe de la communauté lichénique à une station donnée. Les cotes, variant de 1 à 9, sont d'autant plus élevées que le taxon est thermophile ou thermo-tolérant (voir annexe 5). Cet indice a été défini dans le but de caractériser les ambiances urbaines, plutôt chaudes et sèches, vis-à-vis de situations davantage rurales, plus fraîches et plus humides. Avec les préoccupations plus récentes, le concept évolue clairement vers des appréciations en terme de dérèglement climatique.

### Totalité du réseau d'observation

Entre 2005 et 2021, l'indice thermique a augmenté à une large majorité de six des neuf stations de l'observatoire (**tableau 11**). En prenant pour référence la campagne de 2009, l'augmentation concerne même huit des neuf placettes, à l'exception de celle de Pétange. Ce constat traduit de façon nette l'impact de températures plus élevées et/ou d'ambiances plus sèches sur les peuplements lichéniques. Les progressions les plus importantes sont intervenues dans les agglomérations de Luxembourg et d'Esch-sur-Alzette. En revanche, les variations sont nettement plus modestes aux autres stations. A ceci s'ajoute qu'un quasi équilibre entre des augmentations (en rouge) et des baisses (en vert) est de nature à fragiliser le diagnostic.

**Tableau 11.**

Indice thermique aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021.

Station d'observation écolichénique	Indice 2005	Indice 2009	Indice 2013	Indice 2017	Indice 2021	Tendance
Pétange	4,41	4,26	4,04	4,38	3,56	
Schifflange	/	3,70	3,72	3,92	3,73	
Beckerich	3,87	3,75	3,71	3,81	4,07	
Grosbous	4,07	3,96	3,86	4,16	4,13	
Dudelange	4,41	4,15	4,29	4,52	4,27	
Esch-sur-Alzette	3,96	3,90	4,43	4,63	4,38	
Luxembourg-Bonnevoie	4,06	3,88	4,19	4,03	4,41	
Luxembourg-Merl/Hollerich	3,80	4,09	4,35	4,35	4,48	
Mondorf-les-Bains	4,99	4,54	4,51	4,60	4,68	

Augmentation / diminution entre 2005 et 2009, puis entre 2009 et 2013, 2013 et 2017, 2017 et 2021

### Classement et variations

Le classement des neuf stations de l'observatoire a été notablement bousculé au cours des cinq campagnes successives. Étonnamment, la placette de Pétange se retrouve à la tête du classement en 2021 avec le cortège le moins thermophile du réseau. Toutefois, étant donné que Pétange est la seule station à présenter un indice en 2021 en baisse par rapport à toutes campagnes précédentes, ce résultat mérite d'être considéré avec précaution. En position 2, Schifflange affiche une stabilité remarquable. L'explication la plus plausible à cette situation favorable est une alimentation en air frais à partir des collines boisées. Les deux stations rurales de Beckerich et de Grosbous présentent une augmentation modérée de l'indice thermique. Beckerich bénéficie

d'une exposition favorable aux vents, alors que la localité de Grosbous est davantage encaissée. Dudelange se caractérise par une situation fluctuante dans le temps avec un indice en baisse en 2021 par rapport à 2005, mais en progression par rapport à 2009. Avec des cortèges lichéniques évoluant de façon progressive vers une thermophilie croissante, les stations d'Esch-sur-Alzette et de la ville de Luxembourg ont nettement régressé vers le bas du classement. Au dernier rang figure durablement la placette de Mondorf-les-Bains. Ce positionnement correspond à une réalité de terrain, étant donné que la partie sud-est du pays bénéficie d'un climat naturellement plus clément, sous l'influence de la vallée de la Moselle.

## 9. INDICATION DE CHANGEMENT CLIMATIQUE

---

### 9.1. Procédure pratique

#### *Principe*

A l'instar des différentes influences sur le compartiment atmosphérique des décennies passées, que ce soit l'acidité forte ou l'eutrophisation, la flore lichénique est actuellement proposée comme indicatrice du dérèglement climatique [11, 14, 15]. Dès 2017, le VDI a conçu une méthodologie de cartographie de l'impact climatique [10]. La littérature scientifique sur le sujet converge vers le constat que les cortèges de lichens présentent une sensibilité non seulement à une augmentation des températures de l'air ambiant, mais également à des hivers plus doux et des étés plus secs.

Pour être en mesure de mettre en évidence et de quantifier les effets du dérèglement climatique sur la flore lichénique, la liste de base de 78 taxons a été étendue de 54 nouveaux taxons pour atteindre un total de 132 taxons (voir 5.1). Étant donné qu'il est pertinent de s'appuyer sur cet inventaire complet, seuls les relevés effectués en 2021 seront pris en compte dans cette approche climatique.

#### *Définition d'indices climatiques*

Au regard des données actuellement disponibles, deux indices peuvent être proposés en matière d'évaluation de changement climatique. Dans les deux cas, les indices sont construits sur le même principe que les indices écophysologiques (voir 8.1), en associant les données d'abondance-recouvrement et des cotes qui valorisent les qualités intrinsèques de chaque taxon face au dérèglement climatique. L'indice attribué à la placette est constitué par la valeur moyenne des indices obtenus sur les différents arbres qui la composent.

### Indice climatique 1.

Le premier indice s'appuie sur les cotes de climat *KlimaWert* (KW) définies dans la norme VDI 3957/20 [10]. Elles ont été déterminées pour chaque taxon à partir des cotes écophysiologicals de continentalité (K) et de température (T).

### Indice climatique 2.

Une révision fondée sur l'expérience des cotes KW de la norme VDI est proposée par l'équipe de Norbert Stapper et André Aptroot, des lichénologues confirmés [14, 15]. Ces cotes actualisées sont disponibles pour 77 des 78 taxons de la liste de base (voir annexe 6) et pour 8 des 9 taxons recensés lors de la campagne de 2021 à partir de la liste complémentaire de 54 taxons (**tableau 12**).

**Tableau 12.**

Cotes climatiques relatives à 8 des 9 taxons de la liste complémentaire recensés lors de la campagne de 2021.

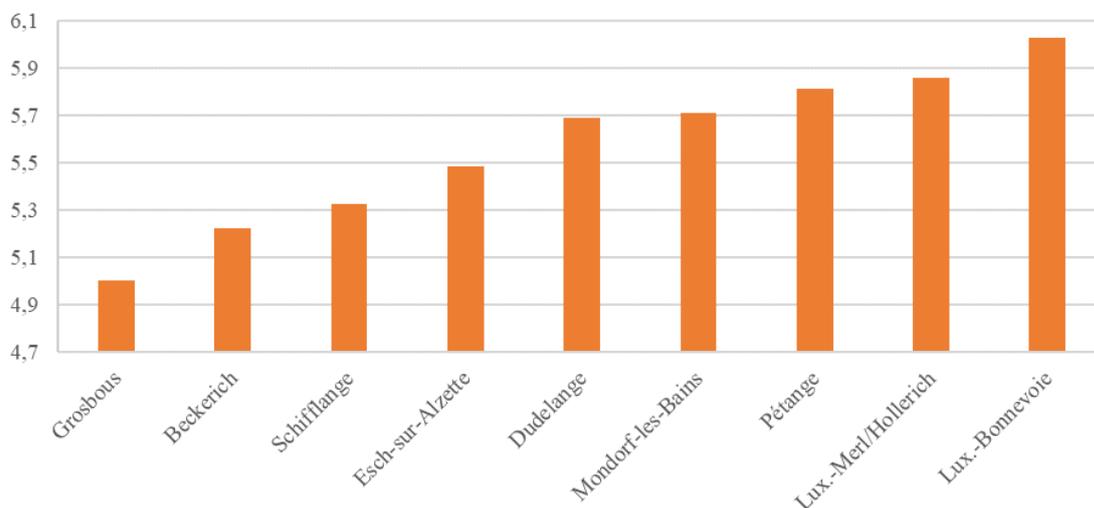
Taxon	Cote climat
<i>Bacidina neosquamulosa</i>	7
<i>Flavoparmelia soledians</i>	9
<i>Halecania viridescens</i>	-
<i>Hyperphyscia adglutinata</i>	8
<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>	7,5
<i>Phaeophyscia endophenicea</i>	5
<i>Physciella chloantha</i>	8
<i>Punctelia borreri</i>	8
<i>Punctelia jeckeri</i>	7,3

Les données brutes et les indices climatiques du relevé lichénique de 2021 déterminés pour chaque arbre et chaque placette sont reportées en **annexe 6**.

## 9.2. Indice climatique 1

Le premier indice climatique varie d'un minimum de 5,0 à Grosbous à un maximum de 6,0 à Luxembourg-Bonnevoie (**figure 7**). Les deux placettes rurales présentent distinctement la situation la plus favorable du réseau avec les cortèges les moins influencés par des taxons indicateurs de dérèglement climatique. Les stations de Schifflange et d'Esch-sur-Alzette, aux rangs 3 et 4, occupent des positions plutôt surprenantes pour des agglomérations à caractère industriel. Toutefois, avec une valeur proche de celle de Beckerich, le résultat de Schifflange vient confirmer les enseignements obtenus à partir de l'indice thermique (voir 8.5). Dans la suite, la placette de Dudelange est proche de celle de Mondorf-les-Bains, naturellement soumise à un climat plus clément. La position de Pétange, au rang 7, vient clairement contrarier l'expression de l'indice thermique, ce qui tend à confirmer les réserves énoncées (voir 8.5). Enfin, avec les

indices les plus élevés, ce sont les deux stations de la ville de Luxembourg, Merl/Hollerich et Bonnevoie, qui présentent la flore lichénique la plus marquée par des taxons indicateurs de changement climatique.



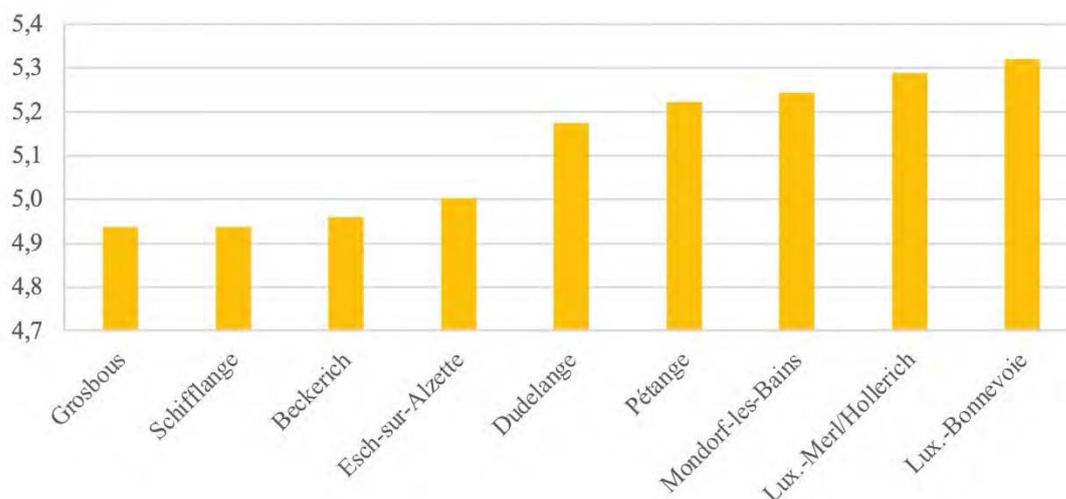
**Figure 7.**  
Indice climatique 1 aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2021.

### 9.3. Indice climatique 2

Le second indice est plus resserré que le premier ; il s'échelonne entre une valeur minimale de 4,9 à Grosbous et à Schiffflange et un maximum de 5,3 à Luxembourg-Bonnevoie (**figure 8**). Dans l'ensemble, les profils des deux indices sont proches avec, toutefois deux différences marquantes. D'abord, la placette de Schiffflange vient s'intercaler entre les deux stations rurales de Grosbous et de Beckerich. La situation très favorable de Schiffflange, tout comme le rapprochement de Esch-sur-Alzette vers Beckerich, ne peuvent s'expliquer que par le fait que ces deux agglomérations industrielles bénéficient d'une protection efficace à partir des collines boisées qui les surplombent. Ensuite, les stations de Pétange et de Mondorf-les-Bains s'inversent, ce qui fait que Pétange se rapproche de Dudelange et Mondorf-les-Bains des deux placettes de la ville de Luxembourg. Ce changement suit une certaine logique, compte tenu de la situation géographique de Mondorf-les-Bains au contact de la vallée de la Moselle.

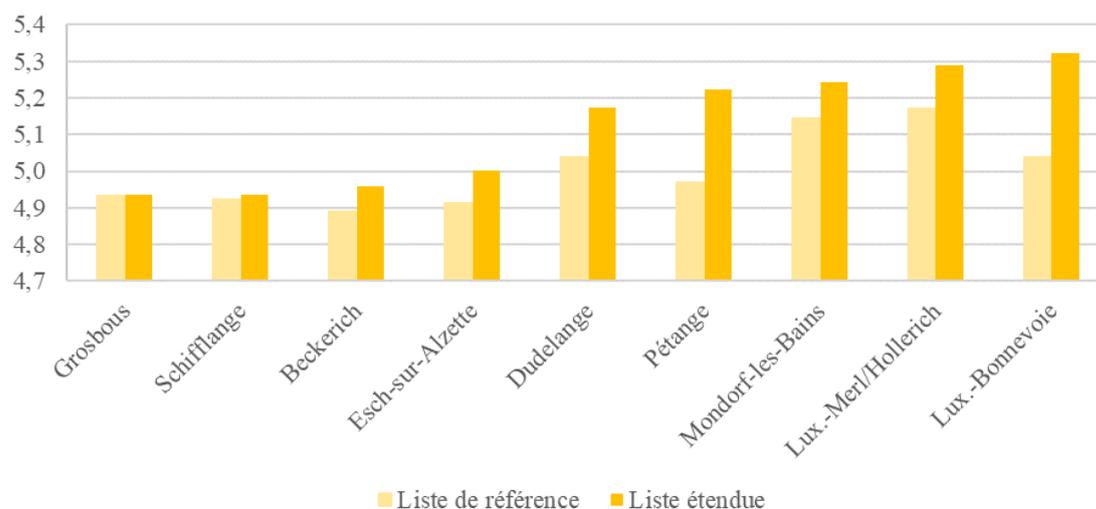
### 9.4. Sensibilité de l'indice climatique 2

Dans les nombreux traitements des données lichéniques visant à optimiser la thématique du changement climatique, l'un des essais a consisté à appliquer l'indice climatique 2 à la liste de référence des 78 taxons, puis à comparer le résultats en considérant l'inventaire complet des 132 taxons.



**Figure 8.**  
Indice climatique 2 aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2021.

Le résultat de cet exercice montre que le contraste entre les différentes stations est plus marqué en intégrant la liste des taxons indicateurs de changement climatique (**figure 9**). Il est particulièrement intéressant de constater que les « nouveaux » taxons arrivent à coloniser davantage les stations qui comptent déjà le plus de lichens indicateurs de changement climatique (à droite sur le graphique), alors que les placettes les moins exposées (à gauche), surtout Grosbous et Schiffflange, restent largement insensibles. Cet enseignement concret souligne d'une part la nécessité de bien connaître les caractéristiques intrinsèques des différents taxons et, d'autre part, de disposer d'un inventaire le plus large possible de taxons indicateurs.



**Figure 9.**  
Indice climatique 2 aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2021 suivant la liste de référence de 78 taxons et la liste étendue de 132 taxons.

## 10. CONTRIBUTIONS SPECIFIQUES

### 10.1. Procédure pratique

La multitude de traitements appliqués à la base de données de l'observatoire écolichénique a conduit à introduire une nouvelle notion : la contribution spécifique d'une caractéristique écophysologique. La démarche permet de répondre en particulier à un défaut de sensibilité des autres indices, du fait que les caractéristiques moyennes d'un peuplement lichénique s'avèrent dominantes (voir 8.1).

La procédure de contribution spécifique s'appuie sur une sélection préalable de taxons considérés comme les plus typiques pour une caractéristique écophysologique donnée et de comparer ce cortège particulier au peuplement complet. Pour assurer une cohérence d'ensemble, les trois critères récurrents ont également été retenus ici, à savoir l'acido-basicité, l'eutrophisation et le changement climatique. Il est important de souligner que le positionnement sélectif présente une certaine subjectivité, puisqu'il est possible de retenir uniquement des caractéristiques extrêmes (taxons fortement acidophiles, taxons franchement nitrophiles ou indicateurs nets de changement climatique) ou alors des caractéristiques plus ou moins modérées. Dans le cas présent, la césure a été opérée selon des propriétés d'indication relativement franches (**tableau 13**).

**Tableau 13.**

Taxons lichénique présentant des propriétés écophysologique typées.

Indicateurs d'acidité	Indicateurs d'eutrophisation	Indicateurs de changement climatique
<i>Bryoria fuscescens</i>	<i>Caloplaca citrina</i>	<i>Bacidina neosquamulosa</i>
<i>Cladonia sp.</i>	<i>Caloplaca holocarpa</i>	<i>Flavoparmelia caperata</i>
<i>Evernia prunastri</i>	<i>Lecanora dispersa (gr)</i>	<i>Flavoparmelia soredians</i>
<i>Hypocnomyce scalaris</i>	<i>Lecanora muralis</i>	<i>Flavopunctelia flaventior</i>
<i>Hypogymnia physodes</i>	<i>Phaeophyscia nigricans</i>	<i>Halecania viridescens</i>
<i>Lecanora conizaeoides</i>	<i>Phaeophyscia orbicularis</i>	<i>Hyperphyscia adglutinata</i>
<i>Lecanora pulicaris</i>	<i>Physcia adscendens</i>	<i>Hypotrachyna afrorevoluta</i>
<i>Melanelia glabratula</i>	<i>Physcia caesia</i>	<i>Hypotrachyna revoluta</i>
<i>Ochrolechia androgyna</i>	<i>Physcia dubia</i>	<i>Melanelia elegantula/exasperatula</i>
<i>Ochrolechia microstictoides/turneri</i>	<i>Physcia tenella</i>	<i>Parmotrema chinense</i>
<i>Parmelia saxatilis</i>	<i>Physconia grisea</i>	<i>Phaeophyscia endophenicea</i>
<i>Parmeliopsis ambigua</i>	<i>Rinodina sp.</i>	<i>Physciella chloantha</i>
<i>Pertusaria amara</i>	<i>Xanthoria candelaria (gr)</i>	<i>Physconia grisea</i>
<i>Platismatia glauca</i>	<i>Xanthoria parietina</i>	<i>Pleurostictia acetabulum</i>
<i>Pseudevernia furfuracea</i>	<i>Xanthoria polycarpa</i>	<i>Punctelia borrieri</i>
<i>Scoliciosporum chlorococcum</i>		<i>Punctelia jeckeri</i>
<i>Tuckermannopsis chlorophylla</i>		<i>Punctelia subrudecta</i>

En déterminant le rapport entre la somme des valeurs d'abondance-recouvrement des taxons indicateurs et celle de la totalité des taxons recensés sur tous les arbres d'une station, le résultat exprime en nombre relatif une contribution spécifique de la caractéristique donnée au cortège lichénique de la placette. En multipliant ce nombre par 100, le résultat représente alors un pourcentage. Pour des raisons exposées plus haut (voir 9.1), ce traitement est spécifiquement appliqué à la liste étendue des 132 taxons.

$$\frac{\sum_{i=1}^m f_i}{\sum_{k=1}^n (\sum_{i=1}^m f_i)_k}$$

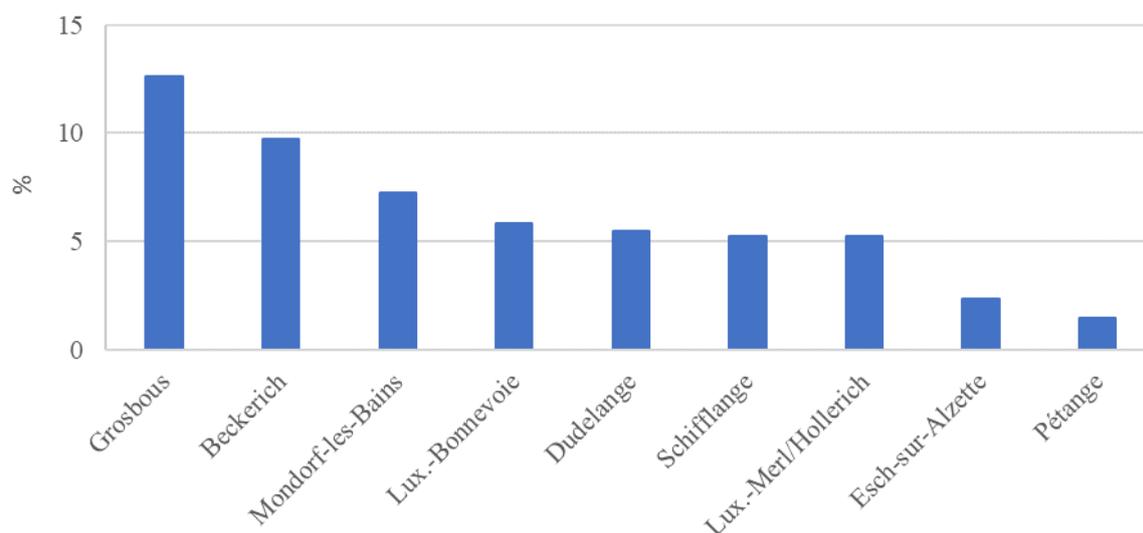
m : le nombre d'arbres de la placette

f<sub>i</sub> : la cote d'abondance-recouvrement de la caractéristique désirée, par arbre (de 1 à 5 ou 6)

n : le nombre total de taxons recensés de la placette.

## 10.2. Contribution spécifique d'acido-basité

La contribution spécifique d'acidophilie aux neuf placettes de l'observatoire est dans l'ensemble faible, d'un minimum de 1,5 % à Pétange à un maximum de 12,6 % à Grosbous (**figure 10**). La moyenne à l'échelle du réseau s'élève à 6,1 %. Ce constat d'ensemble confirme la perte des taxons lichéniques franchement acidophiles ou fortement acido-tolérants qui ont caractérisé le cortège lichénique à l'époque de l'acidité atmosphérique forte, en relation essentiellement avec d'importants rejets de dioxyde de soufre dans l'air ambiant.



**Figure 10.**

Contribution spécifique d'acido-basité aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2021.

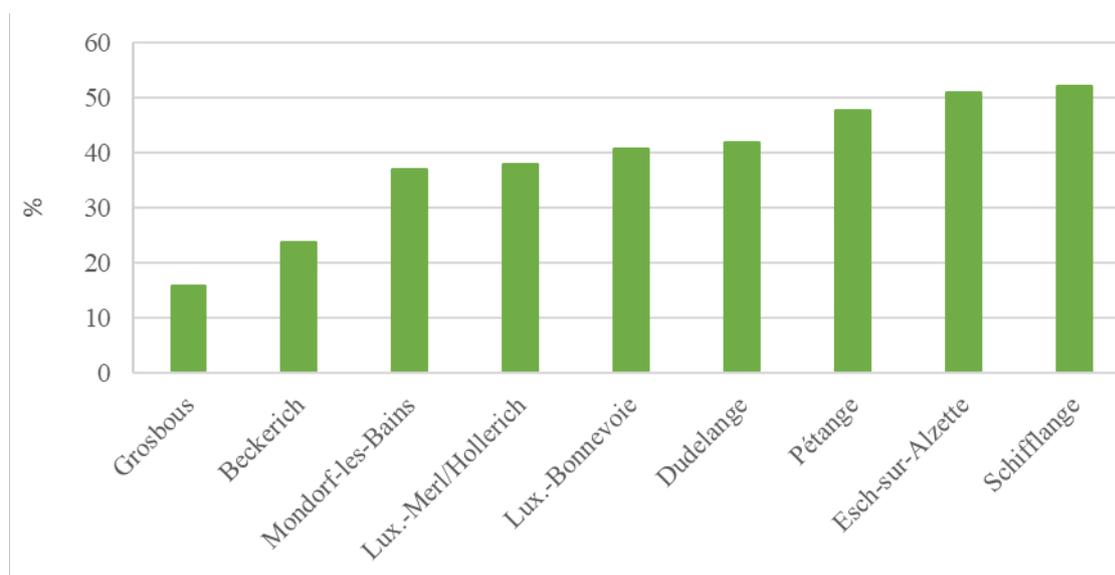
Le caractère acidophile décline rapidement des stations rurales de Grosbous et de Beckerich vers celle de Mondorf-les-Bains. Les deux placettes de la ville de Luxembourg associées à celles de

Dudelange et de Schifflange forment un bloc central. Les flores lichéniques d’Esch-sur-Alzette et de Pétange sont adaptées à une basicité élevée et ne comportent, dès lors, que des résidus de taxons acidophiles. Il est bien évident que la séquence de contribution d’acido-basicité présente une forte analogie avec le classement de l’indice d’acido-basicité (voir 8.3), étant donné que les fondements écolichéniques sont les mêmes.

### 10.3. Contribution spécifique d’eutrophisation

La contribution des lichens indicateurs stricts d’eutrophisation vis-à-vis des peuplements respectifs complets présente une large gamme, comprise entre 16 % à Grosbous et 52 % à Schifflange (**figure 11**). La moyenne du réseau se situe à 39 %, soit plus d’un tiers de la flore lichénique totale.

L’approche en terme de charge azotée dans l’air ambiant distingue clairement deux blocs, d’une part celui des stations rurales, Grosbous et Beckerich, avec Mondorf-les Bains en transition vers les placettes urbaines de Luxembourg et, d’autre part, celui des agglomérations du sud du pays. En fond de classement, Esch-sur-Alzette et Schifflange présentent une contribution d’eutrophisation qui dépasse le taux de 50 %. Là encore, l’analogie avec l’indice trophique est marquée (voir 8.4) ; l’intérêt de l’approche de contribution spécifique réside clairement dans la clarté du contraste du diagnostic.

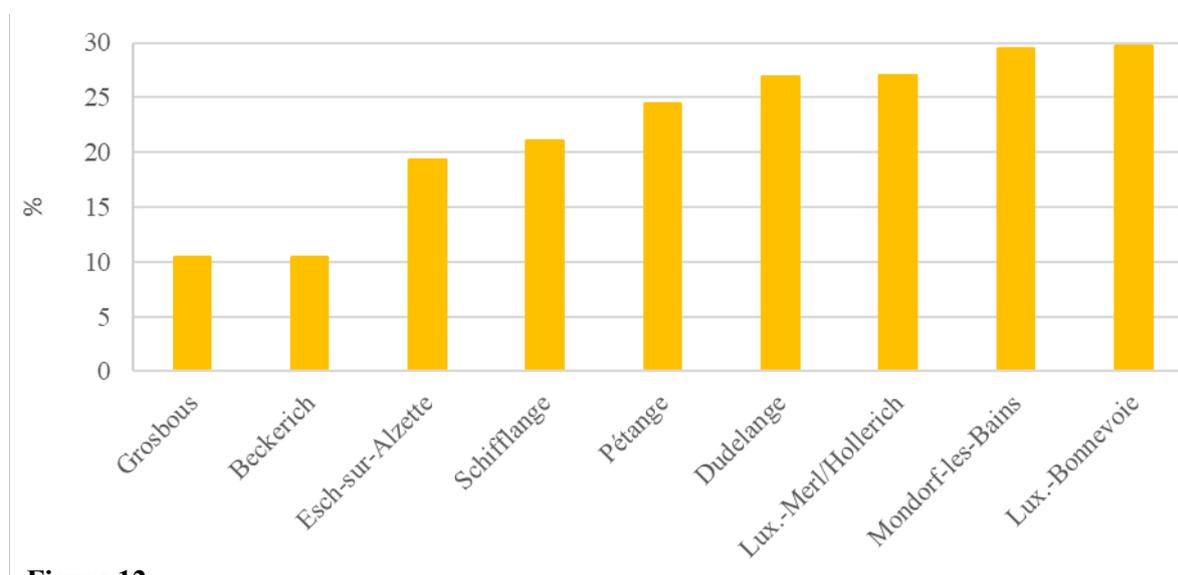


**Figure 11.** Contribution spécifique d’eutrophisation aux neuf stations du réseau d’observation écolichénique en 2021.

#### 10.4. Contribution spécifique d'indication de changement climatique

La contribution élaborée à partir des espèces indicatrices de changement climatique varie de 10 % à Grosbous à 30 % à Luxembourg-Bonnevoie (**figure 12**). La moyenne du réseau se situe à 19 %.

De façon évidente, les résultats obtenus présentent une analogie importante vis-à-vis des indices climatiques (voir 9.2 et 9.3) : les deux stations rurales, Grosbous et Beckerich, tout comme les agglomérations d'Esch-sur-Alzette et de Schifflange sont positionnées du côté des contributions faibles, alors que les placettes de Luxembourg (Merl/Hollerich et Bonnevoie) et de Mondorf-les-Bains présentent les fractions d'indicateurs lichéniques de changement climatique les plus élevées. Pétange et Dudelange, pour leur part, occupent une position intermédiaire avec une tendance vers les contributions fortes.



**Figure 12.**

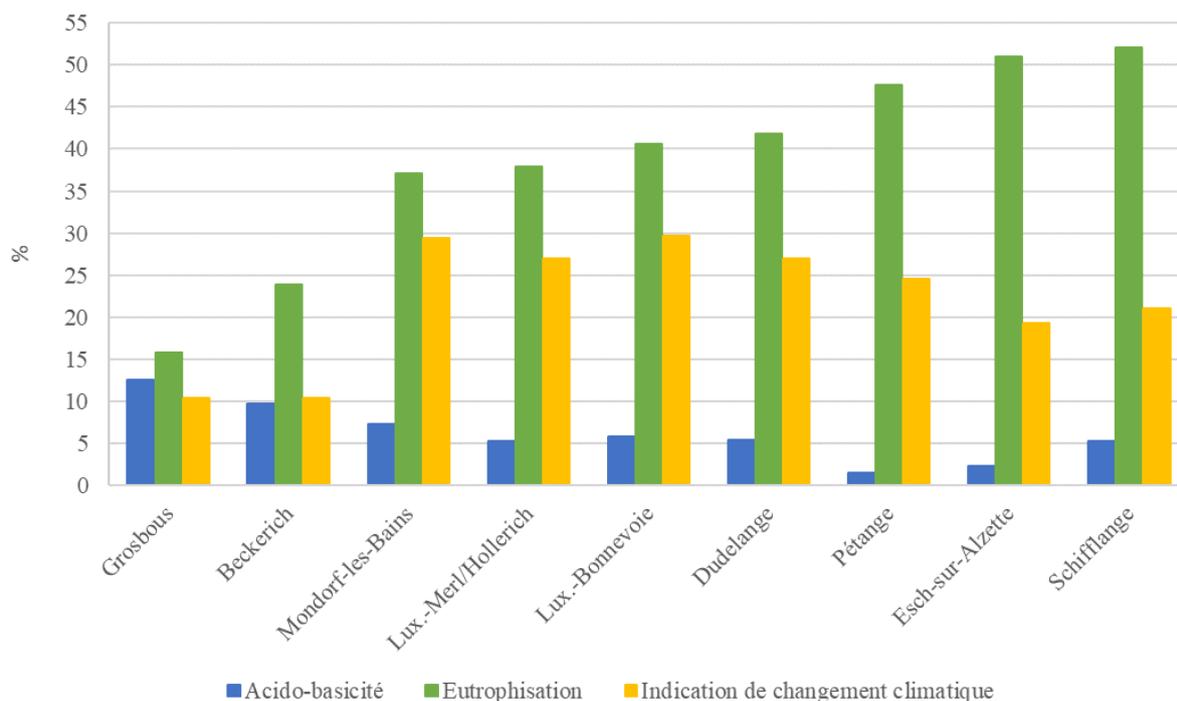
Contribution spécifique d'indication de changement climatique aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2021.

#### 10.5. Synthèse des contributions spécifiques

Une image intégrée des caractéristiques des peuplements de lichens sur les neuf placettes du réseau est obtenue en représentant les trois contributions spécifiques sous une forme groupée. Suivant un choix subjectif, les neuf stations du réseau sont classées dans l'ordre croissant de l'eutrophisation, ce critère atteignant comparativement les valeurs les plus élevées (**figure 13**).

L'approche des contributions spécifiques offre une visualisation différenciée des principales caractéristiques de la flore lichénique aux différentes placettes qui composent l'observatoire. Ainsi, les stations rurales de Grosbous et de Beckerich présentent une flore comparativement acidophile, peu nitrophile et à faible composante de changement climatique. A Mondorf-les-Bains, l'acidophilie est maintenue, la composante d'eutrophisation est modérée et la contribution

des indicateurs de changement climatique est importante. Les placettes de Schifflange, d'Esch-sur-Alzette et de Pétange sont caractérisées par une quasi absence de taxons acidophiles, un impact trophique important, mais une présence de taxons typiques du dérèglement climatique plutôt à franchement faible. Les deux stations de la ville de Luxembourg (Merl/Hollerich et Bonnevoie) se positionnent de façon médiane sur les critères d'acidophile et d'eutrophisation, mais se distinguent par une contribution d'indicateurs climatiques importante. Enfin, Dudelange occupe une position médiane suivant les trois critères.



**Figure 13.**

Contributions spécifiques d'acido-basicité, d'eutrophisation et d'indication de changement climatique aux neuf stations du réseau d'observation écolichénique en 2021.

## 11. SYNTHÈSE ET CONCLUSION

Les relevés de la flore lichénique épiphytisque effectués en 2017 et en 2021 constituent respectivement le quatrième et le cinquième inventaire de l'**observatoire écolichénique de la qualité de l'air** et plus largement de celle de l'environnement atmosphérique. Le réseau correspondant a été initié en 2005 avec la définition de huit placettes, réunissant des situations contrastées : milieu rural, petites agglomérations et villes importantes. Les huit stations d'observation sont formées chacune par un ensemble de six arbres, soit un réseau de 48 arbres. A l'initiative de la commune de Schifflange, une placette supplémentaire a été ajoutée au réseau, portant ainsi l'observatoire à neuf emplacements. Les procédures pratiques de l'inventaire écolichénique appliquées en 2017 et en 2021 ont été maintenues strictement inchangées par rapport aux trois relevés précédents de 2013, 2009 et 2005.

### *Constat des changements passés et des changements en cours*

L'évolution des cortèges lichéniques sur la période 2005 à 2021 trace les changements intervenus dans la qualité du milieu ambiant atmosphérique. Le premier aspect est la raréfaction, puis une perte partielle des indicateurs de l'**acidité forte** des années 1960 à 2000, liée à un excès de dioxyde de soufre dans l'air. Ainsi, *Lecanora conizaeoides*, un lichen très commun jusqu'à la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, a désormais totalement disparu des troncs des arbres, hors forêt. D'autres taxons franchement acidophiles, comme *Hypogymnia physodes* ou *Pseudevernia furfuracea*, se sont raréfiés ou ont été éliminés en raison d'une faible tolérance à l'**eutrophisation de l'atmosphère**, c'est-à-dire à un enrichissement en oxydes d'azote à partir des années 1990. Des espèces franchement nitro-tolérantes, voire nitrophiles se sont alors progressivement installées, comme *Xanthoria parietina*, *Phaeophyscia orbicularis* et *Physconia grisea*. Etant donné que le déclin des indicateurs d'acidité et l'avènement des indicateurs d'azote se sont déroulés de façon concomitante, la biodiversité des cortèges lichéniques a augmenté progressivement. Toutefois, peu à peu, une autre influence majeure vient se superposer à la dynamique précédente : il s'agit du **dérèglement climatique** avec, comme paramètres influents, d'une part des étés plus chauds et plus secs et, d'autre part, des hivers plus doux et plus humides. Les effets cumulatifs actuellement en cours sont de nature à faire évoluer les cortèges lichéniques en conséquence.

### *Adaptation des outils de suivi et d'interprétation*

La superposition, avec une dynamique propre, des influences sur les peuplements lichéniques de **trois changements globaux** - acidité forte, eutrophisation et dérèglement climatique - a motivé la décision à l'issue de la quatrième campagne en 2017 de renoncer à l'élaboration d'un compte rendu de synthèse. Ce choix, qui s'est révélé pertinent *a posteriori*, s'appuie sur le fait que l'outil d'interprétation central - la norme VDI 3957/13 de 2005 - se focalise exclusivement sur l'aspect de l'eutrophisation, c'est-à-dire d'un excès d'azote dans l'atmosphère, en grande partie liée aux émissions de dioxyde d'azote par le trafic automobile. Ensuite, la norme VDI 3957/20 de 2017 proposant les lichens comme indicateurs de changement climatique a éventuellement été publiée de façon prématurée, puisqu'elle a recours à des cotes écophysologiques actualisées en 2010.

Au niveau de l'observatoire écolichénique, la période entre les relevés de 2017 et 2021 a été mise à profit pour **adapter la méthodologie** au diagnostic des impacts actuels et futurs du dérèglement climatique. La mesure prioritaire a consisté à étendre la liste de référence de 78 taxons à 132 taxons. Même si, parmi les 54 nouveaux taxons, seuls 9 ont été recensés dans l'inventaire de 2021, le dispositif est désormais prêt en vue d'évaluer la dynamique des cortèges lichéniques, en particulier l'arrivée de nouvelles espèces, soit plus atlantiques (migration d'ouest en est), soit plus thermophiles ou moins sensibles au froid (migration du sud vers le nord). A ce stade, il est essentiel de préciser encore que les inventaires de terrain sont effectués suivant une procédure fixe, totalement indépendante des méthodes d'interprétation des données.

### *Principaux enseignements en matière de qualité de l'air ambiant*

Au lancement de l'observatoire écolichénique, l'intérêt central était axé sur la thématique de l'**eutrophisation** du compartiment atmosphérique. L'interprétation des inventaires successifs suivant la norme VDI 3957/13 montre que les **maxima d'impact** ont été atteints en 2009 et/ou en 2013. Les relevés suivants, en 2017 puis en 2021, sont caractérisés par une régression sensible des certains indicateurs d'azote stricts. Ces changements sont nettement plus marqués aux stations les plus exposées des centres industriels et urbains (Dudelange, Esch-sur-Alzette, Luxembourg, Pétange et Schiffflange) qu'en milieu rural (Beckerich, Grosbous et Mondorf-les-Bains).

La **biodiversité lichénique**, c'est-à-dire le nombre d'espèces ou de taxons de lichens par arbre ou par placette, suit une évolution analogue. Une augmentation au début du programme (entre 2005 et 2009) s'explique par le maintien d'un résidu de taxons acidophiles ou acido-tolérants de l'époque de l'acidité forte et, conjointement, le développement de taxons de plus en plus nitrophiles. A partir de 2013, les taxons franchement acidophiles avaient sévèrement décliné, puis le déclin a touché les lichens fortement nitrophiles. Pour certaines espèces, comme par exemple *Phaeophyscia nigricans* et *Xanthoria polycarpa*, les causes précises d'une raréfaction et/ou d'une disparition ne sont pas évidentes, étant donné qu'une diminution de l'eutrophisation et les effets de changement climatique, notamment les périodes de sécheresse en été, exercent des impacts concomitants.

**Quatre indices écophysologiques** des peuplements de lichens sont suivis dans le cadre de l'observatoire depuis son lancement : la toxisensibilité, l'acido-basicité, le statut trophique et les propriétés thermiques. Ces indices permettent à la fois de positionner les caractéristiques des neuf placettes les unes par rapport aux autres et de dégager des tendances d'évolution dans le temps à l'échelle du réseau. La diminution progressive d'effets de toxicité sur les cortèges lichéniques doit être interprétée comme la conséquence d'une maîtrise croissante des émissions de contaminants, essentiellement d'origine industrielle. L'évolution vers une augmentation de la basicité rejoint pour l'essentiel l'enseignement présenté plus haut d'un déclin de taxons acidophiles et d'un gain de taxons nitrophiles ou nitro-tolérants. L'indice trophique confirme les tendances vers une augmentation des oxydes d'azote dans l'air ambiant, selon les stations, jusqu'en 2009 ou en 2013, puis d'une réduction à partir de 2017 ou de 2021. L'indice thermique indique clairement une évolution vers des peuplements de lichens plus thermophiles ou du moins plus tolérants à la chaleur, ce qui suggère ou dénote une influence du dérèglement climatique.

A la suite de la campagne de 2017, force était de constater que l'enjeu futur de l'observatoire écolichénique était son adaptation à la nouvelle influence majeure qui est le changement climatique. A la suite de l'extension de l'inventaire de 78 à 132 taxons en vue de la campagne de 2021, deux **indices climatiques** ont été définis sur la base de la littérature lichénique la plus récente. Ces deux critères convergent vers un résultat, plutôt inattendu, de deux blocs de stations. Le premier, représentatif d'une présence comparativement faible de taxons indicateurs de changement climatique, est formé des placettes en milieu rural, Grosbous et Beckerich, et des stations de Schiffflange et d'Esch-sur-Alzette. L'explication la plus plausible consiste à admettre

que ces deux agglomérations bénéficient d'un « effet de protection » à partir des collines boisées qui les surplombent. Le deuxième bloc est formé des placettes de Pétange, de Mondorf-les-Bains et de la ville de Luxembourg. Les peuplements lichéniques y comptent comparativement davantage de lichens indicateurs de changement climatique. Entre ces deux tendances, la station de Dudelange se positionne de façon médiane.

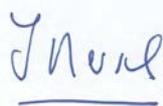
A la suite de très nombreux essais, une **nouvelle notion** est introduite comme outil d'interprétation des données de 2021 : elle est désignée de **contribution spécifique**. Cette approche reprend les trois critères écophysiologiques fondamentaux - l'acido-basicité, l'eutrophisation et le changement climatique - en comparant, pour chaque critère, les taxons indicateurs spécifiques par rapport à l'ensemble du peuplement lichénique d'un arbre ou d'une placette. Ce descriptif est construit de façon à s'exprimer en pourcentage, ce qui présente l'avantage d'aboutir à des contrastes entre les différentes placettes du réseau nettement plus importants que pour les autres outils d'interprétation. La représentation des trois critères sur un même graphique permet de visualiser les caractéristiques écophysiologiques des peuplements de lichens aux différentes placettes du réseau les unes par rapport aux autres.

### *Perspectives*

L'**adaptation de l'observatoire écolichénique** au défi de l'évaluation et du suivi des effets du dérèglement climatique a exigé un effort conséquent. La méthodologie de l'inventaire, principalement la liste de référence élargie des taxons, et les outils d'interprétation les plus objectifs et fiables sont maintenant en place. Le dispositif devra être validé et/ou remanié suivant les besoins avec l'ajout d'une nouvelle série de données à l'occasion de la prochaine campagne prévue en 2025.

Pour terminer, il est important de rappeler les atouts, mais également les limites de l'observatoire écolichénique. Ainsi, les relevés effectués à intervalle de temps régulier interviennent à des moments donnés d'une évolution courante qui forme la **résultante d'une dynamique complexe**. Le cortège lichénique se trouve sous l'influence de nombreux paramètres de l'environnement, principalement la qualité de l'air ambiant au sens large et le microclimat local, mais également les conditions macro-climatiques et les propriétés de l'arbre porteur (phorophyte). Par ailleurs, les impacts peuvent agir de façon synergique ou antagoniste pour provoquer des **réponses biologiques intégrées** (superposées ou cumulées) sans moyen de distinction des causes précises, qu'elles soient d'ordre local ou d'ordre global.

Luxembourg, le 4 décembre 2023



Jacques MERSCH

Diplômé en Sciences écologiques

Docteur en Toxicologie de l'environnement

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] BioMonitor (2005) Réseau national de surveillance de la qualité de l'air par l'observation des peuplements de lichens épiphytiques – Observatoire écolichénique. Définition du réseau d'observation et relevés initiaux. Administration de l'Environnement, Division Air / Bruit.
- [2] BioMonitor (2010) Réseau national de surveillance de la qualité de l'air par l'observation des peuplements de lichens épiphytiques – Observatoire écolichénique. Deuxième relevé en 2009. Administration de l'Environnement, Division Air / Bruit.
- [3] BioMonitor (2014) Réseau national de surveillance de la qualité de l'air par l'observation des peuplements de lichens épiphytiques – Observatoire écolichénique. Troisième relevé en 2013. Administration de l'Environnement, Division Air / Bruit.
- [4] CEN, Comité Européen de Normalisation (2014) Air quality – Biomonitoring with lichens. Assessing epiphytic lichen diversity. EN 16413.
- [5] VDI, Verein Deutscher Ingenieure (2005) Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Luftverunreinigungen mit Flechten (Bioindikation). Kartierung der Diversität epiphytischer Flechten als Indikator für Luftgüte. VDI 3957, Blatt 13.
- [6] Diederich P. & Sérusiaux E. (2000) The lichens and lichenicolous fungi of Belgium and Luxembourg. An annotated checklist. Musée national d'histoire naturelle, Luxembourg. ISBN 2-919877-00-3.
- [7] Van Haluwyn C. & Asta J. (2009) Guide des lichens de France – Lichens des arbres. Editions Belin.
- [8] BioMonitor (2010) Diagnostic écolichénique de la qualité de l'air dans la Commune de Schiffflange – Actualisation des relevés initiaux de 1999. Fondements d'un observatoire écolichénique. Administration communale de Schiffflange.
- [9] BioMonitor (2000) Diagnostic écolichénique de la qualité de l'air à Schiffflange. Administration communale de Schiffflange.
- [10] VDI, Verein deutscher Ingenieure (2017) Biologische Messverfahren zur Ermittlung und Beurteilung der Wirkung von Umweltveränderungen (Biomonitoring). Kartierung von Flechten zur Ermittlung der Wirkung von lokalen Klimaveränderungen. VDI 3957, Blatt 20.
- [11] Schmitz U., Stapper N.J., Stevens M., Wirooks L., Diestelhorst O. & Busch J. (2021) Klimafolgenmonitoring Landeshauptstadt Düsseldorf 2020 – Biologische Station Haus Bürgel Stadt Düsseldorf. Kreis Mettmann.
- [12] Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., Wirth V., Werner W. & Paulißen D. (1991) Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Kapitel 4 : Zeigerwerte von Flechten. ISBN 3-88452-518-2.

- [13] Wirth V. (2010) Ökologische Zeigerwerte von Flechten – erweiterte und aktualisierte Fassung. *Herzogia* 23 (2), 229-248.
- [14] Stapper N.J. & Franzen-Reuter I. (2018) Wirkung lokaler Klimaveränderungen auf baumbewohnende Flechten in Nordrhein-Westfalen zwischen 2001 und 2017. *Immissionsschutz* 3, 128-136.
- [15] Aptroot A., Stapper N.J., Kosuthova A., van Herk K.C.M. (2021) Lichens as an indicator of climate and global change. In : *Climate change*. Elsevier (third edition), 483-497.

## **LISTE DES ANNEXES**

---

**Annexe 1.** Stations de l'observatoire écolichénique

**Annexe 2.** Localisation et caractérisation des arbres composant les placettes d'observation

**Annexe 3.** Données brutes des relevés lichéniques effectués selon la norme VDI 3957/13 en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021  
(format électronique)

**Annexe 4.** Données brutes des relevés lichéniques visant la caractérisation écophysiological en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021  
(format électronique)

**Annexe 5.** Cotes écophysiological attribuées aux 78 taxons de l'inventaire lichénique

**Annexe 6.** Données brutes du relevé lichénique de 2021 après intégration des espèces indicatrices de changement climatique  
(format électronique)

## **LISTE DES ANNEXES**

---

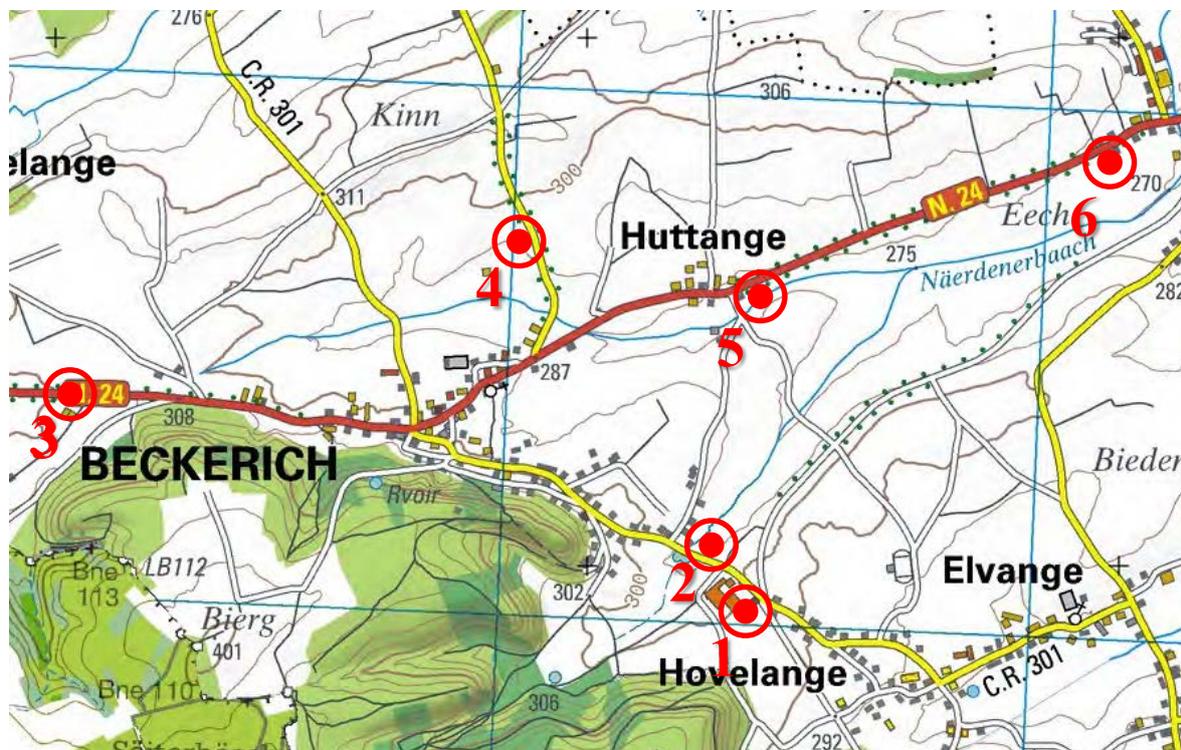
- Annexe 1.** Stations de l'observatoire écolichénique
- Annexe 2.** Localisation et caractérisation des arbres composant les placettes d'observation
- Annexe 3.** Données brutes des relevés lichéniques effectués selon la norme VDI 3957/13 en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021 (format électronique)
- Annexe 4.** Données brutes des relevés lichéniques visant la caractérisation écophysiological en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021 (format électronique)
- Annexe 5.** Cotes écophysiological attribuées aux 78 taxons de l'inventaire lichénique
- Annexe 6.** Données brutes du relevé lichénique de 2021 après intégration des espèces indicatrices de changement climatique (format électronique)

## **ANNEXE 1**

---

### **Stations de l'observatoire écolichénique**

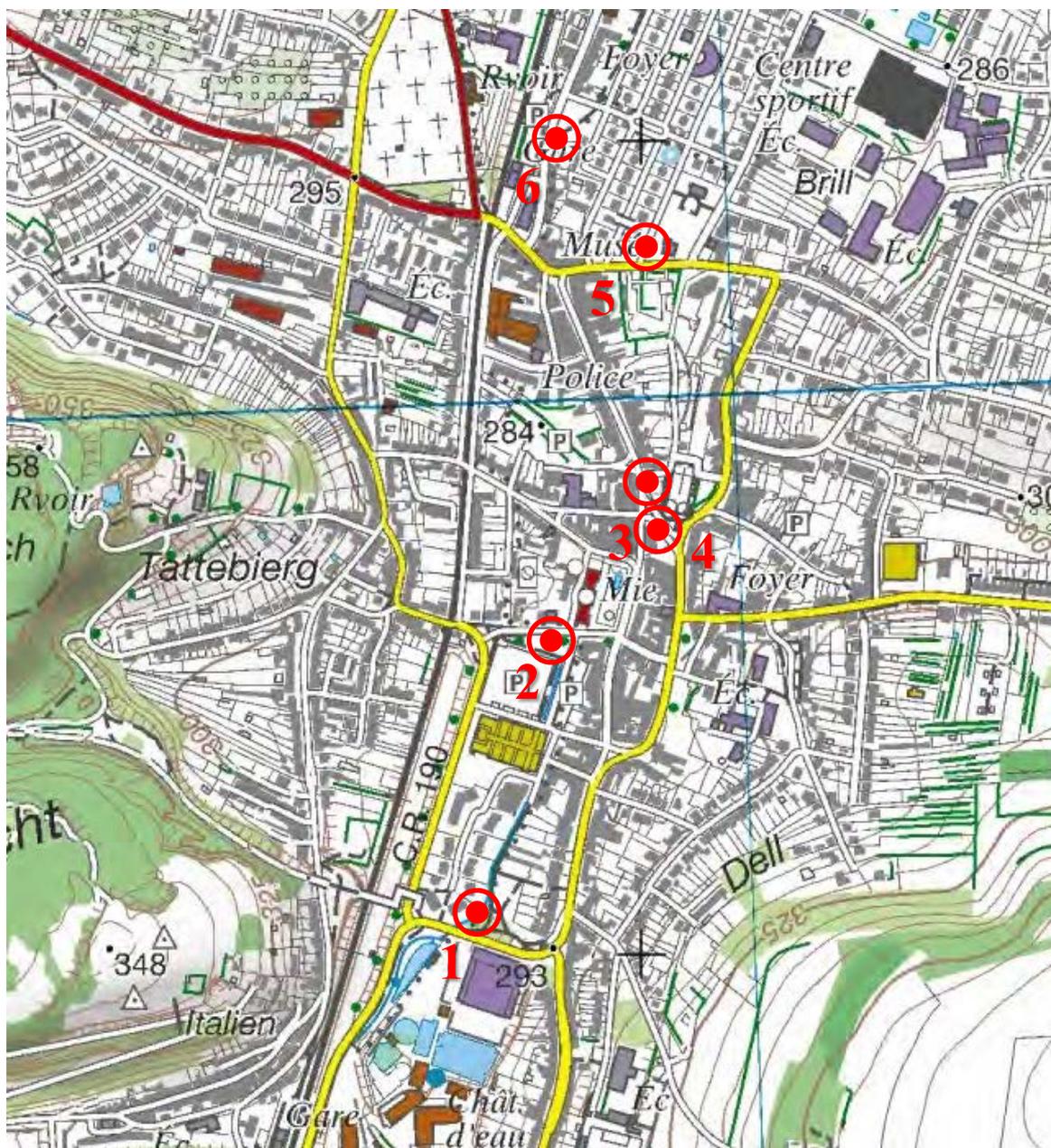
- **Beckerich**
- **Dudelange**
- **Esch-sur-Alzette**
- **Grosbous**
- **Luxembourg-Bonnevoie**
- **Luxembourg-Merl/Hollerich**
- **Mondorf-les-Bains**
- **Pétange**
- **Schifflange**



### Observatoire écolichénique - Station de Beckerich

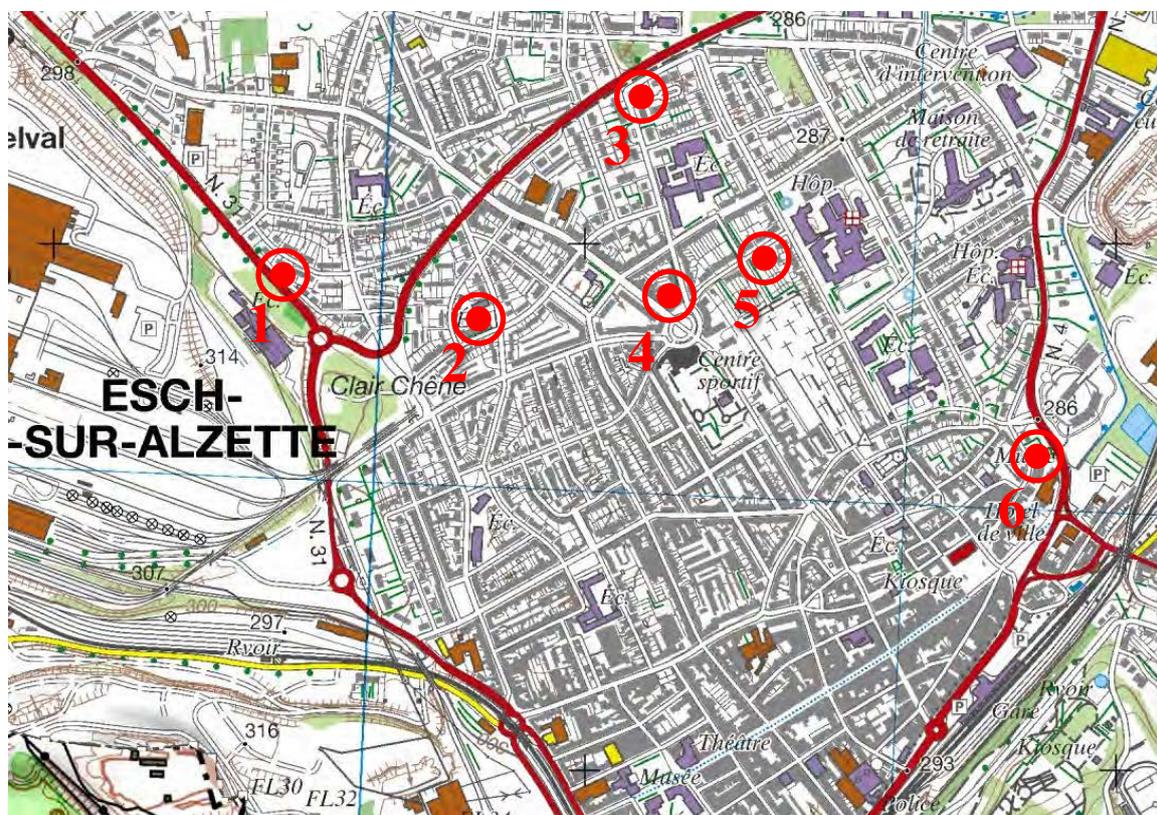
📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)

**Observatoire écolichénique - Station de Dudelange**

📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

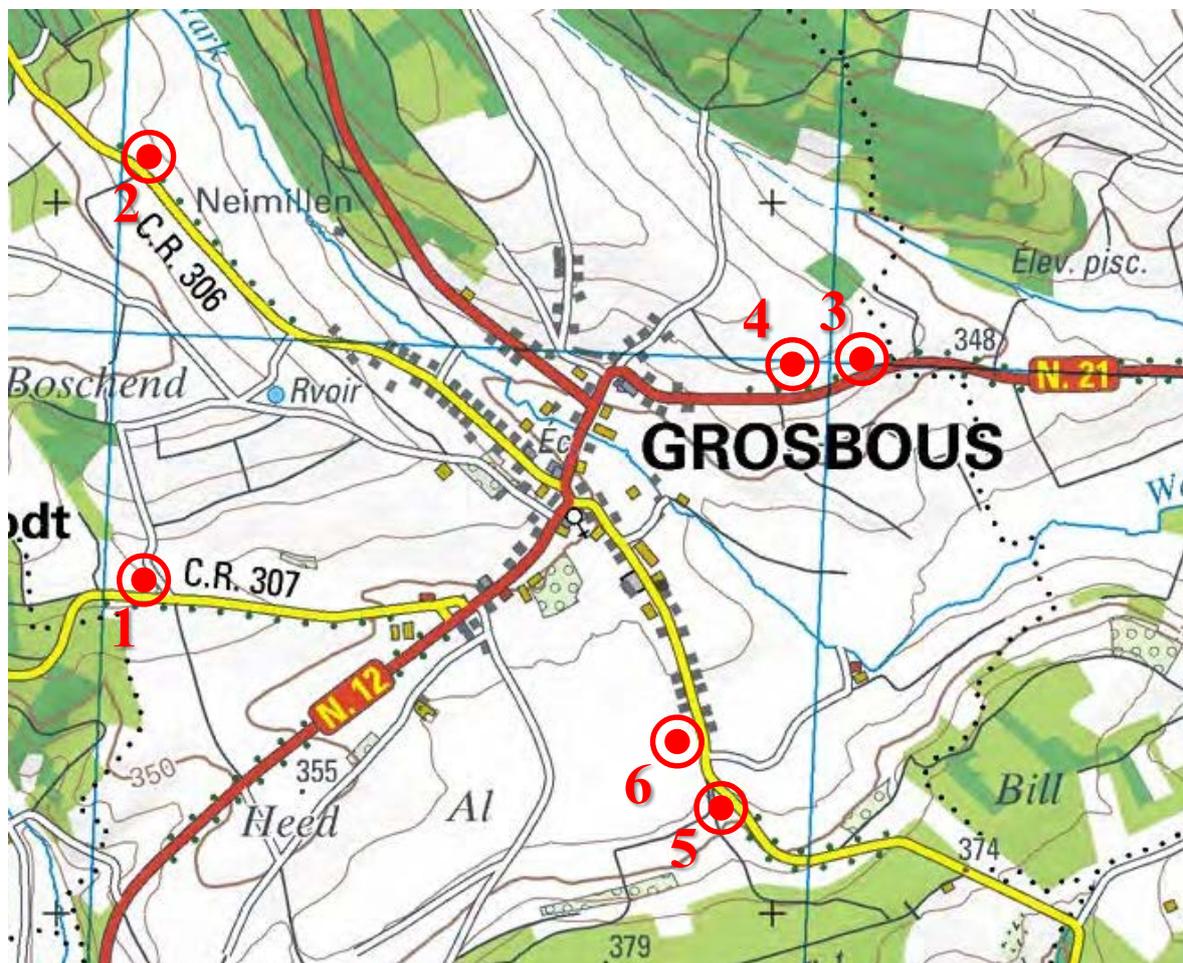
Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)



### Observatoire écolichénique - Station d'Esch-sur-Alzette

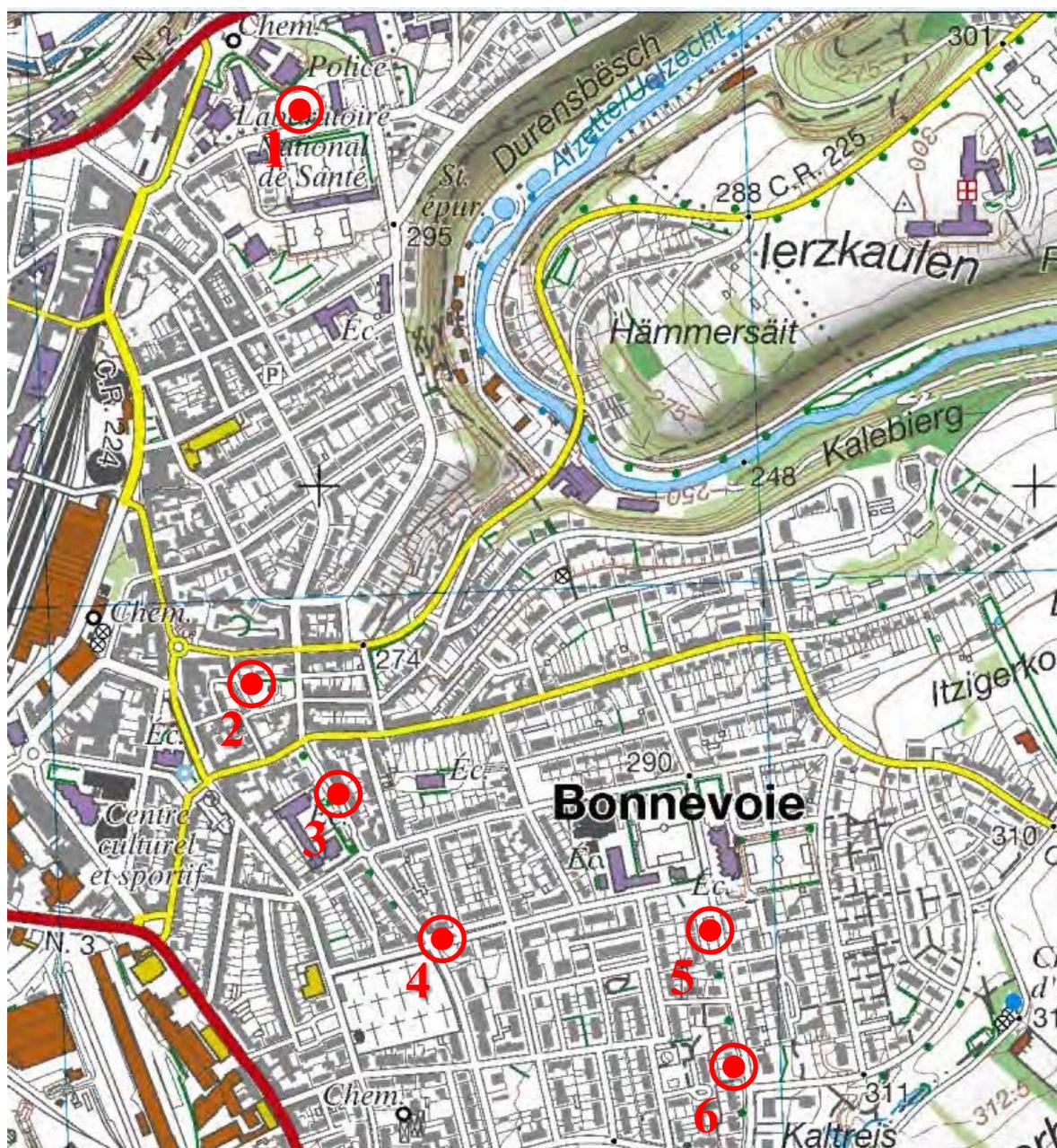
📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)

**Observatoire écolichénique - Station de Grosbous**

📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

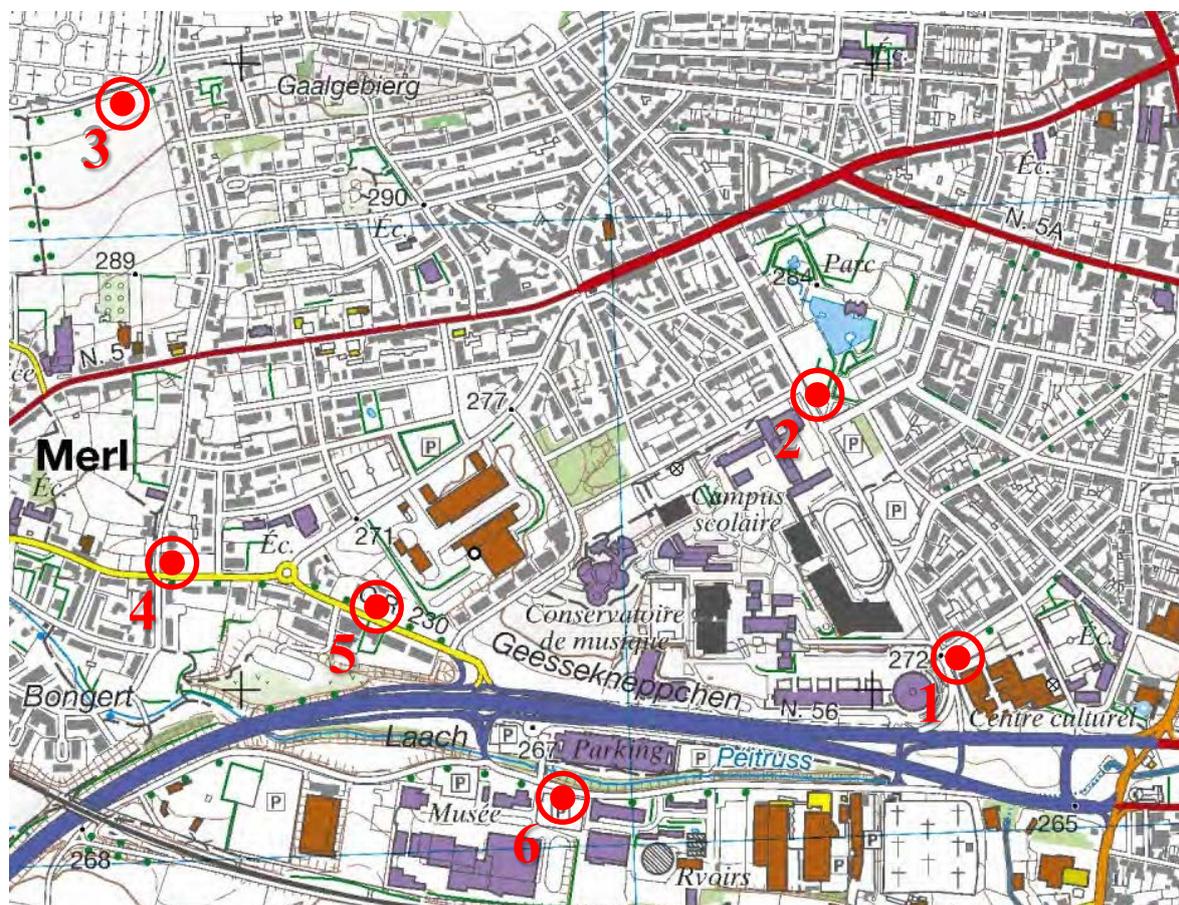
Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)



**Observatoire écolichénique - Station de Luxembourg-Bonnevoie**

📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

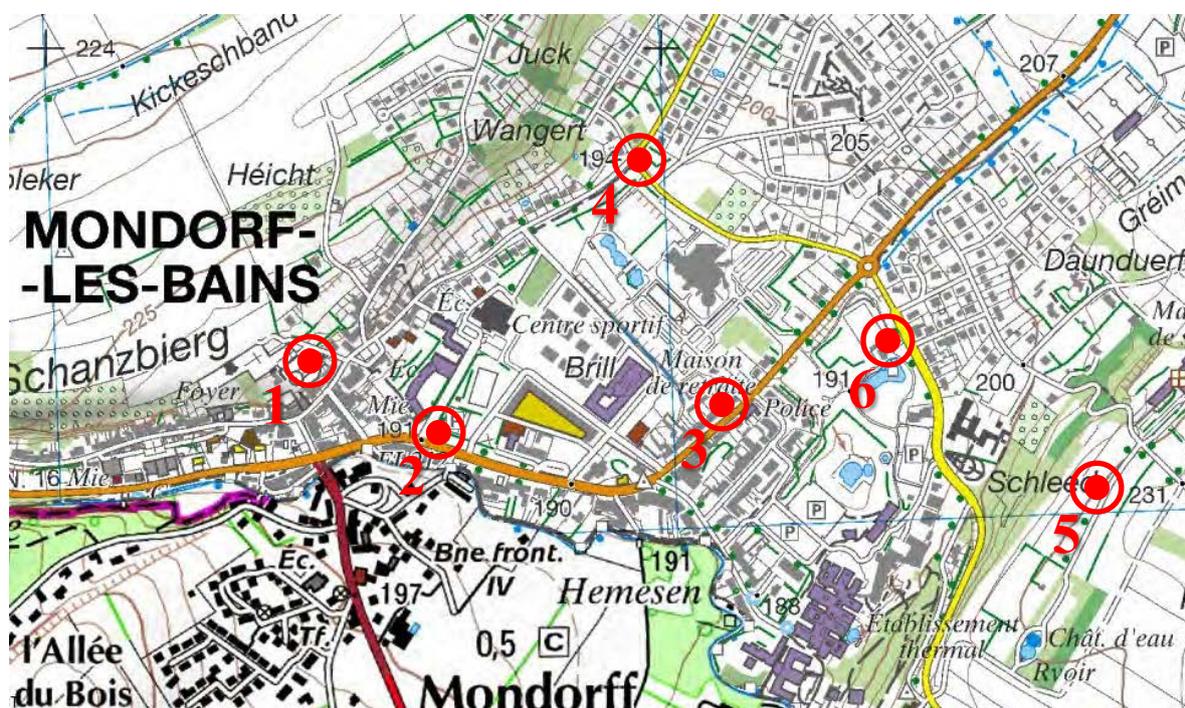
Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)



**Observatoire écolichénique - Station de Luxembourg-Merl/Hollerich**

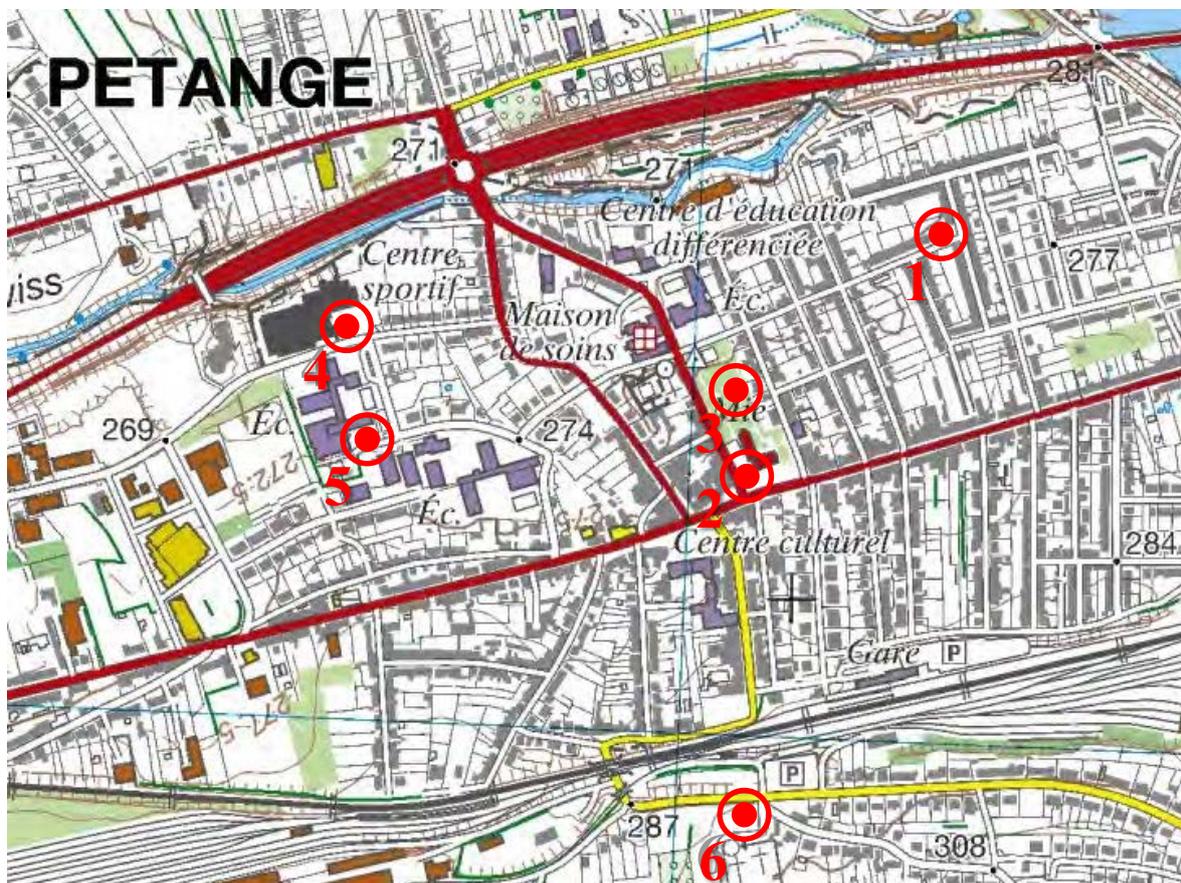
📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)

**Observatoire écolichénique - Station de Mondorf-les-Bains**

📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)



### Observatoire écolichénique - Station de Pétange

📍 Localisation des six arbres de l'inventaire lichénique

Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)

**Observatoire écolichénique - Station de Schiffflange**

📍 Localisation des cinq arbres de l'inventaire lichénique

Fond de carte : [www.geoportail.lu](http://www.geoportail.lu)

## **ANNEXE 2**

---

### **Localisation et caractérisation des arbres composant les placettes d'observation**

- **Beckerich**
- **Dudelange**
- **Esch-sur-Alzette**
- **Grosbous**
- **Luxembourg-Bonnevoie**
- **Luxembourg-Merl/Hollerich**
- **Mondorf-les-Bains**
- **Pétange**
- **Schifflange**

**Station d'observation de la flore lichénique à Beckerich.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1	Route de Hovelange (CR 301)	Prox. Rue Jos Seyler	Tilleul 170-182-182 183-186	N 49°43'30,1" E 05°53'59,9"
2	Route de Hovelange (CR 301)	Prox. ancien moulin de Beckerich	Tilleul 228-231-233 235-235	N 49°43'35,1" E 05°53'49,6"
3	Route d'Arlon (N 24)	Prox. d'un chemin rural	Frêne 199-202-207 216-225	N 49°43'55,0" E 05°51'51,5"
4	Route de Rédange (CR 304)	Prox. de l'entrée d'un pré de pâture (côté gauche)	Tilleul 91-109-121 132-142	N 49°44'09,9" E 05°53'18,3"
5	Route de Diekirch (N 24)	1er arbre à droite en quittant Beckerich	Tilleul 137-148-157 165-171	N 49°44'08,6" E 05°53'56,0"
6	Huttange Route d'Arlon (N 24)	Face à la maison N° 43	Tilleul 128-134-139 142-146	N 49°44'25,8" E 05°55'04,1"

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Dudelange.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1.2	Rue Schnauze Lach	Aire de jeux au bout de la Rue Auguste Liesch (remplacé en 2017)	Aulne xxx-xxx-xxx 99-113	N 49°26'30,4" E 06°04'57,8"
2	Place Jean Fohrman	Prox. Schwaarze Wee	Tilleul 91-100-107 111-119	N 49°28'41,6" E 06°05'03,0"
3.3	Place Fr. Kinnen (parvis de l'église)	Côté Av. G.-D. Charlotte (remplacé en 2009 et en 2013)	Tilleul xxx-xxx-128 141-153	N 49°28'46,6" E 06°05'08,0"
4.2	Rue Jean Jaurès	En face du parvis de l'église (remplacé en 2021)	Ailante xxx-xxx-xxx xxx-163	N 49°28'45,3" E 06°05'08,9"
5	Rue Dominique Lang	Entre Rue Victor Tesch et Rue Norbert Metz	Tilleul 124-142-154 165-179	N 49°28'56,3" E 06°05'05,0"
6.2	Rue Pierre Theis	Espace vert à hauteur de la Rue Jean Berchem (remplacé en 2021)	Erable xxx-xxx-xxx xxx-108	N 49°29'02,0" E 06°05'04,3"

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Esch-sur-Alzette.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1	Rue du Bois	Face Bd Ch. de Gaulle	Tilleul 73-89-102 117-134	N 49°30'03,1" E 05°58'02,0"
2	Rue des Franciscains	Face à la maison N° 32	Tilleul 90-101-112 106-112	N 49°30'00,4" E 05°58'21,0"
3	Rue Gal G.S. Patton	Face à la maison N° 10	Tilleul 81-92-99 106-112	N 49°30'13,6" E 05°58'34,1"
4	Rue Joseph Wester	Face à la maison N° 11	Tilleul 96-104-110 118-125	N 49°30'03,5" E 05°58'38,5"
5	Rue Robert Schuman	A gauche de l'entrée du cimetière	Tilleul 124-131-136 144-150	N 49°30'04,7" E 05°58'44,6"
6	Rue Emile Mayrisch	Face à la maison N° 14	Tilleul 74-83-85 88-92	N 49°29'56,8" E 05°59'06,4"

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Grosbous.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1	Route de Buschrodt (CR 307)	Prox. d'une croix et d'un chemin rural (côté droit)	Tilleul 168-173-176 179-183	N 49°49'27,1" E 05°57'00,3"
2	Route de Bastogne (CR 308)	7ème arbre d'une rangée de 9 tilleuls (côté droit)	Tilleul 208-214-220 223-226	N 49°50'07,3" E 05°56'53,7"
3.2	Route d'Ettelbruck (N 21)	Après le chemin rural, côté gauche N°71 (remplacé en 2021)	Tilleul xxx-xxx-xxx xxx-204	N 49°49'48,4" E 05°58'40,7"
4	Route d'Ettelbruck (N 21)	Prox. d'un chemin rural, côté gauche	Frêne 193-198-201 206-210	N 49°49'45,6" E 05°58'26,0"
5	Route de Mersch (CR 306)	Prox. d'un chemin rural, côté droit	Tilleul 173-181-187 193-200	N 49°49'11,1" E 05°58'15,8"
6	Route de Mersch (CR 306)	Face à un chemin rural, côté droit	Frêne 260-266-270 273-278	N 49°49'13,1" E 05°58'15,5"

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Luxembourg-Bonnevoie.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013- 2017-2021	Coordonnées GPS
1.2	Rue Auguste Lumière	Face à la maison N° 15 (remplacé en 2021)	Tilleul xxx-xxx-xxx xxx-111	N 49°36'18,9" E 06°08'25,8"
2.2	Place du Parc	Côté Rue Irmine (remplacé en 2009)	Tilleul xx-81-91 99-108	N 49°35'53,3" E 06°08'24,0"
3	Rue J.B. Gellé	En face de la maison N° 7	Tilleul 79-85-87 89-92	N 49°35'48,6" E 06°08'26,0"
4	Rue Demy Schlechter	Face à la maison N° 17	Tilleul 132-137-138 139-140	N 49°35'41,8" E 06°08'33,8"
5.2	Rue Nicolas Martha	Face à la maison N° 46 (remplacé en 2021)	Orme xx-xx-xx xx-80	N 49°35'41,5" E 06°08'53,3"
6	Rue Nicolas Martha	Face à la maison N° 74	Frêne 71-76-79 84-87	N 49°35'35,1" E 06°08'55,1"

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Luxembourg-Merl/Hollerich.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1	Rue Raymond Poincaré	En face de la maison N° 66	Tilleul 90-99-104 109-113	N 49°36'04,6" E 06°06'53,1"
2	Parc de Merl	Entrée Rue de Bragance 4e arbre sur la gauche	Tilleul 96-105-111 117-122	N 49°36'18,7" E 06°06'42,7"
3	Rue Jean Mersch-Wittenauer	Rangée de tilleuls à gauche, 6e arbre	Tilleul 69-78-85 92-99	N 49°36'33,0" E 06°05'47,1"
4	Rue de la Barrière	Prox. Rue de Merl	Erable 70-75-78 82-86	N 49°36'09,1" E 06°05'49,9"
5	Rue de Merl	En face de la maison N° 57	Frêne 81-95-106 114-120	N 49°36'06,0" E 06°06'07,6"
6	Rue de Bouillon	VdL, Service transports, milieu de 5 arbres	Erable 115-127-130 133-138	N 49°35'57,6" E 06°06'17,7"

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Mondorf-les-Bains.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1.2	Allée Jean Linster	A gauche de l'entrée du cimetière	Erable xxx-xxx-xxx	N 49°30'22,5" E 06°16'13,6"
2.2	Avenue F. Clément	(remplacé en 2021) A proximité Avenue des villes jumelées	xxx-101 Erable xxx-xxx-xxx	N 49°30'18,8" E 06°16'24,8"
3	Route de Remich (N 16)	(remplacé en 2017) Face à la maison N° 47	92-99 Erable 78-83-87	N 49°30'23,9" E 06°16'54,9"
4	Rue Dr. A. Schumacher	Bifurcation avec la Rue de la Résistance	90-95 Peuplier 89-106-117	N 49°30'33,3" E 06°16'45,8"
5	Rue Klenge Park	Au milieu de l'allée de tilleuls	126-136 Tilleul 167-175-178	N 49°30'15,7" E 06°17'19,6"
6	Avenue Marie-Adélaïde (CR 152a)	En face de la maison N° 24	179-180 Tilleul 148-155-162	N 49°30'23,2" E 06°17'02,6"
			162-162	

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Pétange.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2005-2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1	Rue Lentz	Aire de jeux, intersection Rue de l'Indépendance	Tilleul 142-146-150	N 49°33'33,8" E 05°52'50,2"
2.2	Hôtel de Ville	A gauche du parvis (remplacé en 2013)	153-157 Tilleul xxx-xxx-156	N 49°33'24,3" E 05°52'37,6"
3	Hôtel de Ville	Parc (milieu)	161-167 Frêne 143-148-149	N 49°33'27,5" E 05°52'36,6"
4.2	Rue Pierre Hamer	Parking du Centre sportif (remplacé en 2013)	151-157 Erable xx-xx-88	N 49°33'30,6" E 05°52'13,9"
5	Rue Mathias Adam	Ecole An Eigent prol. Rue Batty Weber	100-107 Erable 79-94-106	N 49°33'26,0" E 05°52'14,7"
6	Rue Prinzenberg	En face de l'entrée du cimetière	112-119 Erable 108-114-115	N 49°33'09,9" E 05°52'37,0"
			118-124	

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

**Station d'observation de la flore lichénique à Schiffflange.**

Arbre N°	Lieu ou lieu-dit	Localisation précise	Espèce circonférence * 2009-2013 2017-2021	Coordonnées GPS
1	Avenue de la Résistance	Groupe de tilleuls, 2° arbre à gauche	Tilleul 131-138 142-145	N 49°30'21,1" E 06°00'17,5"
2.2	Rue de la Gare	Alignement d'érables, 9° arbre (remplacé en 2017)	Erable xx-xx 75-78	N 49°30'22,7" E 06°00'28,1"
4	Quartier Wendel	Parc de la Maison Biewer	Tilleul 241-250 257-266	N 49°30'27,0" E 06°00'47,3"
5	Cité Paerchen	A hauteur de la maison N° 129	Erable 76-81 86-93	N 49°30'32,0" E 06°01'04,1"
6	Rue Michel Rodange	Espace vert devant l'école	Bouleau 100-103 104-107	N 49°30'18,2" E 06°01'07,3"

\* : en cm à une hauteur de 1,5 m du sol.

## **ANNEXE 3**

---

### **Données brutes des relevés lichéniques effectués selon la norme VDI 3957/13 en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021**

Format électronique

- **Beckerich**
- **Dudelange**
- **Esch-sur-Alzette**
- **Grosbous**
- **Luxembourg-Bonnevoie**
- **Luxembourg-Merl/Hollerich**
- **Mondorf-les-Bains**
- **Pétange**
- **Schifflange**

---

## **ANNEXE 4**

---

### **Données brutes des relevés lichéniques visant la caractérisation écophysiolgique en 2005, 2009, 2013, 2017 et 2021**

Format électronique

- **Beckerich**
- **Dudelange**
- **Esch-sur-Alzette**
- **Grosbous**
- **Luxembourg-Bonnevoie**
- **Luxembourg-Merl/Hollerich**
- **Mondorf-les-Bains**
- **Pétange**
- **Schifflange**

## **ANNEXE 5**

---

### **Cotes écophysiological attribuées aux 78 taxons de l'inventaire lichénique**

- **cotes de toxisensibilité (To)**
- **cotes d'acido-basicité (R)**
- **cotes trophiques (N)**
- **cotes thermiques (Th)**

Taxon	Cotes de toxissensibilité (TO)	Cotes d'acido-basacité (R)	Cotes trophiques (N)	Cotes thermiques (Th)
Amandinea punctata	1	5	7	
Anaptychia ciliaris	8	7	4	5
Bryoria fuscescens	6	3	4	4
Buellia griseovirens	5	5	4	5
Caloplaca cerina	8	7	5	
Caloplaca citrina		9	9	
Caloplaca herbidella	7	5	3	4
Caloplaca holocarpa	8			
Candelaria concolor	5	6	7	5
Candelariella reflexa/xanthostigma	5	5	6	5
Candelariella vitellina	4	5	8	
Cladonia sp.				
Evernia prunastri	4	3	4	5
Flavoparmelia caperata	6	5	4	7
Flavopunctelia flaventior	4	4	6	8
Hypocenomyce scalaris	3	2	2	5
Hypogymnia physodes	2	3	3	
Hypogymnia tubulosa	4	5	4	5
Hypotrachyna revoluta	6	5	4	7
Lecanora carpinea (gr)	5	5	4	5
Lecanora conizaeoides	1	2	5	5
Lecanora dispersa (gr)	2	8	8	
Lecanora expallens	1	4	5	6
Lecanora muralis		8	9	
Lecanora pulicaris	4	3	4	4
Lecanora saligna	3	4	5	
Lecanora subfusca (gr)	4	8	7	
Lecanora symmicta	6	5	4	4
Lecidella elaeochroma	4	6	5	5
Lepraria incana (gr)	1	3	5	5
Lobaria pulmonaria	9	5	2	4
Melanelia elegantula/exasperatula	5	4	5	6
Melanelia exasperata	9	6	3	3
Melanelia glabra	8	6	5	4
Melanelia glabrata	4			
Melanelia subargentifera	7	7	6	5
Melanelia subaurifera	6	6	5	5
Ochrolechia androgyna	6	3	3	4
Ochrolechia microstictoides/turneri	6	4	4	5

Taxon	Cotes de toxissensibilité (TO)	Cotes d'acido-basacité (R)	Cotes trophiques (N)	Cotes thermiques (Th)
Parmelia saxatilis	3	3	3	
Parmelia sulcata	2	5	7	
Parmelina pastillifera	7	5	5	4
Parmelina tiliacea	5	5	6	6
Parmeliopsis ambigua	3	2	2	4
Parmotrema perlatum		5	4	7
Pertusaria albescens	6	6	6	
Pertusaria amara	6	3	2	
Pertusaria coccodes	6	5	6	5
Pertusaria flavida	6	4	3	6
Pertusaria hemisphaerica	6	4	3	6
Pertusaria pertusa	6	5	3	6
Phaeophyscia nigricans	2	8	9	
Phaeophyscia orbicularis	2	7	9	
Phlyctis argena	6	4	5	5
Physcia adscendens	2	7	8	
Physcia aipolia	6	7	5	
Physcia caesia	4	8	9	
Physcia dubia	3	7	8	
Physcia stellaris	6	6	6	4
Physcia tenella	2	6	7	
Physconia distorta	7	7	6	5
Physconia enteroxantha	7	6	6	4
Physconia grisea	3	6	8	7
Physconia perisidiosa	6	6	4	4
Platismatia glauca	5	2	2	4
Pleurosticta acetabulum	4	7	5	6
Pseudevernia furfuracea	4	3	2	4
Punctelia subrudecta	4	4	5	7
Ramalina farinacea	5	5	4	5
Ramalina fastigiata	8	6	4	5
Ramalina fraxinea	8	6	4	5
Rinodina sp.				
Scoliciosporum chlorococcum	2	3	6	5
Tuckermannopsis chlorophylla	5	3	3	4
Usnea sp	6			
Xanthoria candelaria (gr)	3	6	8	
Xanthoria parietina	3	7	8	
Xanthoria polycarpa	3	7	8	

---

## **ANNEXE 6**

---

### **Données brutes du relevé lichénique de 2021 après intégration des espèces indicatrices de changement climatique**

Format électronique

- **Beckerich**
- **Dudelange**
- **Esch-sur-Alzette**
- **Grosbous**
- **Luxembourg-Bonnevoie**
- **Luxembourg-Merl/Hollerich**
- **Mondorf-les-Bains**
- **Pétange**
- **Schifflange**