

Chapitre I : Quels indicateurs pour évaluer la qualité des écosystèmes

1. Introduction

Le terme écosystème désigne un ensemble d'êtres vivants (animaux, végétaux et micro-organismes) et de composantes physiques et chimiques qui agissent plus ou moins étroitement les uns sur les autres. L'écosystème est avant tout un moyen d'analyser la nature, même s'il correspond fréquemment à des environnements concrets comme une mare ou une forêt. La Terre elle-même peut être considérée comme un écosystème.

L'organisation et le fonctionnement des écosystèmes déterminent, pour une part importante, la qualité de notre environnement et la disponibilité d'une partie de nos ressources, notamment biologiques. Cependant, la croissance de la population, l'urbanisation et l'industrialisation dans le monde entier exercent des pressions énormes sur l'écosystème, ce qui nuit à la qualité de l'air que nous respirons, de l'eau que nous buvons, de la nourriture que nous consommons et de la disponibilité des ressources que nous utilisons pour maintenir notre mode de vie.

La constatation d'une dégradation permanente des écosystèmes a motivé une réflexion internationale sur la définition du concept de qualité des écosystèmes. L'évaluation de la santé des écosystèmes doit tenir compte de trois considérations majeures. Premièrement, l'écosystème doit être affranchi de tous signes de dysfonctionnement. Deuxièmement, les multiples interactions et transferts de flux (matière et énergie) qui définissent un écosystème doivent s'autoréguler, et donc fonctionner sans l'intervention de l'homme. Troisièmement, l'écosystème ne doit pas être perturbé par les sous-systèmes le composant (atmosphères, eau, sol).

La qualité ou la santé des écosystèmes, basée sur leur aptitude à fonctionner naturellement, est donc fortement dépendante de la qualité des milieux (sols, eau et air). Il est dès lors essentiel de considérer les facteurs qui influencent la composition chimique, physique et biologique des milieux naturels, dans les processus de fonctionnement des écosystèmes, et de rechercher de moyens de protection des écosystèmes et des outils de surveillance écologique.

Cette obligation a donné lieu à une profusion d'indicateurs pour qualifier l'état d'un écosystème (avant ou après impacts) et évaluer les actions correctrices.

2. Historique

En 1992, lors du Sommet de la Terre à Rio de Janeiro, avait marqué le début d'un vaste programme mondial de lutte contre les changements climatiques, l'érosion de la biodiversité, la désertification et l'élimination des produits toxiques dangereux. Il a été mis en lumière que les indicateurs pouvaient jouer un rôle important, en tant qu'outils de communication et d'aide à la décision en particulier pour le développement durable.

Des indicateurs environnementaux et de développement durable ont alors été activement recherchés par la communauté internationale, dont le WWF (de l'anglais : World Wide Fund for Nature) ou Fonds mondial pour la nature), la première organisation mondiale de protection de la nature, ayant été particulièrement actif dans ce domaine.

3. Définition d'un indicateur

En général, un indicateur est un paramètre, ou une valeur calculée à partir d'un ensemble de paramètres, qui fournit des informations sur un phénomène ou sur son état. Un indicateur est conçu pour un certain objectif, et au profit d'un certain groupe d'utilisateurs. Il apporte un élément de réponse à une question que l'on se pose, par exemple : « Quel est le niveau d'intégrité écologique ? ».

Un indicateur environnemental est un «outil» qui sert à évaluer l'état de santé du milieu. Il sert aussi à informer et à orienter les politiques environnementales.

4. Objet et rôle de l'indicateur

Un indicateur environnemental est un outil d'analyse, d'information, de communication et d'incitation. Il simplifier l'information pour mettre en lumière des phénomènes parfois complexes ; il quantifie l'information, sous la forme d'une mesure simple ou d'une mesure agrégée dont on suit l'évolution ou que l'on compare à des valeurs de références.

Il a pour but :

- comparer des objets différents (dans l'espace et le temps) ;
- déceler les grandes tendances, (aspect prospectif) ;
- déterminer des modèles, des réponses, des axes et des priorités politiques (aide à la décision) ;
- coordonner et de mettre en pratique les plans proposés (planification) ;
- mesurer le niveau de performance des réponses (évaluation des actions et des politiques).

5. La typologie des indicateurs

La typologie des indicateurs, un système qui structure et classe les indicateurs en :

- **Indicateurs de pression** : visent à mettre en évidence l'effet environnemental des pratiques agricoles sur l'environnement. Ce concept de pression fait référence aux causes qui engendrent des changements d'état et des impacts.

En fait, ce type d'indicateur vise généralement à identifier les causes d'altérations écologiques. On distingue :

- Les pressions directes (par exemple : pollutions, prélèvements de ressources peu renouvelables) ;
- Les pressions indirectes (par exemple : activités humaines à l'origine d'altérations d'écosystèmes, destruction de milieux naturels, fragmentation des habitats, etc.)

- **Indicateurs d'état** : correspondent à des mesures directes de l'état du milieu. Ils se rapportent à la qualité et la quantité de la diversité écosystématique (par exemple : changement de la diversité génétique des espèces animales et végétales, changement de statut des espèces menacées, etc.)

- **Indicateurs de réponse** : ils illustrent l'état d'avancement des mesures prises en faveur de la restauration, de la protection et/ou de la gestion des écosystèmes et de la biodiversité, c'est-à-dire évaluent dans quelles mesures les modifications de pratiques via entre autres des programmes d'action ont atteint les objectifs fixés.

6. Caractéristiques ou conditions minimales de l'indicateur

Un indicateur doit avoir de nombreuses qualités pour être intéressant :

- Il doit répondre à la question que l'on se pose ;
- il doit être sensible aux variations de la qualité de l'état du milieu et mettre en évidence les liens entre les différents composants de l'écosystème ;
- il doit être fiable, précis et facile à mettre en œuvre (protocole simple et applicable d'année en année).

L'évaluation de la qualité des écosystèmes nécessite l'utilisation d'indicateurs physiques et/ou chimiques pertinents. Cependant, la surveillance basée exclusivement sur la mesure des paramètres physicochimiques ne permet pas de juger réellement de la qualité écologique des écosystèmes. En fait, la destruction de certains biotopes peut avoir pour résultat d'éliminer certaines espèces, sans pour autant altérer la qualité physico-chimique des écosystèmes.

La surveillance biologique de l'environnement est destinée à compléter cette première approche à l'aide d'outils appropriés, indicateurs biologiques et animaux sentinelles.

Les indicateurs biologiques sont « des espèces ou associations d'espèces capables par leur comportement général (disparition, augmentation ou variation densitaire) de rendre compte de l'évolution générale d'un milieu ».

Un système d'animaux sentinelles est défini comme « un dispositif destiné à collecter, systématiquement et régulièrement, des données sur des animaux exposés à la pollution environnementale ; ces données sont ensuite analysées pour identifier les dangers potentiels pour la santé de l'homme et de l'environnement ».

Les notions d'animal sentinelle et d'espèce bio-indicatrice sont très voisines et procèdent de la même idée : que les animaux informent sur les milieux dans lesquels ils vivent. Il y a une différence d'échelle. Avec une espèce bio-indicatrice, le seul critère retenu est la plus ou moins grande abondance d'individus, alors que l'animale sentinelle fait appel, nous le verrons plus loin, à la variation de paramètres au niveau organique, tissulaire, cellulaire ou moléculaire de l'individu.

Il y a aussi une différence d'objectifs : l'animale sentinelle est spécifiquement mis en place pour informer sur la pollution environnementale (réagit rapidement aux changements de condition du milieu), alors que l'espèce bio-indicatrice est destinée à donner une idée de la « qualité écologique ». C'est-à-dire la présence ou l'état renseigne sur certaines caractéristiques écologiques (physico-chimiques, biologiques ou fonctionnelles) de l'environnement ou sur l'incidence de certaines pratiques.

De plus, certaines espèces bio-indicatrices sont d'excellents exemples de « végétaux sentinelles », par exemple les lichens qui servent depuis longtemps à estimer la pollution atmosphérique.

Chapitre II : Évaluation de la qualité des écosystèmes aquatiques (Eau)

L'eau, ressource vitale au cœur des écosystèmes, est nécessaire au bon fonctionnement de la planète et à sa régulation climatique. Mais, l'eau et les milieux aquatiques sont également indispensables aux activités humaines et doivent donc être protégés et gérés pour garantir une utilisation durable. Or, préserver les ressources en eau et agir efficacement impliquent une bonne connaissance de l'état des milieux aquatiques.

Pour ce faire, des experts mettent au point des méthodes d'évaluation, en s'appuyant sur des dispositifs de surveillance plus communément appelés « réseaux de mesure » et des systèmes d'interprétation des résultats basés sur des normes de qualité.

Les bilans sur la qualité de l'environnement aquatique apportent ainsi les éléments nécessaires à l'élaboration de plans d'actions visant à éviter ou diminuer les pollutions, à gérer durablement les prélèvements et à soutenir le bon fonctionnement des écosystèmes. Ils contribuent à identifier l'origine des dysfonctionnements, les sources de pollution, etc., et à sélectionner les lieux où agir prioritairement. Ils permettent également de mesurer le chemin parcouru et de veiller à l'efficacité des stratégies adoptées, en évaluant par exemple l'évolution de l'état des eaux après la mise en place d'actions.

Le suivi environnemental des écosystèmes aquatiques revêt une grande importance et il donc est crucial d'utiliser des indicateurs environnementaux fiables et adéquats. L'appréciation de la qualité des eaux repose essentiellement sur la mesure de paramètres physico-chimiques qui est largement utilisée pour diagnostiquer les problèmes de pollution de l'eau et de dégradation des habitats. Le recours aux indicateurs biologiques constitue également une méthode d'évaluation plus complète et plus informative puisqu'ils permettent également aux gestionnaires d'évaluer les impacts de ces différentes perturbations sur la faune et la flore aquatique.

1. Indicateurs physicochimiques de l'eau

Les paramètres à analyser sont choisis en fonction de l'objectif recherché :

1.1. Température : la température est l'un des facteurs écologiques les plus importants parmi tous ceux qui agissent sur les organismes aquatiques. Elle joue un rôle primordial dans la distribution des espèces, aussi bien par ses niveaux extrêmes que par ses variations diurnes ou saisonnières.

La plupart des réactions chimiques vitales sont ralenties voire arrêtées par un abaissement important de température. A contrario, des augmentations de température peuvent avoir pour effet de tuer certaines espèces, mais également de favoriser le développement d'autres espèces en entraînant ainsi un déséquilibre écologique.

Pour chaque espèce, on définit un préférendum chimique qui correspond à la zone de température où le poisson se tient le plus facilement quand il est libre de se déplacer dans un gradient de température. Par exemple, la température préférentielle est de 15°C pour la truite arc-en-ciel et de 23-24°C pour le gardon.

Ainsi, la température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. Plus la température de l'eau s'élève, plus la quantité d'oxygène dissous diminue. Une température trop élevée des eaux peut donc aboutir à des situations dramatiques de manque d'oxygène dissoute pouvant entraîner : la disparition de certaines espèces, la réduction de l'auto épuration et l'accumulation de dépôts nauséabonds (odeurs).

La température se mesure généralement en degrés Celsius. Elle dépend de nombreux facteurs, comme les changements de température de l'air, la nébulosité, les courants, et bien sûr - à long terme - le changement climatique. Les déchets libérés dans l'eau peuvent également affecter la température si celle des effluents est très différente de celle de l'eau.

1.2. Conductivité : la conductivité permet d'évaluer rapidement et approximativement la minéralisation globale de l'eau. Si l'eau très pure est un isolant qui oppose une grande résistance au passage de l'électricité, il n'en est plus de même lorsqu'elle est chargée en sels minéraux d'origine naturelle (calcium, magnésium, sodium, potassium). La conductivité permet d'apprécier globalement l'ensemble des produits en solution dans l'eau. La connaissance du contenu en sels dissous est importante dans la mesure où chaque organisme aquatique a des exigences propres en ce qui concerne ce paramètre. Les espèces aquatiques ne supportent généralement pas des variations importantes en sels dissous qui peuvent être observées par exemple en cas de déversements d'eaux usées.

1.3. Turbidité : la turbidité est un indicateur essentiel de la qualité de l'eau. Elle correspond à une réduction de la transparence due à la présence dans l'eau de particules en suspension minérales ou organiques, vivantes ou détritiques, provenant souvent du

ruissellement de l'industrie, de l'agriculture et des sources domestiques. Ainsi, plus une eau est chargée en biomasse phytoplanctonique ou en particules sédimentaires, plus elle est turbide.

La turbidité est une caractéristique optique de l'eau, à savoir sa capacité à diffuser ou absorber la lumière incidente. La turbidité est donc un des facteurs de la couleur de l'eau.

Une turbidité trop élevée peut par conséquent nuire à la pénétration de la lumière et des ultra-violet dans l'eau, et donc la photosynthèse et le développement des bactéries. Par ailleurs, la couleur de l'eau affecte aussi sa température et donc sa teneur en oxygène, son évaporation et sa salinité.

1.4. Matières en suspension (MES) : ce sont des particules solides très fines et généralement visibles à l'œil nu, théoriquement, elles ne sont ni solubilisées, ni à l'état colloïdale. Comme cité ci-dessus, ces matières sont en relation avec la turbidité, leur mesure donne une première indication sur la teneur en matière colloïdale d'origine minérale ou organique.

1.5. Dureté : la dureté est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Elle est due uniquement aux ions calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}). La présence de ces deux cations dans l'eau tend souvent à réduire la toxicité des métaux.

La dureté de l'eau est liée à la nature géologique des sols traversés, et peut varier de façon naturelle au cours de l'année. Elle est exprimée par le titre hydrotimétrique (TH) en degré français ($^{\circ}\text{F}$).

1.6. pH (potentiel hydrogène) : le pH est l'un des plus importants paramètres opérationnels de la qualité de l'eau. Sa mesure correspond à l'un des essais les plus fréquemment utilisés en chimie de l'eau. Le pH donne le degré d'acidité ou d'alcalinité d'une eau. Il est le reflet de la concentration d'une eau en ions H^+ . On parle alors de pH acide, de pH neutre ou de pH basique (L'échelle des pH s'étend en pratique de 0 (très acide) à 14 (très alcalin) ; la valeur médiane 7 correspond à une solution neutre).

Le pH d'une eau naturelle peut varier de 4.5 à 8.3 en fonction de la nature acide ou basique des terrains traversés. La plupart des organismes se sont adaptés de façon à vivre dans une eau ayant un pH spécifique et peuvent mourir même si le pH varie faiblement. Le pH est

donc un important critère de qualité de l'eau car il conditionne la possibilité de vie aquatique et de bien des ses usages.

Ainsi, le pH influence la toxicité de plusieurs éléments en régissant un grand nombre de réactions chimiques. Il joue, en effet, un rôle important sur l'équilibre entre les autres composés du milieu (azote ammoniacal, sulfure de sodium, acide cyanhydrique, etc.) lorsqu'ils ont une toxicité variable selon qu'ils se trouvent ou non sous forme ionisée. Par exemple, des pH faibles (eaux acides) augmentent notamment le risque de présence de métaux sous une forme ionique plus toxique et des pH élevés augmentent les concentrations d'ammoniac, toxique pour les poissons.

Les principales sources de pollution qui influencent le pH d'un écosystème aquatique sont les déchets industriels, le ruissellement agricole ou l'écoulement mal maîtrisé des exploitations minières. En rajoutant les combustions fossiles qui jouent un rôle essentiel dans la formation des pluies acide, cette dernière est formée aussi par des sources naturelles comme les feux de forêt et les éruptions volcaniques. Ces polluants sont susceptibles de venir perturber l'équilibre du l'écosystème aquatique. Réduire tout apport de pollution dans l'écosystème contribuera donc à la stabilité du pH.

1.7. Oxygène dissous : l'oxygène dissous est un indicateur important de qualité de l'eau et du bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques. C'est l'un des paramètres physico-chimiques qui assurent le maintien d'un état satisfaisant des milieux aquatiques.

En fait, l'oxygène dissous dans l'eau est un élément fondamental qui intervient dans la majorité des processus biologiques. Il s'agit surtout de : la respiration, la décomposition de la matière organique et la transformation de composés chimiques en formes moins dangereuses.

La solubilité de l'oxygène dans l'eau dépend de différents facteurs : la température, la pression et la force ionique du milieu. Les changements, d'origine naturelle ou humaine, introduits dans le milieu aquatique peuvent donc avoir des incidences sur la teneur en oxygène dissous et par conséquent, la survie de la plupart des organismes vivants est menacée. L'eau froide, par exemple, est capable de contenir plus d'oxygène que l'eau chaude, et une forte concentration de bactéries dues à la pollution des eaux usées peuvent réduire le pourcentage de saturation. La teneur en oxygène dissous aura donc tendance à diminuer dans l'eau au fur et à mesure que le climat change et que la température augmente. De ce fait, la

mesure de l'oxygène dissous et de son pourcentage de saturation sont importante pour l'évaluation de la qualité des eaux et le maintien de la vie aquatique.

1.8. Charge en matières organiques : demande biochimique en oxygène (DBO) et demande chimique en oxygène (DCO) :

L'oxydation des composés organiques biodégradables par les microorganismes entraîne une consommation de dioxygène (O_2). La mesure de cette demande en oxygène permet d'évaluer le contenu d'une eau en matières organiques biodégradables, donc son degré de pollution ou sa qualité.

Deux méthodes permettant d'évaluer la quantité en matière organique présente dans l'eau sont généralement utilisées : la demande biochimique en oxygène (DBO) et la demande chimique en oxygène (DCO). Ces deux méthodes se basent sur la différence entre la teneur en oxygène dissous initiale et la teneur en oxygène dissous finale après oxydation de la matière organique présente dans un échantillon d'eau.

✓ Demande biochimique en oxygène

La demande biochimique en oxygène (DBO), constitue une mesure de la pollution des eaux par les matières organiques. C'est la quantité d'oxygène nécessaire aux microorganismes vivants pour assurer l'oxydation et la dégradation des matières organiques présentes dans l'eau usée. L'indicateur utilisé est généralement la DBO5 :

La DBO5 : correspond à la quantité d'oxygène (exprimée en mg/l) nécessaire aux microorganismes décomposeurs pour dégrader et minéraliser en 5 jours la matière organique présente dans un litre d'eau polluée. Plus la DBO5 est élevée, plus la quantité de matières organiques présentes dans l'échantillon est élevée.

La demande biochimique en oxygène est un paramètre très utilisé dans le contrôle de la pollution organique provenant des effluents industriels et urbains ainsi que des rejets des fabriques de pâtes et papiers.

✓ **Demande chimique en oxygène (DCO)**

La DCO : est étroitement liée à la méthode standard de laboratoire nommée Méthode Dichromate. Avec cette méthode, la demande chimique en oxygène correspond à la quantité d'oxygène nécessaire pour la dégradation par voie chimique, effectuée à l'aide d'un oxydant puissant (dichromate de potassium), des composés organiques présents dans l'eau. La concentration est exprimée en mg/L.

Sur la base de cette méthode, la DCO est devenue un paramètre couramment utilisé dans l'analyse des eaux usées et les études des pollutions.

2. Indicateurs biologiques de l'eau (analyses hydrobiologiques)

Les bioindicateurs (indices biologiques) développés pour l'étude des milieux aquatiques sont des indicateurs constitués par un groupe d'espèces ou un groupement végétal dont la présence renseigne sur certaines caractéristiques écologiques de l'environnement, ou sur l'incidence de certaines pratiques sur la qualité de l'écosystème considéré. Ainsi, toute modification de la composition des communautés vivantes hébergées par un milieu aquatique est la preuve d'une perturbation subie par l'écosystème.

Parmi ces bioindicateurs, cinq indices biologiques, permettent la caractérisation de l'état biologique (structure et fonctionnement) des écosystèmes aquatiques :

2.1. L'indice Biologique Global Normalisé (IBGN)

L'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN) : est une méthode d'évaluation de la qualité générale d'un cours d'eau au moyen d'une analyse de la macrofaune qui est considérée comme une expression synthétique de la qualité générale du cours d'eau. En effet, l'évaluation s'effectue à travers l'analyse quantitative (prélèvements) des peuplements de macroinvertébrés (insectes, crustacées, mollusques et vers) benthiques (invertébrés vivant au fond des cours d'eau).

Ces indices donnent une bonne image de la qualité biologique globale du cours d'eau, car la présence ou l'absence des macro-invertébrés dépend à la fois de la qualité de l'eau et de celle de l'habitat. Le choix des macroinvertébrés se justifie par les avantages :

- qu'ils ont de se trouver sur tous types de substrats par toutes les saisons, avec des déplacements actifs réduits à quelques dizaines de mètres. Face à des perturbations ou des pollutions majeures, mis à part cette possibilité de dérive, ils ne peuvent que subir ou mourir. Ils sont donc représentatifs des conditions environnementales d'un milieu donné ;
- les communautés qu'ils représentent sont taxonomiquement très hétérogènes, généralement abondantes et diversifiées. La probabilité qu'au moins quelques-uns de ces organismes puissent réagir à un changement particulier des conditions environnementales, est par conséquent très forte ;
- leur sensibilité est variable et différenciée face aux différents types de polluants, et leurs réactions sont généralement rapides ;
- de plus, leur durée de vie est suffisamment longue (quelques mois à quelques années) pour fournir un enregistrement intégré de la qualité environnementale
- enfin, les macroinvertébrés sont relativement faciles à collecter. Leur identification n'est pas aussi difficile que celle des micro-organismes et du plancton, et de nombreux ouvrages de détermination sont disponibles.

Cet ensemble de caractéristiques font que les macroinvertébrés benthiques sont à l'origine de nombreux outils diagnostiques de la qualité des écosystèmes aquatiques, dont l'indice biologique global normalisé (IBGN).

Les macro-invertébrés sont échantillonnés à l'aide d'un filet de type Surber (**fig.1**). De façon générale, les macroinvertébrés benthiques sont récoltés selon des protocoles d'échantillonnage standardisés qui ont été élaborés dans l'optique d'optimiser le ratio coût/efficacité. Par la suite, le traitement des échantillons en laboratoire consiste à identifier les organismes à l'espèce, au genre, à la famille ou à l'ordre, selon le type de suivi effectué et le groupe de macroinvertébrés étudié. Puis, la composition des communautés est analysée et les résultats sont traduits en un calcul de différents indices selon la problématique à l'étude.

La détermination de l'indice IBGN est établi à partir du tableau de détermination comprenant en ordonnée les 9 groupes faunistiques indicateurs et en abscisse les 14 classes de variété taxonomique. Le calcul de l'indice se fait en trois étapes :

1) la détermination de la “classe de variété taxonomique” : la variété taxonomique de l'échantillon (St) est égale au nombre total de taxons récoltés même s'ils ne sont représentés que par un seul individu. Ce nombre est confronté aux classes figurant en abscisse du tableau. ;

2) le groupe faunistique indicateur (GI) : en ne prenant en compte que les taxons indicateurs représentés dans les échantillons par au moins trois individus ou dix selon les taxons ;

3) le calcul de l'indice : en lui-même est obtenu par la formule suivante :

IBGN = N° du groupe faunistique indicateur + (N° de classe de variété – 1) avec

$$\text{IBGN} \leq 20$$

Cet indice s'exprime par une note, allant de 0 à 20 : plus la note est élevée, meilleure est la qualité biologique du milieu. Une représentation cartographique des résultats obtenus pour chaque station peut être réalisée en utilisant les couleurs proposées dans la norme de l'IBGN (voir tableau ci-dessous) :

Couleurs	Bleu	Vert	Jaune	Orange	Rouge
Qualité biologique	Très bonne	Bonne	Moyenne	Médiocre	Mauvaise
IBGN	17-20	13-16	9-12	5-8	≤ 4



Figure 1 : Prélèvement de macroinvertébrés à l'aide d'un filet SURBER

2.2. L'indice poisson en rivière (IPR)

L'état des peuplements piscicoles constitue un des éléments de qualité permettant l'évaluation de l'état écologique des cours d'eau. L'indice poisson en rivière permet, à partir de la connaissance de la structure des peuplements de poissons, de déterminer la qualité biologique générale des cours d'eau. Cet indice vise à évaluer l'écart entre la composition du peuplement piscicole échantillonné par pêche électrique, et la composition du peuplement attendue en situation de référence (écopotentialité), c'est à dire en l'absence de toute perturbation de l'homme sur le milieu. Plus le peuplement est proche de l'état de référence, moins la note d'IPR est élevée.

Le choix des poissons se justifie par les avantages :

- les poissons sont présents dans la grande majorité des milieux aquatiques et jouent un rôle clé à plusieurs niveaux de la chaîne trophique, des consommateurs primaires aux carnivores ;
- les tendances populationnelles en termes d'abondance et de distribution sont très variables d'une espèce à l'autre ;
- bien qu'elle soit variable d'une espèce à l'autre, la durée de vie des poissons se chiffre en moyenne à 20 ans, ce qui correspond à une longévité significativement plus longue que la plupart des autres catégories de bio-indicateurs ;
- de plus, leur taxonomie, leur distribution et leur écologie sont mieux connues que chez la plupart des autres groupes biologiques aquatiques, et leur capture et leur identification sur le terrain sont relativement faciles ;
- enfin, les poissons accumulent dans leurs tissus les métaux et les composés organochlorés. Ce phénomène de bioaccumulation est surtout présent chez les espèces territoriales ou non migratrices.

Ainsi, les poissons sont sensibles à la qualité physico-chimique et aux pollutions chimiques de l'eau. Les aménagements et les activités anthropiques font subir des modifications aux milieux aquatiques qui impactent les peuplements piscicoles, notamment par la simplification voire la disparition des mosaïques d'habitats, nécessaires à l'accomplissement des cycles de vie des différentes espèces.

Le calcul de l'indice (IPR) repose sur la mesure des anomalies réputées être dues aux perturbations anthropiques. Un IPR de 0 signifie qu'il n'y a aucun écart entre la situation mesurée et la situation jugée "idéale" ; Un IPR élevé signale un écart important. L'IPR est aussi en moyen d'affecter des classes de qualité aux différentes parties des cours d'eau, selon l'échelle suivante :

Note de l'IPR	Classe de qualité
<7	Excellente
]7-16]	Bonne
]16-25]	Médiocre
]25-36]	Mauvaise
>36	Très mauvaise

2.3. Indice Oligochètes de Bioindication des Sédiments (IOBS)

Les sédiments représentent une composante essentielle des écosystèmes fluviaux et lacustres. En effet, ils jouent un rôle important pour de nombreuses espèces en tant qu'habitat ou site de ponte, représentant ainsi un milieu non négligeable de diversité biologique. Ils assurent également des fonctions écologiques majeures dont la plupart sont indispensables au bon fonctionnement des cycles biogéochimiques.

Cependant, face à l'augmentation permanente des activités anthropiques (urbanisation, industrialisation, pratiques agricoles intensives) auxquelles est associée une forte expansion des rejets de substances chimiques dans l'environnement, les sédiments peuvent également servir de récepteurs naturels pour certains contaminants qui s'y accumulent avec le temps. Il est donc crucial que ce compartiment soit évalué à l'aide d'une approche méthodologique appropriée afin d'identifier s'il peut ou non contribuer à la dégradation d'un écosystème aquatique.

Parmi les outils développés dans le domaine de l'écologie, les oligochètes ont la particularité d'être de bons bioindicateurs de la qualité des sédiments. Ce sont des vers aquatiques vivant dans les sédiments au fond des cours d'eau.

Ces organismes sédentaires et fousseurs se caractérisent par leur capacité d'adaptation et de colonisation d'habitats très diversifiés. Leur sensibilité à la pollution varie selon l'espèce, allant de sensibles à très résistantes aux pollutions, ce qui rend leur étude intéressante pour évaluer la qualité des sédiments.

L'Indice Oligochètes de Bioindication des Sédiments (IOBS) permet d'évaluer la qualité biologique des sédiments fins et sableux présents dans les cours d'eau naturels ou artificialisés. Se basant sur la description et le comptage de taxons d'oligochètes à développement strictement aquatique et généralement peu mobiles, cet indice fait apparaître les incidences écologique des rejets polluants (charge organique ; micropolluants organiques et métalliques).

La richesse taxonomique (nombre d'espèces différentes) de l'échantillon et le pourcentage des individus les plus tolérants à la pollution (famille des Tubificidae) permet de calculer l'IOBS qui s'exprime selon 5 classes de qualité (très bonne, bonne, moyenne, médiocre et mauvaise). Comme le montre tableau ci-dessous, lorsque la valeur de l'indice est supérieure ou égale à 6, cela signifie que le niveau de qualité des sédiments est "Très bon". A l'inverse, quand l'indice est strictement inférieur à 1, cela indique que le niveau de qualité des sédiments est "Mauvais" :

Classes de qualité	Valeurs de l'indice IOBS	Niveau de qualité biologique des sédiments
Bleu	≥ 6	Très bon
Vert	$3 \leq \text{IOBS} \leq 6$	Acceptable à bon
Jaune	$2 \leq \text{IOBS} \leq$	Moyen
Orange	$1 \leq \text{IOBS} < 2$	Médiocre
Rouge	$\text{IOBS} < 1$	Mauvais

2.4. L'indice Biologique Diatomées (IBD)

Les diatomées sont des micro-algues (végétaux microscopiques) présentes dans l'ensemble des milieux aquatiques. Elles colonisent notamment la surface des pierres des cours d'eau. La rapidité de leur cycle de développement et leur sensibilité aux pollutions, notamment organiques, azotées et phosphorées en font des organismes intéressants pour la caractérisation de la qualité d'un milieu.

Les diatomées possèdent également plusieurs attributs qui en font un outil idéal comme bioindicateur de la qualité de l'environnement entre autre :

- étant les organismes à la base de la chaîne alimentaire, une modification de l'abondance, de la diversité et de la composition des communautés de diatomées provoque une modification des fonctions et de la structure dans la chaîne trophique ;
- la majorité des espèces ont une répartition très étendue à travers les écosystèmes ;
- les échantillons sont donc facilement manipulés, traités et entreposés ;
- les diatomées ont l'avantage d'être généralement plus facilement identifiables et dénombrables que les autres groupes d'algues. De plus, l'écologie des espèces est généralement mieux documentée que celles des autres groupes d'algues.

L'indice biologique diatomées (IBD) est basé sur l'analyse de la flore diatomique fixée sur le fond des cours d'eau (diatomées benthiques), qui fournissent une information différente de celles qui dérivent en suspension dans l'eau. Il est calculé en fonction de l'abondance des espèces récoltées et de leur sensibilité à la pollution.

Après le choix de la station, la réalisation de cet indice comporte plusieurs phases :

- ✓ le prélèvement consistant à récupérer des diatomées fixées par grattage (une brosse à dent propre est utilisée pour frotter les pierres) puis récupérées dans un pilulier,
- ✓ au laboratoire, les échantillons sont nettoyés grâce à un traitement à l'eau oxygénée pour faire disparaître la matière organique et grâce à l'utilisation d'acide chlorhydrique pour dissoudre les sels minéraux ;
- ✓ la préparation de la lame ;
- ✓ le comptage et la détermination d'au moins 400 diatomées, sous microscope ;
- ✓ l'expression des résultats.

L'IBD peut varier entre 1 à 20 et les notes se répartissent au sein de cinq classes de qualité :

Indice IBD	Classe de qualité biologique	Caractéristiques
IBD > 17	Très bonne	Pollution ou eutrophisation nulle à faible
$13 < \text{IBD} \leq 17$	Bonne	Eutrophisation modérée
$9 < \text{IBD} \leq 13$	Passable	Pollution moyenne ou eutrophisation forte
$5 < \text{IBD} \leq 9$	Mauvais	Pollution forte
IBD < 5	Très mauvaise	Pollution ou eutrophisation très forte

2.5. L'indice Biologique Macrophytique en Rivière (IBMR)

Cette méthode d'évaluation de la qualité écologique des cours d'eau est basée sur l'étude du peuplement végétal aquatique (les macrophytes), qui constitue un élément important des écosystèmes aquatiques. Les macrophytes correspondent à l'ensemble des végétaux aquatiques visibles à l'œil nu, ou vivant habituellement en colonies visibles (**fig.2**). Cela comprend généralement des végétaux supérieurs, des bryophytes (mousses) et des macroalgues.



Figure 2 : Prélèvement de macrophytes

L'Indice Biologique Macrophytes en Rivière (IBMR) permet d'évaluer la qualité de la rivière et plus particulièrement son degré d'eutrophisation lié aux teneurs en azote et phosphore dans l'eau. Il prend également en compte les caractéristiques physiques du milieu comme l'intensité de l'éclairement et des écoulements.

L'analyse des macrophytes comporte une phase de prélèvement sur site et une phase d'analyse en laboratoire. De plus, l'indice (IBMR) s'appuie sur une liste de référence de 208 taxons, dont 51% de phanérogames, 25% de bryophytes et 20% d'algues. Cette liste comprend des espèces polluo-résistantes ou polluo-sensibles.

La richesse taxonomique (nombre d'espèces différentes) de l'échantillon ainsi que son abondance permet de calculer l'IBMR qui s'exprime par une note allant de 0 à 20, selon 5 classes de qualité (ou niveaux trophiques). Cette note est liée à la sensibilité des végétaux présents sur une station et à la diversité des habitats (représentée par la variété taxonomique). Lorsque la valeur de l'indice est supérieure à 14, cela signifie que le degré d'eutrophisation est "Très faible". A l'inverse, quand l'indice est inférieur ou égale à 8, cela indique que le degré d'eutrophisation est "Très élevé" :

Niveau trophique	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort
Cas général	$IBMR \geq 14$	$14 > IBMR \geq 12$	$12 > IBMR \geq 10$	$10 > IBMR \geq 8$	$IBMR < 8$

Chapitre III : Évaluation de la qualité des écosystèmes terrestres (sol)

Le sol est une ressource fondamentale qui supporte la croissance des plantes et assure ainsi la production primaire dont dépend directement la population humaine. Le sol est un milieu vivant et fragile, qui abrite d'intenses échanges et transformations biologiques et physico-chimiques. Il est à ce titre une interface biologique et géochimique déterminante dans le maintien du fonctionnement des écosystèmes.

Le sol, bien que pouvant être restauré et plus ou moins reconstitué, reste une ressource non renouvelable en raison de la longue période nécessaire aux processus de sa formation. Cette propriété le rend particulièrement sensible aux agressions anthropiques. Ainsi, sa dynamique peut être accélérée ou modifiée par les activités humaines qui utilisent de manière non raisonnée les multiples fonctions du sol. Les pratiques agricoles, les opérations de génie civil, la gestion de déchets, la déforestation, les pollutions accidentelles organiques et chimiques, sont autant d'activités qui conduisent à une modification durable de ces propriétés et dégradent sa qualité.

Si les préoccupations sur la qualité des sols sont très anciennes, la prise de conscience internationale de l'importance d'une préservation et d'une gestion durable de cette ressource, suivie des mesures concrètes de sa protection, est-elle très récente, à l'instar des deux autres principales ressources terrestres : l'eau et l'air.

La qualité d'un sol qui est définie simplement comme étant sa capacité à fonctionner, dépend de multiples facteurs intrinsèques au sol, à l'écosystème ou d'origines anthropiques. Les notions de fertilité, de productivité, de durabilité des ressources, et de qualité environnementale sont les principales bases des définitions actuelles de la qualité des sols. L'évaluation de cette qualité peut être réalisée par de simples observations ou des mesures qualitatives très complexes. Elle permet de caractériser le sol par des indicateurs reliés aux composantes physiques, biologiques et chimiques. Ces indicateurs permettent de mesurer une ou plusieurs propriétés nécessaires au bon fonctionnement du sol.

1. Indicateurs physico-chimiques du sol

L'analyse physico-chimique comporte en général une analyse du pH, de la capacité d'échange cationique, de la conductivité et de la teneur en matières organiques. Cette analyse permet de caractériser les potentialités du sol en termes de réserve en eau et en éléments nutritifs.

1.1. pH (potentiel hydrogène) : le terme pH du sol est une composition de sol et de pH. Il est une mesure de l'activité des protons H^+ dans l'eau du sol. En fait, le sol, d'un point de vue chimique, se définit par son acidité ou son alcalinité. Cet état est mesuré par le pH, sur une échelle allant de 1 à 14, qui traduit le degré d'acidité ou d'alcalinité (basicité) de l'eau en contact avec le sol (pH_{eau}).

Le statut acido-basique du sol, représente une expression synthétique des conditions physico-chimiques qui président en partie à la structuration du sol, à l'activité microbienne et à la disponibilité des éléments.

Par ses interactions avec de nombreux processus chimiques et biologiques, le pH du sol exerce, en effet, un effet direct sur la biodisponibilité des nutriments, à travers des phénomènes de solubilisation et d'insolubilisation propres à chaque élément. Le pH d'un sol fertile, où les éléments minéraux sont les mieux assimilés par les plantes, se situe entre 6 et 7. À un pH trop acide (<6) ou trop basique (>8), certains éléments sont moins assimilables, c'est le cas du fer, moins assimilable dans un milieu basique.

Tout comme la biodisponibilité des nutriments, la diversité des micro-organismes du sol, qui est un élément essentiel dans l'équilibre biologique du sol et du fonctionnement du couvert végétal, est ainsi fortement influencée par le pH du sol. Plus le sol est acide, moins la

biomasse microbienne est importante ; alors que le sol alcalin, représente le sol le plus à même de fournir une grande diversité d'habitats pouvant héberger une grande diversité de taxons bactériens.

Le pH joue donc un rôle essentiel dans le fonctionnement des sols. Il est considéré comme l'une des principales variables dans les sols, car il contrôle de nombreux processus, et constitue de ce fait un indicateur utile, en combinaison avec d'autres, pour appréhender la fertilité des sols.

1.2. Capacité d'échange de cations (CEC) : la capacité d'échange cationique (CEC) est une mesure du pouvoir d'un sol à retenir et échanger des cations (éléments nutritifs chargés positivement). Cette mesure de la capacité d'échange et la détermination de la garniture cationique d'un sol constituent des outils de suivi de la qualité physique et chimique des sols. Ils permettent de caractériser ces propriétés chimiques, de prévoir les modifications certaines propriétés physiques et d'apprécier le risque écotoxique de l'importante concentration de certains éléments.

Les sols ayant une CEC élevée peuvent retenir davantage de cations et possèdent une plus grande capacité à les échanger que les sols ayant une faible CEC. Les cations qui sont le plus souvent mentionnés dans un rapport d'analyse de sol sont : le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}) et le calcium (Ca^{2+}). Certains rapports indiquent aussi l'hydrogène (H^+) et le sodium (Na^+). Ces éléments doivent être présents en quantités suffisantes et sous une forme disponible car ils sont indispensables à la croissance des plantes.

1.3. Teneur en matières organiques : la matière organique (MO) représente la fraction du sol qui provient de la décomposition des organismes vivants, végétaux ou animaux. L'activité microbienne est le principal agent de contrôle de cette décomposition.

La teneur en matière organique du sol pourrait être un bon indicateur de ce « capital naturel sol », par sa place centrale dans le fonctionnement du sol et son caractère intégrateur des qualités d'un sol. Un premier rôle de la MO est de participer à la fonction de réservoir du sol en éléments indispensables aux plantes : la MO contribue à la constitution de la capacité d'échange cationique (CEC) des sols. Elle va donc permettre d'augmenter la capacité du sol à contenir les cations nécessaires (K, Mg, Ca, Na) aux plantes sous une forme facilement

assimilable par elles. Par son action sur la porosité du sol, la MO permet également d'augmenter la réserve utile du sol en eau, facilement disponible pour les plantes.

La teneur en MO est donc très importante pour les fonctions biologiques (activité microbienne et minéralisation des composés organiques), physiques (agrégation et rétention en eau) et chimiques du sol (capacité d'échange cationique). Elle varie selon le type de sols, les conditions climatiques et les pratiques culturales.

La détermination du taux de matière organique d'un sol est réalisée indirectement, à partir du dosage de la teneur en carbone organique, suivant la méthode normalisée internationale NF ISO 14235. Le taux de matière organique est calculé en multipliant la teneur en carbone par un coefficient de valeur 1,72 : $[C \% \times 1,72 = MO \%]$ (le coefficient 1,72 correspond à la proportion moyenne de carbone dans la matière organique du sol (cette proportion est de 58 %)).

1.4. Conductivité électrique du sol : est une mesure de la quantité d'ions présents et qui pourraient se dissoudre en présence d'eau. En fait, la phase liquide du sol est une solution contenant divers ions et confère au sol une certaine conductivité électrique. La mesure de cette conductivité permet de caractériser l'hétérogénéité des sols.

La conductivité électrique varie en fonction de plusieurs critères tels que la texture, la structure, la porosité, la profondeur, la matière organique, qui influencent aussi la Capacité d'Echange Cationique (CEC). C'est un paramètre très fiable et utilisable sur tous les types de sols.

2. Indicateurs biologiques du sol

Les organismes du sol sont responsables, directement ou indirectement, de nombreuses fonctions clés du fonctionnement du sol. Celles-ci incluent la décomposition des résidus animaux et végétaux, la transformation et le stockage des nutriments, les échanges gazeux et hydriques, la formation et la stabilisation de la structure du sol, la synthèse des composés humiques et la dégradation des molécules xénobiotiques.

La qualité biologique des sols fait référence à l'abondance, la diversité et l'activité des organismes vivants qui participe au fonctionnement du sol. La gestion des ressources biologiques des sols doit être considérée comme un élément essentiel de la subsistance de ce

système écologique. Elle ne pourra être parfaitement maîtrisée que dans la mesure où l'on disposera à la fois d'indices biologiques pertinents et de référentiels d'interprétations garantissant une bonne sécurité de diagnostic.

La surveillance de la qualité des sols pour laquelle des bioindicateurs simples à mesurer, peu chers et répétables sont donc nécessaires. En fait, il existe une grande diversité d'indicateurs biologiques qui permettent de suivre l'évolution de la biodiversité des sols et d'évaluer les risques pour l'écosystème, ainsi certaines études ont effectué leur classification en deux catégories : les indicateurs d'accumulation et les indicateurs d'effets ou d'impacts :

Les indicateurs d'accumulation : sont des organismes qui accumulent une ou plusieurs substances présentes dans leur environnement et permettent donc de renseigner sur le niveau d'exposition des communautés à des substances comme les pesticides, les métaux lourds. Les collemboles, les vers de terre mais surtout les gastéropodes (escargot) sont des organismes bioaccumulateurs.

Les indicateurs d'effets : sont quant à eux des organismes (ou partie ou communauté) qui ne peuvent pas accumuler de substances provenant de leur environnement mais qui présentent des réponses spécifiques à leur exposition. Ils renseignent donc sur les effets d'une exposition : modifications morphologiques, histologiques, cellulaires, métaboliques, comportementales ou de structure de population.

Actuellement, un grand nombre de bio-indicateurs sont disponibles pour évaluer la qualité des sols :

2.1. Les nématodes

Les nématodes (des petits vers souvent microscopiques) : font partie de la microfaune et l'ensemble des nématodes constituent la nématofaune. Ils représentent l'un des taxons les plus abondants parmi les invertébrés du sol (plusieurs dizaines de millions d'individus par mètre carré).

Ce sont des indicateurs pertinents en raison de leur caractère ubiquiste, de la diversité des groupes trophiques, de leur abondance et de leur sensibilité aux perturbations (anthropiques ou environnementales) du milieu. Ils jouent un rôle majeur dans la chaîne trophique et sont pour la plupart impliqués dans les processus de minéralisation de la matière organique.

On les distingue selon leur mode alimentaire :

- ✓ Les nématodes phytophages, nous renseignent sur la couverture végétale et éventuellement sur le risque de perte de production végétale ;
- ✓ Les nématodes microbivores, c'est à dire les bactérivores et fongivores renseignent sur le compartiment microbien, le dynamisme de la MO et le recyclage des éléments nutritifs ;

La troisième catégorie est constituée :

- ✓ des omnivores et des carnivores. Ce sont des groupes sensibles aux perturbations physico-chimiques du sol, car ils mettent beaucoup plus de temps à se multiplier et à s'installer. Leur présence et leur abondance sont essentiellement liées à la stabilité du milieu.

2.2. La mésofaune

La mésofaune : comprend de petits invertébrés impliqués directement dans les services écosystémiques rendus par le sol. Elle constituée d'organismes dont la taille varie entre 0,1 et 2 mm, elle regroupe les acariens, les collemboles, les enchytréides et les isoptères.

L'analyse de l'abondance des différents groupes de mésofaune permet de mettre en évidence une dégradation de l'état biologique du sol. Ainsi, la mésofaune et en particulier les collemboles (microarthropodes) sont considérés comme des bioindicateurs de l'état de santé des écosystèmes terrestres en raison de :

- ✓ leur abondance, de leur ubiquité et de leur diversité ;
- ✓ leur rôle dans la transformation de la matière organique du sol (ils se nourrissent principalement de matière en décomposition et de microorganismes : ils fragmentent ainsi la MO, régulent les populations de microorganismes et libèrent des éléments fertilisants comme l'azote).

Grâce à ces fonctions et leur place dans les réseaux trophiques, ces organismes sont considérés comme de bons bio-indicateurs de la qualité des sols.

2.3. Les escargots

Les escargots : comptent parmi les nombreux outils biologiques utilisés afin de caractériser les pollutions du sol, d'identifier ou de prévoir les atteintes aux écosystèmes et de suivre leur évolution dans le temps et l'espace.

Ces gastéropodes terrestres se déplacent à la surface du sol où ils consomment des végétaux et de la terre, mais certaines phases de leur cycle biologique (repos, abri, ponte, développement embryonnaire, hibernation) se passent dans le sol dont ils absorbent des contaminants. Ils ont donc la particularité de concentrer dans ses tissus des substances polluantes, comme les éléments traces métalliques, rendant possible le dosage de l'élément toxique.

Ainsi, de nombreux chercheurs ont étudié ces gastéropodes terrestres comme indicateurs de la pollution du sol en raison de :

- ✓ leur participation aux échanges permanents avec le sol (eau, sels minéraux, excréments, puis finalement la coquille et la matière organique quand ils meurent) ;
- ✓ leurs caractéristiques écologiques et physiologiques sont bien connues ;

De plus :

- ✓ ils représentent un lien important entre les plantes, la faune et les micro-organismes du sol ;
- ✓ Ils répondent entièrement aux critères d'un bon indicateur biologique : faciles à collecter et à identifier, ils présentent une large répartition.

2.4. L'Indice Biologique de Qualité des Sols (IBQS)

IBQS : est basé sur l'étude de l'ensemble des peuplements de macro invertébrés du sol comme bioindicateurs de son état physique, chimique et écologique. Ce peuplement est composé d'une grande diversité d'organismes visibles à l'œil nu.

Les macro-invertébrés du sol (vers de terre, coléoptères, diptères,...) sont en contact permanent avec ce milieu où ils vivent, se nourrissent et se reproduisent. Ils occupent une grande diversité d'habitats et possèdent des modes de vie très variés.

De ce fait, ils sont capables d'intégrer les changements de l'environnement dans le temps et dans l'espace et d'y répondre avec un degré d'intensité variable dépendant de leur mode de vie. Ces changements peuvent être ressentis à différentes échelles et seront reflétés par des variations dans une ou plusieurs des unités (taxonomiques, fonctionnelles, écologiques) qui les composent.

Faciles à échantillonner à l'aide d'une méthode standardisée, les macro-invertébrés du sol constituent des excellents bioindicateurs de l'état du milieu et de l'impact des pratiques de gestion.

2.5. La microflore ou biomasse microbienne

La microflore désigne la masse de l'ensemble des microorganismes du sol (bactéries, champignons,..). La biomasse microbienne est l'indicateur le plus relié au concept de qualité d'un sol. Elle fait l'objet d'une attention particulière car elle représente en masse la plus grande part des organismes vivants du sol et elle constitue un acteur majeur des cycles biogéochimiques.

En fait, le sol est le principal réservoir de diversité microbienne de notre planète. Plusieurs milliards de bactéries et de champignons très diversifiés peuvent être retrouvés dans un gramme de sol. Ces microorganismes participent au fonctionnement et à la qualité des écosystèmes terrestres car leur activité conditionne notamment la minéralisation de la matière organique indispensable au recyclage des nutriments nécessaires à la croissance végétale. Ils constituent de ce fait des indicateurs précoces de la dynamique de la matière organique.

Les communautés microbiennes permettent également de diminuer les flux de polluants vers les nappes phréatiques et l'atmosphère, et contribue aussi à la structure du sol, et sont rapidement sensibles aux variations environnementales, qu'elles soient d'origines anthropiques et/ou naturelles. Ce sont donc potentiellement de bons indicateurs de l'état du milieu.

Les nématodes, la mésofaune, les escargots, les macroinvertébrés et la masse microbienne sont donc considérées comme de bons indicateurs du fonctionnement des sols, une meilleure diffusion de ces outils aux acteurs de terrains permettrait d'améliorer le référentiel de chaque indicateur.

Chapitre IV : Évaluation de la qualité de l'air

1. Indicateurs physicochimiques de l'air

L'atmosphère est un élément essentiel de notre écosystème. Il joue un rôle déterminant pour la vie sur Terre en intervenant notamment dans la régulation de la température de la surface, de la filtration des rayonnements ultraviolets ou dans la formation des précipitations. Sa qualité a donc un impact direct sur le fonctionnement des organismes vivants.

Depuis le début du siècle dernier, les émissions anthropiques vers le compartiment atmosphérique se sont intensifiées et diversifiées. De nombreux éléments chimiques sont suspectés d'impacter durablement notre environnement en dérégulant les grands cycles biogéochimiques. De plus, la dispersion atmosphérique permet de transporter les contaminants des sites locaux jusqu'aux régions les plus reculées via le transport longue distance. La pollution atmosphérique, est devenue donc un problème majeur à prendre en compte.

La surveillance de la qualité de l'air, comme celle de l'eau, est généralement assurée par des réseaux de capteurs physico-chimiques donnant des valeurs numériques. Mais ces mesures directes d'éléments inorganiques comme organiques se heurtent rapidement :

- ✓ à la faible représentativité de l'échantillon ;
- ✓ à des difficultés analytiques en raison de la présence fréquente de faibles teneurs ;
- ✓ aux coûts et à la maintenance des appareils de mesure physico-chimiques, comme aux coûts unitaires des analyses, parfois élevés ;
- ✓ au fait qu'il n'est pas possible d'associer facilement ces valeurs à des effets toxiques ou à des nuisances spécifiques qui se manifesteraient sur des êtres vivants.

Une alternative consiste alors à avoir recours à des techniques intégratives de mesure capables d'apprécier la contamination du milieu, c'est-à-dire à des méthodes basées directement sur l'observation et l'étude des réactions d'organismes vivants exposés aux épisodes de pollution.

En fait, la biosurveillance (basée sur des modèles fongiques ou végétaux) demeurera toujours la seule approche capable d'évaluer des effets biologiques d'une altération de l'environnement. Ces méthodes ne permettent pas de connaître la concentration de l'air en

polluants, mais elles donnent des indications assez précises sur les impacts potentiels que ces polluants atmosphériques peuvent avoir sur les êtres vivants.

2. Indicateurs biologiques de l'air

L'utilisation des végétaux pour évaluer la qualité de l'air a commencé dans les années 60 avec le suivi des pollutions de proximité industrielle souvent aiguës (dioxyde de soufre et acidité forte). Plus tard, l'émergence des problématiques de pollution urbaine et photo-oxydante (dioxyde d'azote, ozone,...) est à l'origine de nouveaux développements de la bio-surveillance.

De nombreux végétaux peuvent être utilisés pour la biosurveillance de la qualité de l'air, soit parce qu'ils présentent des réactions biologiques caractéristiques en réponse à certains polluants, soit parce qu'ils accumulent dans leurs tissus certains des composés toxiques qui se trouvent dans l'air qui les entoure. L'analyse de cette bioaccumulation permet :

- ✓ de connaître les niveaux relatifs et la localisation des retombées atmosphériques ;
- ✓ de cartographier les différentes zones touchées ;
- ✓ surtout de suivre les dépassements ou non, par ces polluants, des seuils sanitaires réglementaires applicables aux hommes comme aux animaux (lorsqu'ils existent).

Les végétaux les plus couramment utilisés sont les lichens, les bryophytes, les pétunias et le trèfle.

2.1. Les lichens

Parmi les organismes utilisés pour la biosurveillance de la qualité de l'air, les lichens épiphytes (**fig.3**) sont les représentants du règne fongique les plus couramment employés. Ils sont formés par l'association symbiotique entre un champignon et une algue verte (dans 90% des cas) ou une cyanobactérie (dans 10% des cas). Leur appareil végétatif est un thalle (dépourvu de système racinaire, de tiges ou de feuilles).



Figure 3 : La diversité lichénique, témoin de la qualité de l'air

Les lichens se développent lentement (leur croissance varie entre moins d'un millimètre et un centimètre par an selon les espèces et le milieu de vie) et sont exclusivement dépendants de l'atmosphère pour leur nutrition. De fait, le prélèvement de nutriments se réalise majoritairement à partir de l'atmosphère au travers de la surface du thalle. Contrairement aux végétaux supérieurs, ils ne possèdent ni cuticule cireuse, ni stomate qui pourraient moduler leur exposition aux polluants atmosphériques.

Ils sont par conséquent très sensibles aux substances présentes dans l'air ambiant. Les polluants sont ainsi facilement absorbés par les lichens et perturbent profondément leur métabolisme, entraînant parfois des effets morphologiques visibles. Les effets de la pollution atmosphérique peuvent aller jusqu'à modifier la composition des communautés lichéniques en fonction de la sensibilité différentielle des espèces. Ils constituent donc un matériel d'observation de choix dans l'évaluation spatio-temporelle des effets de la qualité de l'air sur le vivant.



Figure 4 : Bioaccumulation de polluants dans les lichens

Du fait de leur longévité, de leur activité biologique annuelle et dotés d'une paroi fongique offrant une multitude de sites de fixation possible des polluants, les lichens sont aussi d'excellents bioaccumulateurs (**fig.4**). Cette particularité permet la mesure de

concentrations biologiques de polluants bioaccumulables, tels que les éléments traces métalliques, les radioéléments et les polluants organiques persistants.

2.2. Bryophytes

Une bryophyte est le nom traditionnel utilisé pour désigner toutes les embryophytes, des plantes terrestres comme les mousses et sphaignes, qui colonisent les substrats les plus variés : sols, arbres, rochers, murs. Les bryophytes présentent des caractéristiques qui en font d'excellents indicateurs de la qualité du milieu naturel. Dépourvues de système vasculaire développé et de racines, elles sont directement exposées aux variations du milieu et donc très sensibles à toutes modifications de leur habitat.

Les bryophytes, appelées plus couramment mousses (**fig.5**), présentent notamment l'avantage de ne pas posséder de système racinaire et de ne pas être recouvertes d'une cuticule, et par conséquent absorbent la majorité des nutriments et l'eau par voie aérienne. Les mousses adsorbent donc directement les polluants atmosphériques à leur surface ou absorbent les composés polaires ou lipophiles dans leurs membranes cellulaires. C'est pour cette raison que leur utilisation s'est largement développée depuis quelques décennies, notamment pour l'étude des dépôts atmosphériques de métaux lourds.



Figure 5 : Les mousses, témoins de la qualité de l'air

Les mousses, ayant en effet une forte capacité d'échange des cations, vont agir comme des hyper-accumulateurs vis-à-vis des métaux et de leurs complexes. Ces composés vont se fixer aux parois cellulaires dont nombre de constituants possèdent des groupements chargés négativement. De plus le phénomène de translocation des métaux à l'intérieur de la plante est minimal du fait de l'absence de système vasculaire.

En ce qui concerne les polluants organiques persistants, c'est plutôt la quasi-absence de cuticule et donc la capacité des mousses à absorber les grosses molécules organiques qui favorise leur accumulation. Les mousses jouent à ce titre un rôle important dans l'évaluation de la qualité de l'air.

2.3. Les Pétunias

Les pétunias sont des fleurs de la famille des Solanacées (**fig.6**). La croissance générale des plants de pétunias est un indicateur de la qualité atmosphérique de leur environnement. Ainsi, c'est Posthumus (1983) qui a suggéré l'utilisation de Pétunia comme bioindicateur après avoir observé une réponse des Pétunias aux polluants par une diminution de la taille des fleurs ainsi qu'une augmentation de l'avortement des boutons floraux.



Figure 6 : Plants de Pétunia utilisés pour la biosurveillance des composés organiques volatils

Elles sont, en effet, sensibles aux composés organiques volatils (COV) et plus précisément aux hydrocarbures. Une pollution par ces derniers entraîne chez les pétunias une réduction du développement ainsi que l'apparition de modifications morphologiques visibles à l'œil nu.

2.4. Le trèfle

Appartenant à la famille des fabacées, le trèfle (*Trifolium*) (**fig.7**) est une plante herbacée proposée également par les chercheurs comme indicateur de la qualité de l'air. Le trèfle permet de qualifier la teneur en ozone, polluant atmosphérique dont la concentration augmente régulièrement dans la base atmosphérique (troposphère).



Figure 7 : Trèfle (Trifolium)

L'ozone est un oxydant puissant, qui réagit directement avec les composés chimiques présents à la surface des cellules végétales (parois et membranes). Les produits issus de ces réactions sont encore mal connus, mais certains peuvent également être toxiques pour les plantes. Les dégâts foliaires sont les plus spectaculaires. Ils se manifestent par l'apparition de taches ou de nécroses (**fig.8**) à la surface des feuilles.



Figure 8 : nécroses foliaires

Le trèfle est sensible à l'ozone (sa croissance est fortement ralentie en présence du polluant) : des nécroses apparaissent à la surface de ses feuilles après quelques heures d'exposition à l'ozone, même à des concentrations relativement modestes (de l'ordre de 25 ppb, soit $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Ces variétés sont couramment utilisées lors d'opérations de biosurveillance de la qualité de l'air.