

## Monitoring des polluants

L'étude de la pollution de l'environnement nécessite une connaissance aussi précise que possible de la distribution des polluants et de leur concentration dans les biotopes ainsi que dans les communautés d'êtres vivants, enfin de leurs effets sur la santé des populations et des écosystèmes contaminés. Cela implique une surveillance permanente de l'environnement tant en ce qui concerne les habitats terrestres qu'aquatiques, autrefois dénommée « suivi écologique » et désignée dans le langage courant, de façon très générale, depuis maintenant plusieurs années, par le terme anglais de monitoring.

Il est parfois d'usage de faire une distinction entre d'une part le monitoring chimique dont l'objet est de déterminer le niveau de contamination par tel ou tel polluant des biotopes et de la biomasse et de l'autre le monitoring « biologique » dont l'objet est d'évaluer l'impact à un instant donné ou en fonction du temps de la pollution de l'environnement sur les populations, les communautés voire les biocénoses exposées.

De même, il est fréquent que l'on distingue les « enquêtes » ou études effectuées dans tel ou tel écosystème du monitoring sensu stricto. Les premières ont pour objet d'évaluer l'état d'un écosystème à un instant donné « < point zéro » lorsqu'il s'agit d'une situation considérée comme antérieure à l'apparition d'une cause de pollution, par exemple évaluation de l'état radioécologique d'un cours d'eau avant la mise en route d'une centrale nucléaire), ou encore de réitérer une série d'analyses et d'observations afin d'évaluer les modifications subies en fonction du temps par une communauté exposée à une pollution.

Le monitoring pris au sens strict présente une dimension de contrôle et donc réglementaire. Il s'agit de s'assurer par des méthodes d'analyses chimiques de résidus et biologiques que l'état d'un biotope, d'un peuplement ou d'une communauté vivante est conforme à des standards pré-établis. Cela ne justifie pas pour autant l'attitude sectaire et dogmatique propre à certains organismes de tutelle nationaux de la recherche publique qui considèrent le monitoring avec condescendance et l'excluent des activités de recherche proprement dites.

**Holdgate (1979)** avait déjà précisé les divers types d'informations que l'on peut obtenir à partir d'un monitoring bien conçu et bien réalisé. Parmi un grand nombre d'applications possibles, trois catégories de données sont généralement recherchées :

- Taux de libération des polluants dans les milieux récepteurs et/ou présumés contaminés;
- Degré et variation de la contamination environnementale ;
- Effets bioécologiques.

Le monitoring concerne donc en définitive deux types de démarches différentes :

1. La détermination et la mesure des niveaux de contamination des biotopes ainsi que des populations végétales et (ou) animales exposées;
2. L'évaluation des effets écotoxicologiques résultant in situ de la pollution ainsi détectée sur les peuplements voire les biocénoses tout entières qui lui sont exposées.

Ces deux groupes d'investigations -l'un chimique, l'autre écologique - permettent d'établir les voies de contamination les plus critiques de l'écosystème concerné, par lesquelles les populations des espèces les plus sensibles sont exposées au polluant et à quelle concentration. À partir de telles données, il est alors

possible d'établir une relation concentration-réponse écotoxicologique et donc le seuil de contamination de tel ou tel écosystème au-dessous duquel il n'y aura pas d'effet nocif, ou du moins où ces effets n'excéderont pas un maximum tolérable qu'il ne s'agit pas de recherche mais de contrôle.

### **Monitoring des polluants dans les écosystèmes**

Historiquement, le premier type de mesure ayant donné lieu à un monitoring des polluants a eu pour objet l'analyse de leur concentration dans les biotopes, en particulier dans l'air, les eaux et les sols, c'est-à-dire dans la composante abiotique des écosystèmes.

Pendant trop longtemps, l'écotoxicologie en tant que telle a été assimilée à une démarche de stricte chimie analytique alors que cette dernière, tout en étant indispensable à la discipline, en constitue un outil, une technique incontournable, mais en aucun cas la finalité même.

### **Critiques du monitoring**

Se limiter à la connaissance des concentrations en polluants dans un biotope donné et/ou des populations d'espèces critiques sans évaluer leurs effets écologiques conduit à ignorer bien des problèmes majeurs sous-jacents. En effet, connaître la concentration d'un polluant dans un biotope donné ou dans tel ou tel organisme échantillonné n'apporte aucune information sur l'impact biologique réel de ce dernier. En réalité, un corpus considérable de données expérimentales a montré qu'une même concentration d'un polluant dans l'eau, dans les sols, ou encore dans la biomasse peut avoir des conséquences très différentes selon la valeur moyenne des facteurs écologiques dans l'écosystème considéré.

Par ailleurs, il n'est pas toujours possible de faire l'analyse de tous les polluants présents dans l'eau, les sols, les sédiments ou encore l'atmosphère. Les techniques analytiques peuvent ne pas être assez sensibles, tout au moins quand il s'agit de réaliser une surveillance permanente de l'environnement. De plus, la signification bioécologique des concentrations de contaminants détectées n'est pas toujours connue, a fortiori, l'existence de phénomènes de potentiation ou de synergisme entre polluants.

Une dernière critique majeure que l'on peut faire à un monitoring fondé sur la seule analyse des concentrations en polluant se rapporte au cas des composés chimiques fugaces et/ou labiles. Dans un cas extrême, de tels contaminants peuvent provoquer un véritable désastre écotoxicologique tout en passant inaperçus si la pollution advient entre deux séries de mesures consécutives.

De façon plus générale, la mesure périodique à intervalles réguliers mais espacés dans le temps peut ignorer une concentration significative d'un contaminant ayant atteint occasionnellement une forte valeur.

On constate que dans la majorité des cas, le monitoring s'est consacré jusqu'à une date récente à la détection des polluants dans l'environnement, en particulier des concentrations présentes dans les biotopes: air, sols, eau, sédiments, ainsi que de leur répartition spatio-temporelle. À l'opposé, un nombre beaucoup plus; réduit d'investigations a eu pour objet la mise en évidence et l'évaluation des effets sur les populations, les communautés et les écosystèmes exposés.

### **Conclusion**

On peut donc conclure que le monitoring biologique, destiné à évaluer la nature et l'importance des effets écotoxicologiques des polluants dans l'environnement constitue l'autre facette incontournable de la

surveillance permanente de la pollution environnementale, tout aussi essentielle que le monitoring chimique.

Le monitoring biologique peut être subdivisé en trois groupes d'activité principaux :

- détecter les effets des polluants sur des espèces bio-indicatrices au travers des critères d'abondance relative et/ou de présence-absence, ainsi que les changements dans la structure de peuplements critiques ou de communautés;
- évaluer les effets des polluants sur les organismes et mettre en relation avec les concentrations observées dans ces derniers et d'autres indicateurs abiotiques et biotiques;
- détecter l'éventuelle existence de souches naturelles résistantes parmi les espèces pollutolérantes qui peuvent avoir développé une résistance au polluant.

### **Règles de Biomonitoring**

Les « règles » du monitoring biologique sont fondées sur la référence à divers critères de base. Ainsi Hopkin (1993) a défini cinq « règles » du biomonitoring.

**1) Pertinence** du programme de monitoring relativement à l'environnement concerné (par exemple les espèces de référence doivent être prises parmi celles qui présentent une importance écologique dans l'écosystème concerné).

**2) Significativité** : pour que le monitoring conduise à des résultats significatifs, il faut que les espèces soient largement représentées dans l'aire géographique faisant l'objet d'une surveillance permanente de l'environnement afin de permettre des comparaisons entre des sites éloignés.

**3) Robustesse**: les espèces de référence choisies pour le biomonitoring doivent être des bio-indicateurs positifs de pollution afin de pouvoir supporter une exposition aux contaminants faisant l'objet d'un suivi sans pour autant présenter une létalité aux concentrations ambiantes

**4) Réponse**: la corrélation entre exposition et la réponse des organismes servant de référence pour le monitoring doit être mesurable et proportionnelle à l'intensité de la contamination du biotope par le polluant considéré.

**5) Reproductibilité**: Les organismes de référence devraient produire la même réponse partout où ils sont utilisés avec pertinence. La réponse devrait être proportionnée avec le niveau de contamination.

### **Contamination des organismes - Les bio-indicateurs de contamination**

La mesure de la contamination des organismes représente la première démarche du monitoring de l'environnement et relève du monitoring chimique.

Dans de nombreux cas, des systèmes de monitoring ont été développés pour s'assurer que des polluants ne sont pas rejetés dans l'environnement au-delà de certaines concentrations critiques ou encore que certaines espèces d'intérêt économique ne sont pas contaminées au-delà des CMA pour la santé humaine.

Outre l'évaluation permanente du degré de contamination des biotopes et des habitats, un autre objectif majeur du monitoring est d'évaluer les quantités et la distribution de certains polluants dans les individus d'espèces choisies pour leurs particularités bioécologiques.

### **Choix des bioindicateurs**

Dans un cas comme dans l'autre, le choix des indicateurs biologiques de pollution, encore dénommés bio-indicateurs est un problème.

En effet, il est matériellement impossible d'échantillonner la majorité des taxa constituant une biocénose ou même les seules espèces dominantes dans les divers groupes systématiques qu'elle comporte, afin de réaliser de façon suivie les analyses des contaminants recherchés.

L'avantage d'analyser des êtres vivants plutôt que les composants abiotiques des écosystèmes contaminés résulte de plusieurs particularités :

- ❖ La plupart des polluants, en particulier les substances persistantes, qu'elles soient organiques ou minérales, se présentent à des concentrations bien supérieures dans les êtres vivants à celles auxquelles ils se rencontrent dans les biotopes par suite des phénomènes de bioconcentration, et parfois de bioamplification.
- ❖ L'analyse des organismes mesure la disponibilité réelle des polluants pour la biomasse, ce qui est beaucoup plus significatif en définitive que la connaissance, de la concentration d'un polluant dans le milieu inerte.
- ❖ Les êtres vivants intègrent en quelque sorte les taux de contaminants présents pendant une période considérée. Cela leur confère un intérêt supérieur aux constituants abiotiques dans lesquels la présence du contaminant peut être fugace.

Ceci complique cependant l'interprétation car le degré d'intégration (niveau d'accumulation) dans le temps va varier en fonction du binôme « espèce-polluant ».

### **Caractéristiques requises d'un bio-indicateur**

Une des premières problématiques sur laquelle les toxicologues se sont interrogés se rapporte aux caractéristiques que devrait posséder un bio-indicateur idéal. Bien que ces dernières aient été initialement établies dans le cas des polluants des eaux, elles peuvent être généralisées à tous les types de contaminants.

Ces caractéristiques devraient être les suivantes:

1. Tous les individus d'une espèce bio-indicatrice devraient présenter **une corrélation identique et simple** entre leur teneur en la substance polluante et la concentration moyenne de cette dernière dans le biotope ou dans l'alimentation quelles que soient la localisation et les conditions environnementales ;
2. L'espèce devrait être **capable d'accumuler** le polluant sans être tuée ni même sans que sa reproduction ne soit perturbée par les niveaux maximum des polluants observés dans l'environnement;

3. L'espèce devrait être **sédentaire** afin d'être sûr que les concentrations trouvées soient bien en rapport avec sa contamination dans le site géographique où elle a été prélevée;
4. L'espèce devrait être **abondante** dans l'ensemble de l'aire étudiée et si possible avoir une distribution biogéographique étendue afin de favoriser les comparaisons entre zones distinctes;
5. Les espèces à **forte longévité** sont préférables parce qu'elles permettent un échantillonnage sur plusieurs classes d'âges si nécessaire. En outre, les espèces à forte longévité subissent une exposition à un contaminant pendant de longues périodes ce qui par suite permet de disposer de preuves expérimentales sur les effets à long terme;
6. L'espèce devrait être de **taille suffisante** pour fournir des tissus en quantité nécessaire pour analyse. Cette caractéristique s'avère encore plus importante pour la dissection quand les études sont faites sur l'accumulation dans des organes spécifiques;
7. L'espèce devrait être **facile à échantillonner**, et l'animal assez résistant pour être amené en laboratoire afin de réaliser par exemple des études de décontamination.

En réalité, la liste de ces caractéristiques est si contraignante qu'en pratique n'existe presque aucune espèce qui puisse répondre à la totalité de ces critères.

Il est évident que l'application de tels critères pour le choix d'espèces bio-indicatrices se heurte (بواجهه) à des problèmes immédiats sur le terrain, même si certaines espèces sont susceptibles de présenter plusieurs des caractéristiques précisées.

Si l'on se limite seulement au premier critère (**une corrélation identique et simple entre la teneur** en la substance polluante et la concentration moyenne de cette dernière dans le biotope ou dans l'alimentation), il est assez évident que l'on ne rencontre que rarement une relation simple entre concentration dans l'environnement et dans les tissus, même si cela s'observe par exemple chez certaines **bryophytes** aquatiques pour les **PCB** et les **métaux lourds**.

#### **Facteurs qui influencent la fiabilité des bio-indicateurs :**

La fiabilité d'un bio-indicateur, c'est-à-dire le degré de certitude avec lequel il donne une bonne indication de la concentration d'un polluant dans l'environnement, est contrôlé par de nombreux facteurs.

Les facteurs contrôlant la fiabilité peuvent être regroupés en deux catégories :

- La première correspond aux facteurs intrinsèques, c'est-à-dire ceux propres aux caractéristiques de l'espèce bioindicatrice et des individus qui la composent,
- La seconde aux facteurs extrinsèques, donc environnementaux.

I. **Les principaux facteurs intrinsèques** conditionnant la fiabilité d'un bio-indicateur sont:

##### **1. Taux d'accumulation et d'excrétion**

Ces taux constituent un paramètre important qui conditionne la fiabilité d'un bio-indicateur. Selon que le taux d'excrétion et/ou d'élimination d'un composé est comparable ou nettement inférieur au taux d'accumulation, le comportement de l'espèce bio-indicatrice pour un polluant considéré sera très différent.

Si une substance est accumulée rapidement mais dégradée lentement, les niveaux de concentration trouvés dans une espèce bioindicatrice seront plus le reflet des taux maximaux atteints par le polluant dans le biotope que de sa concentration moyenne, et ils seront ipso facto bien supérieurs à ceux observés dans l'environnement. À l'opposé, si une substance polluante présente des taux d'absorption et d'élimination voisins, les concentrations présentes dans l'organisme des individus seront similaires à celles trouvées dans le biotope et suivront de très près les fluctuations observées.

À titre d'exemple, des poissons mis au contact d'une eau contaminée par du DDT ou du lindane conserveront de fortes concentrations en ce dernier longtemps après avoir été replacés dans une eau non polluée. À l'opposé, mis en présence de fenitrothion, la charge corporelle de ces mêmes poissons suivra de très près les concentrations dans l'eau de cet insecticide.

## 2. État écophysiologique des individus de l'espèce indicatrice

Il intervient de façon déterminante dans les taux d'accumulation et les concentrations d'équilibre des polluants. Un très bon exemple de ce rôle est donné par la relation existante entre le taux en lipides et les niveaux moyens de la concentration en résidus de composés organochlorés dans l'organisme d'animaux terrestres ou aquatiques. Les conditions écophysiologiques varient en général sur un rythme saisonnier.

- Sodergren et al. (1972) ont par exemple montré que chez *Gammarus pulex* (espèce de crustacé, amphipode) existent des variations saisonnières de la teneur en PCB liées à la fois aux changements de poids et de teneur en lipides.
- Ainsi, la teneur en sélénium d'huîtres et de moules, présente des variations au cours du cycle annuel avec un maximum atteint en fin de printemps.
- Ainsi, chez les saumons et autres poissons de la Columbia River contaminée par les effluents de l'usine plutonigène de Hanford, le taux du  $^{32}\text{P}$  relevés dans les muscles variait de 1 à 5 000 selon que l'analyse était faite en hiver ou en été (Foster et al., 1971).
- Il existe d'importants écarts selon la saison dans la teneur en Lindane, Dieldrine et HAP dans les lipides hépatiques et musculaires des anguilles de l'étang du Vaccarès dans la réserve naturelle nationale de Camargue (tableau 10.1).

Tableau 10.1 ■ Concentration en lindane, dieldrine et HAP totaux ( $\Sigma$  HAP) exprimées en  $\mu\text{g.g}^{-1}$  (en p. s.) dans les tissus hépatiques et musculaires d'anguilles de la réserve naturelle nationale de Camargue (d'après Roche *et al.*, *op. cit.*, 2001).

Organe	Contaminants	Période de l'année		
		Janvier-mars	Mai-juin	Octobre-novembre
Foie	Lindane	1,01 $\pm$ 0,49	0,63 $\pm$ 0,33	2,47 $\pm$ 1,85
	Dieldrine	0,88 $\pm$ 0,33	0,16 $\pm$ 0,11	0,038 $\pm$ 0,013
	$\Sigma$ HAP	12,0 $\pm$ 3,79	36,0 $\pm$ 10,8	1,47 $\pm$ 0,30
Muscles	Lindane	0,24 $\pm$ 0,08	0,34 $\pm$ 0,08	0,22 $\pm$ 0,05
	Dieldrine	0,14 $\pm$ 0,05	0,006 $\pm$ 0,002	0,018 $\pm$ 0,012
	$\Sigma$ HAP	2,37 $\pm$ 1,25	67,1 $\pm$ 40,3	90,5

Ces variations saisonnières sont bien évidemment liées aux fluctuations de conditions écophysiologiques dues aux variations dans l'activité de prise de l'aliment, de reproduction et de façon plus générale de métabolisme, elle-même liée au cycle des saisons. Elles sont bien évidemment très marquées chez les plantes et les invertébrés mais existent aussi chez les animaux homéothermes.

### **3. Âge et taille des organismes bio-indicateurs**

Dans une population d'une espèce bio-indicatrice, la concentration en polluants varie avec la taille donc l'âge des individus.

Très tôt ont été signalées des différences dans les niveaux de bioconcentration d'insecticides en fonction de l'âge des individus. Citons en particulier les variations observées chez le poisson-chat (*Ictalurus catus*) et le bass (*Micropterus salmoides*) en fonction de l'âge pour la teneur en DDT.

De tels écarts de concentration ont également été décrits chez des organismes terrestres.

La teneur en fluor des aiguilles de conifères ou des feuilles d'arbres caducifoliés augmente au cours de la saison et avec le nombre d'années chez les premières. Ainsi, chez le sapin, la teneur en fluor des aiguilles de trois ans et plus en zone polluée est deux à 3 fois supérieure à celle des aiguilles de l'année.

Avec le DDT et autres insecticides organochlorés, des variations de un à dix ont pu être observées en fonction de l'âge chez des organismes aquatiques.

### **4. Interactions physiotoxicologiques des polluants**

La validité de l'usage d'organismes bio-indicateurs peut être en certaines circonstances biaisée lorsque plusieurs contaminants coexistent dans un biotope donné.

En règle générale, la bioaccumulation n'est pas modifiée, c'est-à-dire que compte tenu, par exemple d'une concentration donnée dans le milieu de deux polluants différents, la concentration de chacun, dans l'organisme de référence sera identique que l'exposition soit effectuée isolément ou aux deux contaminants pris ensemble. Il existe cependant quelques exceptions, avec soit antagonisme, soit au contraire potentiation. Ainsi, la bioaccumulation du cuivre et du cadmium dans les poissons est plus forte lorsqu'ils sont pris ensemble que lorsque des individus sont exposés à une même concentration de ces métaux isolés.

À l'opposé, des recherches effectuées sur trois insecticides organochlorés : la dieldrine, le DDT et le méthoxychlore chez la truite arc-en-ciel (*Salmo = Oncorhynchus gairdneri*) ont montré que le DDT et le méthoxychlore réduisaient la bioconcentration de la dieldrine et réciproquement le DDT et la dieldrine réduisaient la bioaccumulation du méthoxychlore.

#### ***Mécanismes influençant l'absorption ou le relargage des micropolluants :***

Les mécanismes par lesquels divers toxiques peuvent influencer l'absorption ou le relargage de micropolluants peuvent être regroupés de la façon suivante:

- interaction des polluants dans les biotopes conduisant à la formation de complexes qui atténuent leur absorption;

- modifications physiologiques induites par les xénobiotiques - tels que l'accroissement de l'anabolisme - qui peuvent augmenter la bioaccumulation ;
- variations dans la perméabilité des membranes absorbantes susceptibles d'affecter le taux de pénétration des polluants;
- inhibition d'enzymes de détoxification - ou stimulation d'enzymes de biodégradation (cas des mixed function oxidase : MFO par exemple) qui peuvent modifier dans un sens ou dans l'autre les taux d'absorption et d'élimination des xénobiotiques.

## **5. Niveau trophique des organismes**

Ce dernier peut constituer un paramètre important dans l'aptitude à bioconcentrer des polluants selon l'espèce prise comme bio-indicateur.

En règle générale et pour les organismes appartenant à des réseaux trophiques terrestres, les polluants persistants présentent une bioamplification dans les chaînes trophiques, de sorte que tant les métaux toxiques que les composés organiques peu ou pas biodégradables atteignent leur maximum de concentration chez les oiseaux rapaces et les mammifères carnivores situés au sommet de la pyramide écologique.

Pour les communautés aquatiques, le problème est plus complexe du fait de l'absorption simultanée des polluants par contact percutané et transbranchial directement à partir de l'eau et par voie alimentaire. Ainsi, même si dans certains cas (composés organochlorés, méthylmercure) s'est observée une bioamplification dans les réseaux trophiques aquatiques, il a été détecté pour la majorité des polluants des concentrations semblables à tous les niveaux de la pyramide écologique et donc une absence de bioamplification. Parfois même, les coefficients de concentration décroissent, le maximum s'observant dans le phytoplancton et/ou les algues macrophytiques. Ainsi, dans le cas du plutonium, qui ne traverse par la barrière intestinale, les facteurs de concentrations les plus élevés ont été relevés chez les lichens marins, les algues et les Spongiaires qui sont des organismes microphages.

De même, pour les polluants non radioactifs, il se trouve souvent un facteur de concentration maximale chez les algues unicellulaires du phytoplancton dû en grande partie à ce qu'une adsorption sur la surface cellulaire vient s'ajouter aux quantités de polluant réellement incorporées par l'organisme. Ainsi, chez *Chlorella vulgaris* (*Chlorella vulgaris* est une espèce d'algue verte unicellulaire microscopique de la famille des *Chlorellaceae*), Thybaud (1987) montre que cette algue est capable de bioconcentrer la deltaméthrine avec un FBC de 88 000. Cependant une partie significative de cette bioaccumulation se fait sur les parois cellulaires.

## **Influence des facteurs extrinsèques**

Les facteurs écologiques abiotiques conditionnent de façon déterminante la bioconcentration des polluants, en particulier dans les espèces bio-indicatrices.

La température et les précipitations chez les végétaux, la température chez les animaux poïkilothermes à sang froid), le pH des eaux, leur salinité parmi d'autres facteurs abiotiques en milieu aquatique contrôlent les taux d'accumulation des polluants.



De très nombreuses recherches effectuées avec les pesticides ont mis en évidence le rôle important de la température dans l'ampleur du facteur de concentration.

D'autres travaux ont démontré le rôle du pH dans les phénomènes de bioconcentration.

Ainsi, il a été observé chez le lombricide, *Aporrectodea tubulata* (Annélide Oligochète) que la concentration en plomb varie du simple au double dans l'organisme de ce vers de terre dans une gamme de pH comprise entre 4,9 et 7,1. Des variations du même ordre de grandeur sont observées avec d'autres métaux toxiques.

Il convient toutefois de remarquer que les effets du pH sur l'accumulation des éléments traces n'est pas aussi significative lorsqu'il s'agit de métaux biogènes car une régulation de l'absorption par les organismes intervient. Ainsi, avec des éléments comme le cuivre ou le zinc, le pH n'agit que faiblement sur les Oligochètes. Des expériences effectuées à des pH compris entre 4 et 6 chez *Eisenia foetida* n'ont mis en évidence qu'une faible variation de l'absorption du zinc en fonction du pH.