

## LA FONCTION SENTINELLE EN MILIEU AQUATIQUE \*

Christian Michel <sup>1</sup>

### RESUME

La surveillance des milieux aquatiques s'exerce dans des environnements diversifiés et s'est très tôt appuyée sur le recours à des espèces biologiques, notamment animales, pour révéler les altérations de la qualité des eaux. Trois types d'outils ont été élaborés : les bioindicateurs, les animaux sentinelles et les biocapteurs. Les bioindicateurs, de recrutement très large, permettent d'apprécier la qualité globale d'un écosystème. Les animaux sentinelles, employés pour le suivi plus spécifique de substances polluantes ou de processus pathologiques, peuvent trouver des applications en milieux confinés comme dans les eaux sauvages. Les biocapteurs représentent un cas d'adaptation de la fonction sentinelle à la surveillance des eaux de consommation humaine, les animaux étant intégrés à un système complexe de mesure en continu et d'alerte. Des exemples d'emploi d'animaux sentinelles sont présentés pour illustrer les avantages et les limites de la démarche.

**Mots-clés** : Eau, milieu aquatique, toxicologie, pollution, animaux sentinelles, bioindicateurs, biocapteurs.

### SUMMARY

Surveillance of aquatic environment may apply to a variety of habitats and is frequently based on the use of animal species to detect water quality degradation. Three kinds of biological systems have been proposed. Indicators, sentinel animals and biological sensors. Indicator species encompass a large range of organisms and are selected to obtain a global evaluation of the quality of an ecosystem. Sentinel animals are selected for monitoring of specific pollutions or aquatic animal diseases ; they may apply to wild water environments as well as to restricted space environments.. Sensors include living species in biomonitoring systems specially designed for water quality surveillance. A fully automated station combines an early warning system and real time assessment of animal behaviour. Examples of sentinel animal systems will be presented in order to illustrate the advantages and limits of their use in aquatic environment surveillance.

**Keywords** : Water, Aquatic environment, Toxicology, Pollution, Sentinel animals, Indicators, Biological sensors.



\* Texte de la conférence présentée au cours des Journées scientifiques AEEMA-AESA, 4-5 juin 2009

<sup>1</sup> Unité de virologie et d'immunologie moléculaires, INRA, Centre de recherches de Jouy-en-Josas, France - christian.michel@jouy.inra.fr

Si l'on procède sur Google Scholar à une interrogation associant les trois termes « aquatic, sentinel, animal », on obtient plus de 7 000 références dont le contenu apparaît cependant très large et peu sourcilieux quant aux concepts et aux définitions. On trouve ainsi pêle-mêle des indicateurs, des modèles animaux, voire cellulaires, ou des systèmes transgéniques. L'importance écologique, mais aussi socio-culturelle des ressources aquatiques, la variété des habitats et la profusion des espèces aisément accessibles ont contribué à multiplier les approches et à brouiller les champs de documentation. Il est donc opportun, avant de rappeler quelques conventions, de préciser le contexte dans lequel elles devront s'appliquer.

Dans le domaine aquatique, ce sont surtout les études écotoxicologiques qui, historiquement et de manière prépondérante, ont fait appel à la notion d'espèces sentinelles. La qualité de l'eau destinée aux usages anthropiques, qu'il s'agisse d'eau de boisson, de sites de baignade ou d'autres utilisations à des fins de loisir, a très vite été perçue comme un des facteurs-clés des progrès hygiéniques. C'est en conséquence sur des aspects de santé publique que se sont focalisées les préoccupations des autorités chargées de la surveillance de l'eau [Rivière, 1993]. En milieu littoral comme en eau douce, l'impact des pollutions chimiques et organiques, qui s'est imposé assez brutalement dans les années 1960, a conduit à la recherche de moyens de

détection suffisamment précoces et sensibles pour pallier tout risque de mise en danger des utilisateurs. Toujours en relation avec les préoccupations de santé humaine, mais plus étroitement dépendants des avancées des connaissances biologiques et récemment amplifiés par la mise en avant dans l'opinion des maladies émergentes et des risques zoonotiques, les soucis de biosécurité ont rapidement pris, eux-aussi, une place d'importance. Ce n'est que tardivement et de manière plus ponctuelle que se sont multipliées, souvent dans un esprit expérimental, des démarches scientifiques plus particulièrement attentives à la santé des écosystèmes aquatiques et des organismes qui les peuplent.

Une des conséquences importantes de cette évolution est que, encore plus peut-être qu'en milieu terrestre, les limites entre fonction sentinelle *sensu stricto* et épidémiologie-seront difficiles à cerner et tendront à s'estomper. C'est en particulier le cas lorsqu'on s'intéresse à des populations sauvages d'animaux, en mer surtout, dont la mobilité et les regroupements saisonniers, inscrits dans des aires de grande étendue géographique, se prêtent relativement mal à l'observation continue. Nous verrons que très souvent les deux démarches se combinent ou se succèdent en fonction des circonstances, des possibilités d'observation et du degré de précision avec lequel elles peuvent accéder à leur objet d'étude.

---

## I - INDICATEURS, SENTINELLES ET BIOREACTEURS

---

Trois concepts plus ou moins proches, visant à tirer parti du comportement de populations vivantes, ont été appliqués à la surveillance des milieux aquatiques. Nous rappellerons les caractères distinctifs de ces outils biologiques en insistant sur ce qui les différencie. Les principales caractéristiques des types de surveillance auxquels ils sont associés ont été résumées dans le tableau 1.

### 1. INDICATEURS BIOLOGIQUES

Employée essentiellement dans le cadre de la surveillance écotoxicologique, la notion d'indicateur biologique s'adresse à des « espèces ou des associations d'espèces capables par leur comportement général (disparition, augmentation ou variation densitaire) de rendre compte de l'évolution générale d'un milieu » [Rivière, 1993].

**Tableau 1**  
**Caractéristiques d'emploi des outils biologiques de surveillance adaptés**  
**au contrôle de l'eau et des milieux aquatiques**

	Niveau	Recrutement	Type de surveillance	Types d'analyses	Critères
<b>Indicateurs</b>	Espèce, communautés	Végétaux/animaux	Ecotoxicologie	Globales	Abondance
<b>Sentinelles</b>	Individus	Mollusques Crustacés Poissons Amphibiens/reptiles Mammifères marins	Ecotoxicologiques Ecotoxicologique/sanitaire Ecotoxicologique/sanitaire Ecotoxicologique Ecotoxicologique/sanitaire	Globales ou spécifiques	Mortalité Modification de comportement Lésions, analyse médicale Analyse physico-chimique
<b>Biocapteurs</b>	Individus, espèce	Bactéries Algues Daphnies Moules poissons	Ecotoxicologique/sanitaire Eau de consommation	Continues globales	Bioluminescence Fluorescence Modification de mobilité Valvométrie,*mortalité Modifications physiologiques Analyse physico-chimique

L'appartenance naturelle à la biocénose considérée et l'absence de systématisation et de régularité du suivi différencient les bioindicateurs des animaux sentinelles. On remarque aussi que les indicateurs biologiques se distinguent par une échelle d'observation relativement large, leur objet étant, de fait, l'état général d'un écosystème donné. Il est rare qu'on se limite à la prise en compte d'une unique espèce, qu'elle soit animale ou végétale, une meilleure information pouvant être tirée de la prise en compte de plusieurs espèces participant d'une même communauté, suffisamment sensibles aux caractéristiques physico-chimiques de l'eau et dont les proportions relatives prennent alors une valeur particulière. C'est ainsi qu'à la notion d'indicateurs vient se substituer celle d'**indices biotiques**, qui permettent une mesure globale de la qualité de l'eau et pour laquelle certains groupes d'invertébrés aquatiques font partie des cibles les plus intéressantes. La définition de ces indicateurs ne prêtant guère à confusion avec celle des animaux sentinelles, il n'en sera pas davantage question dans le cadre strict de cet exposé.

## 2. ANIMAUX SENTINELLES

Dans la définition retenue pour les animaux sentinelles [Toma, 2009] dans ce numéro, « *animaux ou populations animales bien définis, choisis dans leur milieu ou placés volontairement dans un milieu et suivis au cours du temps afin de détecter précocement, de manière qualitative ou quantitative, une exposition à un agent pathogène donné* », c'est principalement la notion de population qui

s'impose en milieu aquatique. La raison tient à la fois à la faible valeur des individus dans la plupart des espèces auxquelles on s'intéresse et à une amplitude notable de la variabilité biologique au sein des espèces aquatiques, variabilité vraisemblablement liée à la poecilothermie, qui ne permet pas de s'affranchir d'approches statistiques menées sur des effectifs souvent importants.

Il convient de souligner que la variété des paramètres comportementaux ou physiologiques susceptibles d'être mesurés chez les animaux sentinelles, de même que leur choix spécifique pour détecter un risque environnemental ou sanitaire bien caractérisé, constituent des particularités qui les différencient des autres référents biologiques associés à la surveillance des eaux. Ni les indicateurs, ni les biocapteurs, n'obéissent à ces critères.

## 3. BIOCAPTEURS

Composante biologique de stations reliées à des systèmes d'alerte et de traitement de données complexes, exclusivement dédiées à la surveillance globale et continue de la qualité des eaux de consommation humaine, les biocapteurs, pour autant qu'il s'agisse d'animaux, ne présentent pas en réalité de différence très tranchée avec les animaux sentinelles. Leur intégration à des dispositifs autonomes hébergeant un nombre restreint d'individus et dans lesquels circule l'eau à contrôler a beau les éloigner sensiblement des conditions de vie naturelles, ils n'en obéissent pas moins nettement aux prescriptions qui conditionnent le statut d'espèce sentinelle dont

ils représentent, au fond, une déclinaison améliorée. La surveillance est assurée par un dispositif de mesure automatisé qui prend en compte un paramètre précis de l'activité biologique des animaux et se trouve couplé à une centrale d'alerte.

Les biocapteurs animaux peuvent apporter de précieux enseignements sur ce qu'il est légitime d'attendre du concept de sentinelle, car ce sont les seuls exemples que leurs conditions de maintenance placent sans concession en situation d'observation continue.

---

## II - LES ANIMAUX SENTINELLES EN MILIEU AQUATIQUE

---

Les principes généraux de l'emploi d'animaux sentinelles ayant été rappelés, il sera question ici des applications classiques, telles qu'elles ont été mises en place pour répondre à des inquiétudes résultant de pollutions chimiques d'une part, de problématiques sanitaires intéressant la santé humaine ou la santé animale d'autre part. Comme nous l'avons mentionné ces divers aspects ont connu une évolution quasiment séquentielle dans le temps et la portée des expériences entreprises et de leurs résultats est loin d'être comparable selon les disciplines.

### 1. LES ESPECES EMPLOYEES ET LES CONDITIONS D'OBSERVATION

Même en limitant la compilation à des exemples obéissant strictement aux définitions données plus haut, la profusion des espèces qualifiées de sentinelles dans la littérature hydrobiologique reste impressionnante et il s'en recrute dans tous les groupes zoologiques d'importance (tableau 2). Beaucoup n'ont pas dépassé le stade de l'essai expérimental, d'autres ont connu un succès plus ou moins affirmé dans le cadre de programmes de surveillance particuliers. Les invertébrés aquatiques d'eau douce ou salée désignés comme espèces sentinelles se recrutent presque toujours parmi les mollusques, les crustacés et les insectes. Chez les vertébrés, des amphibiens et des poissons, parfois mêmes certains reptiles ont été mis à contribution dans la surveillance des eaux de surface. En mer, ce sont principalement les mammifères marins qui de plus en plus font l'objet de suivis.

Il importe de noter que le concept de sentinelle prend en hydrobiologie et en océanographie un sens particulièrement large. Il peut s'appliquer au sens le plus classique, quelques individus étant introduits, le plus souvent enfermés dans des cages, dans un milieu dont on désire surveiller l'innocuité. Ce type

d'opération a pu être réalisé à des fins purement expérimentales mais également prôné, notamment dans le domaine sanitaire, pour contrôler l'efficacité d'une politique d'éradication visant un agent pathogène particulier. A une échelle plus vaste, la désignation de populations sauvages jugées spontanément exposées à des risques chimiques ou biologiques et dont on essaye, par capture ou au gré des circonstances, de tirer des prélèvements exploitables est devenue assez courante [Moutou, 1993]. Ce peut être le cas des populations d'amphibiens, souvent très localisées ou endémiques. C'est toujours celui des populations de mammifères marins, qui voyagent souvent sur de longues distances mais sont fréquemment l'objet de marquages et de balisage individuel à des fins d'études comportementales, se prêtant ainsi à la réalisation occasionnelle de prélèvements biologiques agrémentés d'une certaine traçabilité.

### 2. DIVERSITE DES PARAMETRES MESURES

Le suivi des animaux sentinelles est fondé sur l'observation, doublée des analyses nécessaires à la reconnaissance de l'agent chimique ou biologique faisant spécifiquement l'objet de la surveillance. Toutes les méthodes du diagnostic sont donc envisageables, quitte à requérir des moyens de laboratoire poussés.

Communes aux démarches toxicologiques et sanitaires, les observations cliniques sont toujours propres à attirer l'attention. Dès qu'un problème sérieux se fait jour chez les animaux aquatiques la manifestation habituelle est la mortalité. Il arrive cependant que des atteintes plus ou moins chroniques laissent aux animaux le temps d'exprimer des signes d'altération physiologique ou comportementale assez facilement détectables. L'apparition de lésions hémorragiques ou nécrotiques externes en est la forme la plus fréquente mais

d'autres signes cliniques particuliers (manifestations de détresse respiratoire, troubles de pigmentation, altération de l'équilibre hydrominéral entraînant une rétention oedémateuse souvent spectaculaire) sont également perceptibles pour un œil exercé, dès lors qu'il est possible d'accéder aux animaux.

Les analyses de laboratoire restent indispensables dans la surveillance des animaux sentinelles, dont le plus souvent elles constituent une composante systématiquement réalisée à temps fixes. Faisant appel à toutes les disciplines usuelles, elles peuvent venir confirmer ou préciser la mise en jeu d'altérations physiologiques déjà soupçonnées ou apporter d'emblée l'unique moyen de détecter des anomalies plus insidieuses. Un cas répandu est celui de la recherche d'anomalies chromosomiques ou gonadiques en réponse à l'action de certains pesticides, mais des tests fonctionnels plus élaborés ont également été envisagés, visant à évaluer l'atteinte des fonctions immunitaires [Zelikoff, 1998] ou même à appliquer l'électrocardiographie à des mollusques gastéropodes [Ali *et al.*, 2002]. A un niveau plus fin, des altérations enzymatiques ou biochimiques peuvent également être recherchées et rapportées de manière presque spécifique à l'action d'agents toxiques bien caractérisés. Certaines fonctions enzymatiques ont ainsi été entérinées comme biomarqueurs de pollution. Tel est le cas de la phosphocholinestérase, dont l'activité est très sensible à l'exposition aux insecticides organophosphorés [Mora *et al.*, 1999], et du cytochrome P-450. Catalysée par ce dernier, l'augmentation d'une monooxygénase particulièrement représentée dans le foie des poissons, l'EROD (7-éthoxy-résorufine-O-dé-éthylase), est devenue précieuse pour quantifier les actions organiques des polluants organohalogénés et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dont elle signe la présence dans les milieux aquatiques.

Il va enfin de soi que l'utilisation des techniques d'identification et de dosage des agents chimiques et biologiques placés sous surveillance est incontournable dans la gestion des systèmes sentinelles. Le dosage tissulaire des polluants, recourant à toutes les méthodes de la chimie et de la biochimie analytiques, a beaucoup bénéficié de perfectionnements techniques, en chromatographie notamment, qui permettent de déceler avec précision des niveaux de contamination extrêmement faibles. La

recherche spécifique des organismes pathogènes, mettant en oeuvre les différentes disciplines de la microbiologie et de la parasitologie, a également vu son efficacité démultipliée grâce aux acquis de la biologie moléculaire et du diagnostic génétique. Le diagnostic de laboratoire est donc fondé sur des bases solides. Si des faiblesses doivent être recherchées dans les systèmes de surveillance dépendant de l'emploi d'animaux sentinelles, ce n'est probablement pas à ce niveau qu'il faudra le faire.

### 3. EXEMPLES DE RECOURS AUX ANIMAUX SENTINELLES DANS LA SURVEILLANCE DES EAUX AU REGARD DE LA SANTE HUMAINE

Dans le domaine de la toxicologie et de la qualité sanitaire des eaux, le recours aux espèces sentinelles constitue un chapitre plutôt riche. Le tableau 2, visant à fournir un inventaire très général des types d'animaux employés, du contexte dans lequel ils l'ont été, ainsi que des critères retenus pour tenter d'établir des bilans, reflète assez bien cette diversité. La littérature est de fait très abondante, mais il faut immédiatement faire deux remarques. D'une part, les confusions, comme cela a été évoqué, sont assez fréquentes entre les notions de sentinelle et d'indicateur et la lecture de tout article doit mettre en éveil le sens critique. D'autre part, les exemples rapportés n'ont pas tous une portée équivalente. Leur échelle d'application dans l'espace et dans la durée a pu varier considérablement, de la pratique universellement adoptée et entretenue sans faille depuis de nombreuses années, comme il en va du "mussel watch", à des tentatives très locales, destinées à résoudre des problèmes ponctuels et n'ayant pas obligatoirement apporté le résultat escompté. On constatera une nette prédominance des mollusques, des amphibiens et des poissons dans le rôle de sentinelles, ainsi que l'extrême diversité des mammifères marins ayant fait l'objet de la même démarche. Ces groupes vont fournir matière à quelques exemples pour introduire la variété des problèmes et des situations dans lesquelles leurs représentants ont été impliqués.

#### 3.1. LE « MUSSEL WATCH » [Goldberg *et al.*, 1978]

Imaginé et inauguré vers 1965 par l'Environment Protection Agency (EPA), le

"mussel watch" a été depuis adopté par tous les pays désireux de surveiller la qualité de leurs eaux côtières. Le principe est simple : la capacité naturelle des moules à filtrer activement de grandes quantités d'eau les conduit à retenir dans leur tissus les substances polluantes éventuellement présentes dans cette eau, à des concentrations à peu près proportionnelles à celles du milieu extérieur. La collecte régulière d'échantillons dans des populations soumises à des risques de contamination et le dosage tissulaire des composants polluants doivent donc permettre de suivre la dynamique évolutive de ces derniers et de fixer d'éventuels seuils d'alerte. Le même raisonnement a pu être étendu aux risques de contamination microbiologique, avec plus de réserves toutefois quant à l'interprétation quantitative. Les moules, choisies dans des populations naturellement exposées ou parfois volontairement immergées, sont prélevées à intervalles réguliers, congelées, et transportées au laboratoire pour effectuer les analyses chimiques ou biologiques requises. En France, le Réseau national d'observation (RNO) de la qualité du milieu marin établi par l'IFREMER est fondé sur l'existence d'environ 110 sites dans lesquels des prélèvements de moules sont programmés à différentes périodes de l'année.

Il apparaît que le même principe est applicable à une grande variété de bivalves et le tableau 2 montre que selon les milieux et les zones géographiques considérés plusieurs autres espèces ont pu être élevées au rôle de sentinelles. La contribution des mollusques à la fonction sentinelle est ainsi une des plus remarquables, la plus ancienne sans doute dans le cas du milieu aquatique, et surtout l'une des plus solidement validées. Nous les retrouverons au coeur des systèmes d'alerte fondés sur les biocapteurs.

### 3.2. LE « OUAOUARON » DU QUEBEC [Boily, 2006]

Il s'agit de la grenouille taureau (*Rana catesbeiana*), qui a été désignée par l'Université de Montréal comme témoin des pollutions d'origine agricole pouvant affecter le

milieu aquatique. Ce type de pollution dans des systèmes à faible renouvellement d'eau peut conduire à un relargage sensible de produits pesticides et à une forte surcharge organique, associés à des modifications de la biocénose. C'est souvent au niveau des performances de reproduction et, en dernière analyse, des densités de population que les amphibiens semblent affectés par les pollutions [Davidson *et al.*, 2002]. Dans le cas de la grenouille taureau, les chercheurs se sont attachés à capturer systématiquement, avant de les relâcher, des spécimens sur lesquels étaient pratiqués des examens externes et des analyses sanguines. Leurs conclusions soulignent de fait une hypovitaminose A, probablement à relier à une diminution de taille et à l'altération des fonctions immunitaire et reproductrice, encore qu'il soit trop tôt pour désigner des paramètres qui pourraient servir de témoins de pollution.

### 3.3. LES BÉLOUGAS DU FLEUVE SAINT-LAURENT

La tendance à s'intéresser aux mammifères aquatiques est assez récente. Elle a accompagné les manifestations et la prise de conscience des problèmes liés à la surexploitation des milieux aquatiques et tend à s'affirmer davantage au fil des ans. Elle illustre typiquement les particularités, voire les difficultés d'application de la notion de sentinelle à des animaux sauvages. Le cadre traditionnel d'application du concept est illustré par les bélougas (*Delphinapterus leucas*) du fleuve Saint-Laurent chez lesquels une importante mortalité et un taux de cancer très élevé ont attiré l'attention et ont été mis en relation avec la pollution du fleuve. L'analyse de nombreuses carcasses a permis d'incriminer les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) résultant d'activités industrielles très concentrées de la région, et notamment de celle d'une énorme usine de production d'aluminium qui a définitivement fermé en 2004. Il s'agit là d'une situation assez exemplaire, en ce sens que les bélougas constituent un groupe endémique qui ne quitte pas l'estuaire du fleuve et dont l'accès se trouve ainsi facilité.

**Tableau 2**  
**Exemples d'espèces animales employées comme sentinelles pour la surveillance de la qualité des milieux aquatiques**

Groupe zoologique	Espèces concernées	Contexte d'emploi	Milieu surveillé	Critères recherchés	Référence
<b>Mollusques</b>					
Bivalves	moules, huîtres, palourdes	surveillance : pollutions, organismes toxinogènes	côtier	analyses chimiques, bactériologiques	[Goldberg <i>et al.</i> , 1978]
	moules, huîtres	recherche de biomarqueurs écotoxicologiques	côtier	activité cholinestérase (insecticides)	
	moule zébrée, anodonte	surveillance : pollutions	dulçaquicole	analyses chimiques	
	palourde asiatique ( <i>Corbicula</i> )	surveillance sanitaire	dulçaquicole	giardiose, cryptosporidiose	[Miller <i>et al.</i> , 2005]
Gastéropodes	<i>Brotia</i> , <i>Radix</i>	recherche : écotoxicologie	dulçaquicole (exposition)	mortalité, rythme cardiaque, ECG	[Ali <i>et al.</i> , 2002]
<b>Crustacés</b>	écrevisses	recherche : écotoxicologie	dulçaquicole	analyses chimiques, marqueurs biologiques	[Antón <i>et al.</i> , 2000]
<b>Poissons</b>	mulet, flet	surveillance : écotoxicologie	côtier, estuaires	organochlorés (DDT, PCB)	[Ferreira <i>et al.</i> , 2004]
	poissons de rivière	recherche : indicateurs de pollution	eaux courantes	parasitisme externe ( <i>Trichodina</i> )	[Girard, 1998]
<b>Amphibiens</b>	têtards ( <i>Rana</i> , <i>Bufo</i> ), grenouille taureau, crapaud d'Amérique	recherche et surveillance : écotoxicologie	dulçaquicole (exposition en cages, collecte)	génotoxicité (Am. latine)	[Boily, 2006, Ralph et Petras, 1997]
<b>Reptiles</b>	caïman à museau large, alligator	recherche : écotoxicologie	dulçaquicole	génotoxicité (Etats-Unis), anomalies du développement et désordres endocriniens	[Milnes et Guillette, 2008, Poletta <i>et al.</i> , 2008]
	tortue de Floride	recherche : écotoxicologie	dulçaquicole	agents mutagènes (Etats-Unis)	[Lamb <i>et al.</i> , 1995]

Tableau 2 (suite)

Groupe zoologique	Espèces concernées	Contexte d'emploi	Milieu surveillé	Critères recherchés	Référence
<b>Mammifères</b>					
Marins	baleine boréale	pollutions chimiques	côtier	organo-halogénés, métaux lourds	[Bossart, 2006]
	grand dauphin, lamantin de Floride	blooms d'algues	côtier	biotoxines algales	
	grand dauphin	pollutions chimique phycotoxines surveillance sanitaire	côtier	organo-halogénés, métaux lourds phycotoxines infections à incidence humaine (virus, mycoses viscérales)	
	otarie de Californie	écotoxicologie néoplasies urogénitales	côtier	phycotoxines herpèsvirus ( associé à polluants ?)	
	belouga du Saint-Laurent	pollutions, néoplasies	côtier	polluants industriels	
	lamantin de Floride	écotoxicologie surveillance sanitaire	côtier	phycotoxines infections à incidence humaine (virus, mycoses viscérales)	
Piscivores	loutre de mer	suveillance sanitaire (zoonose) et pollutions	côtier	toxoplasmose	[Jessup <i>et al.</i> , 2004]
	vison	pollutions	dulçaquicole	métaux lourds, PCB	[Basu <i>et al.</i> , 2007]
	ours blanc	pollutions chimiques	Arctique	organo-halogénés, métaux lourds	[Dietz <i>et al.</i> , 2007]
	renard polaire	pollutions chimiques	Arctique	organo-halogénés, PCB	[Fuglei <i>et al.</i> , 2007]

Comme souvent avec des animaux de cette taille et jouissant de mesures conservatoires, ce sont surtout des épisodes de mortalité qui permettent les observations les plus minutieuses. On conçoit que les échouages de grands mammifères marins ne soient pas toujours fréquents ni repérables selon les espèces et les moeurs plus ou moins pélagiques qui les caractérisent. C'est donc principalement pour la surveillance des zones côtières que les mammifères marins s'avèrent intéressants, constat qui ne suffirait pas à justifier l'engouement dont ils sont l'objet si d'autres raisons ne venaient l'expliquer. Leur grand avantage est précisément d'être des mammifères proches par là des humains qui les observent, et de constituer de bons indicateurs des phénomènes qui, survenant près des côtes, pourraient en peu de temps menacer les populations humaines. De là, une prééminence accordée aux observations cliniques, quelle que soit la cause, et la relative importance des empoisonnements et des maladies infectieuses dans la panoplie des phénomènes mis sous surveillance tels que les révèle le tableau 2. Parmi les bactéries pathogènes les plus visées figurent les mycobactéries, qui sont actuellement objets d'intenses remaniements taxonomiques. Plus généralement, il est clair que les agents responsables de zoonoses commandent une grande partie des initiatives actuelles, comme le montre l'exemple de la loutre de mer (*Enhydra lutris*)... L'animal sentinelle lui-même n'échappe pas totalement à des effets d'engouement !

#### 4. ANIMAL SENTINELLE ET SANTE ANIMALE EN MILIEU AQUATIQUE

Les exemples de recours à des animaux sentinelles dans le cadre de l'approche scientifique ou de la surveillance des organismes pathogènes pour les animaux aquatiques sont encore peu nombreux. Un regard au tableau 3 suffit pour prendre mesure de leur modestie. Il est vrai que, contrairement à la tradition établie pour les espèces terrestres, les maladies des poissons et des invertébrés aquatiques n'ont donné lieu que tardivement à des questionnements d'ordre épidémiologique.

L'emploi d'animaux sentinelles pour contrôler l'efficacité des programmes d'assainissement pratiqués à l'encontre de certaines maladies a été suggéré. Il s'agit, préalablement à toute tentative de repeuplement, d'exposer des sujets d'espèces réputées sensibles dans les

milieux récemment assainis. En pratique, les seuls cas vraiment documentés ont porté sur deux agents très différents qui frappent respectivement les salmonidés et les écrevisses [St-Hilaire *et al.*, 2001 ; Oidtmann *et al.*, 2006]. Le premier concernait la nécrose hématoïétique infectieuse (NHI), infection rhabdovirale dont le berceau est le Pacifique Nord et qui sévit de manière régulière dans les populations domestiques et sauvages de saumons et de truites du continent nord-américain. Le second, pour lequel l'emploi de sentinelles est davantage contesté, est *Aphanomyces astaci*, un oomycète resté célèbre comme responsable de la peste des écrevisses qui depuis le milieu du XIXème siècle a dévasté les cours d'eau européens et abouti à la disparition en bien des endroits de l'espèce indigène *Astacus fluviatilis*. D'autres essais, purement expérimentaux ceux-là, ont été envisagés dans le cas de parasitoses des salmonidés dues à des Myxozoaires [Brassard *et al.*, 1982 ; Thompson *et al.*, 1999 ; Gay *et al.*, 2001 ; Stocking *et al.*, 2007]. Deux d'entre elles, causées par *Myxobolus cerebralis* et *Tetracapsuloides bryosalmonae*, ont un impact considérable aussi bien dans les élevages que dans le milieu sauvage. Leur multiplication passe par des cycles de développement complexes impliquant un hôte définitif invertébré (l'annélide *Tubifex tubifex* dans le premier cas, plusieurs espèces de bryozoaires dans le second), le salmonidé ne représentant qu'un hôte intermédiaire chez lequel s'exprime la maladie [Hedrick et el Matbouli, 2002 ; Morris et Adams, 2006]. L'idée d'employer des animaux sentinelles en des lieux précis comme témoins de l'accomplissement du cycle s'en trouve confortée, bien que les possibilités de lutte sanitaire restent bien fragiles.

Dans toutes ces tentatives la méthode employée consistait à immerger pendant un temps donné des cages hébergeant quelques représentants d'espèces sensibles, avant de considérer les sites comme dénués de risque. C'est exactement ce que prône, de manière très théorique encore, le programme australien "Aquavetplan" (Australian Aquatic Veterinary Emergency Plan) du Ministère australien de l'Agriculture, de la Pêche et des Forêts, qui a codifié les conditions dans lesquelles devraient être conduites l'application de mesures d'urgence et d'éradication et la restauration des sites aquatiques en cas d'introduction accidentelle d'agents pathogènes exotiques. Dans plusieurs des documents monographiques édités à cet effet (consultables en ligne : <http://www.daff.gov.au/animal-plant-health/>

aquatic/aquavetplan), figure une rubrique consacrée aux animaux sentinelles (tableau 3). Très sensibilisée aux questions de sécurité sanitaire, l'Australie ne néglige aucune initiative pour apparaître leader en ce domaine. Sa situation isolée au coeur d'une zone d'échanges commerciaux dans laquelle l'aquaculture a enregistré ses plus forts taux de croissance la porte à des préoccupations très globales. Il n'est donc pas fortuit de constater que si l'aphanomyose figure sans

surprise parmi les agents pour lesquels le recours aux animaux sentinelles est clairement conseillé, les autres exemples intéressent pratiquement toutes les espèces convenant à l'aquaculture intensive et, avec la rickettsiose de l'ormeau, la maladie des points blancs des crevettes et les nodaviruses des poissons marins, accordent une attention nouvelle aux élevages pratiqués en milieu saumâtre ou marin.

---

### III - LES BIOCAPTEURS

---

Les biocapteurs n'ont été développés jusqu'à présent que pour le contrôle des eaux de consommation humaine. Destinés à détecter différents types de polluants avec une sensibilité variable, ils sont associés à des systèmes intégrés mesurant en permanence un signal dont tout écart par rapport à une plage de valeurs considérées normales déclenche automatiquement un dispositif d'alerte, la fermeture des circuits de distribution et le prélèvement automatique d'échantillons destinés à la réalisation d'analyses physicochimiques complémentaires. On voit déjà en quoi l'animal utilisé dans ce contexte va occuper une position bien particulière et différer des sentinelles précédemment évoquées. Il n'est plus qu'un des éléments d'un outil relativement complexe et occupe une position spatiale originale en ce que, loin d'être directement immergé dans le milieu mis sous surveillance, il évolue dans un dispositif autonome dans lequel circule l'eau mise en dérivation. Une autre particularité est que sa constante accessibilité et ses conditions de détention ne nécessitent plus l'emploi d'un nombre important de sujets. Dans les biocapteurs les plus accomplis, utilisant des poissons de taille moyenne, il n'est pas rare qu'un seul sujet par unité d'observation soit suffisant.

#### 1. LES TYPES DE BIOCAPTEURS

Le principe des biocapteurs ne s'arrête pas plus à l'emploi de poissons qu'à celui d'animaux et il peut être utile de donner un aperçu des organismes dont on a pu tirer parti.

Un certain nombre de dispositifs, chacun fondé sur l'exploitation d'une espèce biologique originale, ont été commercialisés avec des succès variables. Nous n'en donnerons qu'un aperçu en limitant la présentation à des exemples homologués et en précisant leur principe de fonctionnement.

##### 1.1. BACTERIES

Un premier type d'appareil exploite la mesure de bioluminescence naturellement émise par certaines bactéries, qui s'estompe en cas de dégradation des conditions de milieu. C'est le cas du Toxcontrol Biomonitor<sup>®</sup> commercialisé par Microlan, qui met à contribution *Vibrio luminescens*. L'inconvénient des vibrions, qui sont typiquement des bactéries marines, est de requérir une salinité minimale, ce qui oblige à prévoir un apport régulier de sel et à contrôler le milieu dans lequel ils sont entretenus. Le temps moyen des cycles de mesure s'en trouve augmenté (30 minutes).

##### 1.2. ALGUES

Le Fluotox<sup>®</sup> (AquaMS) tire parti des propriétés de certaines algues chlorophylliennes dont le système photosynthétique, en cas de déprivation en oxygène ou d'arrêt des transferts électroniques, réémet l'énergie solaire sous forme de chaleur et un rayonnement fluorescent susceptible d'être détecté. C'est cette fluorescence qui sert de signal d'alarme. Le temps réactionnel est de l'ordre de 10 minutes.

Tableau 3

Exemples de recours à des animaux sentinelles dans le cadre de la recherche ou de la surveillance d'agents pathogènes pour les animaux aquatiques (dans le cas de l'Australie il ne s'agit que de recommandations théoriques formulées dans le programme AQUAVETPLAN [DAFA , 2009])

Espèces sentinelles	Agent visé	Contexte d'emploi	Objectif	Pays concernés
<b>Ormeaux</b>	<i>Candidatus Xenohalictis californiensis</i> (rickettsie)	recommandation	surveillance après assainissement	Australie
<b>Crevettes pénéides</b>	Nimavirus : maladie des points blancs	recommandation	surveillance après assainissement	Australie (Aquavetplan)
<b>Ecrevisses</b>	<i>Aphanomyces astaci</i> (peste)	cages en rivière	surveillance après assainissement	Royaume-Uni, Norvège
<b>Saumons</b>	Novirhabdovirus : nécrose hématopoïétique infectieuse	sites d'élevage	surveillance après assainissement	Canada
<b>Saumon atlantique</b>	Isavirus : anémie infectieuse du saumon	recommandation	surveillance après assainissement	Australie
<b>Salmonidés, poissons marins</b>	Rhabdovirus : septicémie hémorragique virale	recommandation	surveillance après assainissement	Australie
<b>Truite arc-en-ciel, Salmonidés</b>	<i>Myxobolus cerebralis</i> (tournis) <i>Ceratomyxa shasta</i>	cages ou peuplements en rivières	experimentation surveillance après assainissement	USA, Nouvelle-Zélande, Australie
<b>Truite arc-en-ciel</b>	<i>Tetracapsuloides bryosalmonae</i> (PKX)	piscicultures	experimentation	France, Angleterre
<b>Omble de fontaine</b>	<i>Diplostomum spathaceum</i>	étangs	experimentation	Canada
<b>Poissons marins</b>	Betanodavirus : encéphalopathie et rétinopathie virales	recommandation	surveillance après assainissement	Australie

### 1.3. INVERTEBRES

**Daphnies** : l'Aquatox Control Daphnia® (Kerren) est un dispositif dans lequel la motricité d'une population de daphnies sert de référence. Toute altération de l'activité se traduisant par une baisse ou une perte de mobilité, les instruments d'enregistrement sont à même de respecter un seuil en-deçà duquel l'alerte sera donnée. Mais l'entretien des daphnies demande des soins et représente un facteur limitant.

**Bivalves** : le succès des bivalves comme animaux sentinelles des eaux côtières pouvait d'autant moins échapper aux concepteurs de systèmes destinés au contrôle des eaux de consommation qu'une espèce d'eau douce originaire d'Europe centrale et largement répandue, la moule zébrée (*Dreissena polymorpha*), a la particularité d'être assez exigeante en termes de qualité d'eau tout en supportant aisément les conditions artificielles d'élevage. Les dispositifs mis au point (Mussel-Monitor®, et Dreissena Monitor® de Delta-Consult) reposent sur la valvométrie : la fixation aux marges des deux moitiés de la coquille de mini-senseurs reliés à un dispositif enregistreur permet une minutieuse mesure de l'amplitude et de la fréquence des mouvements valvaires. Comme pour les daphnies le signal est fourni par l'altération de la motricité, les besoins respiratoires et les mouvements valvaires s'accroissant en cas de déséquilibre ambiant, mais le signal est capté, cette fois, à l'échelle individuelle.

### 1.4. POISSONS

Truitosem® (CIFEX) : l'idée de placer des poissons réputés sensibles aux altérations de leur environnement dans les sites de stockage de l'eau destinée à la consommation humaine est déjà ancienne et représente également un des premiers exemples d'application de la fonction sentinelle en milieu aquatique. Le principe a évolué au cours du temps pour aboutir à des stations de surveillance dans lesquelles les premières espèces adoptées ont été la truite arc-en-ciel et, à moindre titre, le vairon (*Phoxinus phoxinus*). Dans les systèmes commercialisés, quelques animaux sont détenus dans des aquariums alimentés par l'eau à surveiller. Une fois encore, ce sont les mouvements actifs qui constituent la base des observations. Toutefois, leur appréhension se fait par le truchement d'un champ d'ultrasons créé par des sondes immergées, que les mouvements des animaux perturbent

par effet Doppler et que des capteurs transforment en signal électrique.

Gymnotox® (AquaMS) : le Gymnotox est un système plus récent qui substitue aux salmonidés une espèce de gymnote originaire d'Amérique du Sud (*Apteronotus albifrons*). Robuste et peu exigeant, ce poisson s'adapte facilement à des dispositifs confinés, atteint une taille de l'ordre de 50 cm qui autorise sa détention dans des enceintes individuelles montées en batterie et émet en permanence un champ électrique aisément mesurable. Sa sensibilité modérée aux causes de stress contribue à abaisser le niveau du bruit de fond parasite généralement associé aux biocapteurs animaux. La station commercialisée représente un dispositif d'environ 160 kg pour 2 m de hauteur et comporte 4 cuves (figure 1). Son transport, son installation et son entretien ne requièrent donc pas de moyens exceptionnels.

## 2. CONDITIONS TECHNIQUES D'EMPLOI DES BIOCAPTEURS

Les performances des biodétecteurs de pollution sont directement fonction des qualités et des limites des composants qui contribuent à leur fonction. Il tombe sous le sens que, face aux éléments mécaniques et électroniques, c'est le facteur animal qui imprime sa marque à l'ensemble du dispositif et impose les contraintes les plus sérieuses.

Les caractéristiques techniques conditionnant l'efficacité des biocapteurs sont celles de tous les systèmes de mesures, mais leur contexte d'emploi appelle à en privilégier certaines. Trois apparaissent cruciales :

- Délais de détection : la rapidité de réponse des systèmes est évidemment essentielle dans un système d'alerte. La mesure en continu apporte à cet égard une garantie appréciable. L'autre facteur qui conditionne cette rapidité est la sensibilité du système, en d'autres termes celle des organismes employés, dans les conditions de maintenance où ils sont tenus. Il ne faut d'ailleurs pas perdre de vue que, même quand le système offre les caractéristiques les plus favorables, les pollutions surviennent en général brusquement et exigent que des opérations de confirmation soient entreprises. La réponse première des biocapteurs s'apparente donc au principe de précaution, la réponse définitive impliquant forcément des délais plus longs.

Figure 1

Vue d'ensemble d'une station de mesure du système Gymnotox commercialisé par AquaMS



- Sensibilité : la sensibilité est une propriété fondamentale des systèmes de mesure qui se heurte toujours à l'existence d'un bruit de fond plus ou moins élevé. Ce dernier appelle un étalonnage sérieux du système de mesure et la définition de seuils de réaction qui doivent être validés après de multiples essais. Les biocapteurs n'échappent pas à cette règle. Le bruit de fond, dans l'environnement de certaines espèces animales, peut atteindre des valeurs assez élevées pour créer des soucis dans l'établissement des seuils, ceux-ci risquant alors de devenir peu compatibles avec la sensibilité souhaitée.
- Spécificité : en matière de biocapteurs on s'attend naturellement à une spécificité très variable selon les espèces choisies comme sentinelles et les facteurs polluants susceptibles d'intervenir. La question n'est

cependant pas déterminante, puisque le choix d'un système de détection globale et l'impératif, en cas de signal positif, d'une démarche confirmatoire par des moyens spécifiques (mesures physico-chimiques ou analyses de laboratoire) forment la base conceptuelle de ces systèmes. En tout état de cause, c'est bien la sensibilité qui sera privilégiée.

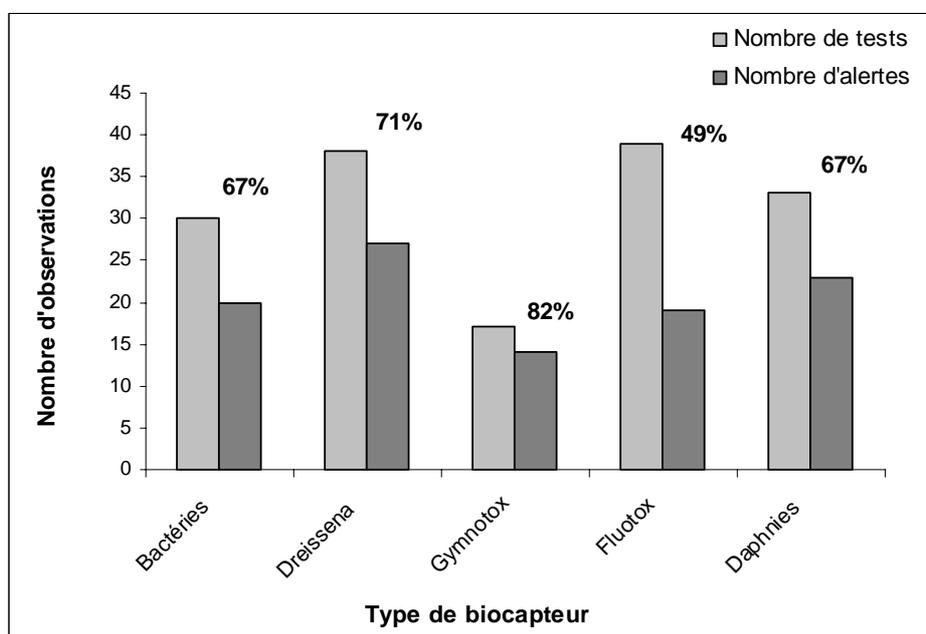
Qu'en est-il, présentement, de l'évaluation comparative des performances des différents modèles de biocapteurs destinés à la surveillance des eaux ? L'interprétation réclame de la prudence car, en dépit du fonctionnement d'un nombre estimable de biocapteurs sur le territoire français (le chiffre de 200 a été avancé), la disparité des situations et le manque d'études dûment publiées ne prêtent pas encore à des comparaisons probantes. La figure 2 réfère à un précieux travail de synthèse, publié

récemment sur la base de démarches associant enquêtes actives et exploitation de la documentation « grise » [Bonnet *et al.*, 2008], consultable en ligne sous [http://ressources.ensp.fr/memoires/2008/ase\\_igs/bonnet.pdf](http://ressources.ensp.fr/memoires/2008/ase_igs/bonnet.pdf)), auquel il sera largement fait appel dans la discussion qui suit. On y trouve le bilan d'une série de tests qui, en termes de fiabilité et d'alertes pertinentes, accordent les

scores les plus satisfaisants au Gymnotox (le système « truite » n'est pas inclus) et aux systèmes employant les moules d'eau douce. La plupart des autres systèmes ne dépassent pas la barre des 70% d'alertes justifiées. Cela ne préjuge cependant pas de leur adéquation s'il s'agit de surveiller les fluctuations de paramètres physiques ou d'agents de pollution particuliers.

Figure 2

**Essai comparatif mené sur différents types de biocapteurs, indiquant la proportion des alertes pertinentement transmises par les systèmes par rapport au nombre des tests effectués**  
[d'après Bonnet *et al.*, 2008]



## IV - EVALUATION ET APPRECIATION CRITIQUE DES SYSTEMES SENTINELLES

### 1. CAS DES BIOCAPTEURS

Plus encore que pour les aspects techniques, la rareté des données objectives nuit à l'évaluation de la pertinence des systèmes sentinelles. Bonnet *et al.* [2008] rapportent toutefois des résultats d'enquêtes qui permettent de prendre mesure d'une nette différence de perception de ces systèmes selon les acteurs socio-professionnels auxquels on s'adresse.

Les firmes commerciales fournissant les systèmes de biocapteurs "clés en mains" sont les plus optimistes et les représentants interrogés se montrent résolument positifs quant à la fiabilité et aux avantages conférés par le recours à ces dispositifs.

Les appréciations sont plus mitigées, voire pour certaines franchement négatives, quand les auteurs s'adressent à des utilisateurs, à savoir des personnes employées par les organismes de traitement et de distribution des

eaux de consommation et directement impliquées dans les problèmes de terrain. Les critiques formulés tiennent au caractère immanquablement promotionnel des performances avancées par les fabricants et au manque de compétence technique et de discernement des autorités commanditaires. Ces dernières se recruteraient essentiellement dans le cadre des collectivités locales, affichant avant toute chose le souci d'une image de responsabilité et d'irréprochable gestion des risques.

Cette impression peut-être un peu subjective et assez désabusée n'est pas pour autant démentie par l'interrogation des autorités institutionnelles en charge de l'action sanitaire et sociale. Qu'il s'agisse des délégations régionales (DRASS) ou départementales (DDASS), les taux de réponses (36 et 21% respectivement) ne révèlent pas une sensibilisation très vive à la question. Les régions renvoient volontiers aux délégations départementales, qu'ils considèrent mieux informées. Ces dernières, lorsqu'elles répondent, admettent parfois une vague connaissance du sujet mais ne paraissent pas disposer de dossiers techniques vraiment constitués. On peut en déduire qu'aucune structure organisée ne présente actuellement les pré-requis pour lui conférer un regard impartial et précis sur l'emploi des biocapteurs. De fait, il est difficile d'avoir une idée précise du nombre de centrales réellement en activité bien que tous s'accordent à considérer qu'il augmente régulièrement.

Les éléments ainsi évoqués ne peuvent évidemment conduire à un bilan très complet de l'usage des biocapteurs. Il apparaît pourtant des idées directrices qui constituent autant de guides pour tenter des approches plus approfondies. La première clé à retenir est que tout biocapteur ne représente qu'un système de pré-alerte, fondé sur ses qualités de sensibilité, qui doit être intégré dans une chaîne de mesures et auquel un exercice d'évaluation ne saurait s'intéresser isolément, en dehors de son contexte de fonctionnement. Les investissements, quel que soit le système considéré, restent modiques (de l'ordre de 20-30 k€) si on leur compare le coût de la plupart des instruments d'analyse physico-chimique.

Par contre, les dépenses d'entretien sont élevées. La maintenance représente en effet un ensemble d'opérations délicates, demandant une main d'oeuvre qualifiée et un suivi très méticuleux, l'un des inconvénients majeurs tenant à l'inévitable phénomène de dérive qui avec le temps vient biaiser les mesures. A l'inverse des coûts, les bénéfices sont dans les circonstances actuelles difficiles à évaluer, d'appréciation souvent subjective et parfois sujets à de sérieuses réserves.

## 2. ELARGISSEMENT A D'AUTRES CHAMPS DE LA FONCTION SENTINELLE

Malgré un domaine d'application très spécifique, et aussi contrasté qu'apparaisse leur bilan, les conditions rigoureusement contrôlées dans lesquelles s'exerce le fonctionnement des systèmes fondés sur les biocapteurs ont apporté les éléments les plus objectifs dont on dispose pour juger l'intérêt des systèmes sentinelles dans la surveillance de l'environnement aquatique. Il ressort sans équivoque que :

- La **sensibilité** de certains organismes aux variations des paramètres environnementaux ou à l'action des bioagresseurs peut être exploitée, mesurée et quantifiée ;
- L'**expérience acquise** dans la calibration, l'étalonnage et le traitement statistique des données doit pouvoir être généralisée dans des contextes moins contraints par les servitudes technologiques, les délais de réponse et les impératifs de rentabilité, notamment quand sont mises en avant des motivations de nature essentiellement académique.

A l'inverse, les multiples observations de terrain, même ponctuelles et purement expérimentales, qui tendent à se généraliser dans les environnements aquatiques les plus variés devraient favoriser l'identification de nouvelles espèces présentant les propriétés optimales pour être à leur tour employées comme sentinelles ou comme biocapteurs.

---

## V - CONCLUSION :

### QUEL FUTUR POUR LA SURVEILLANCE EN MILIEU AQUATIQUE ?

---

On est obligé de constater, bien que le problème de l'eau et de sa disponibilité future à l'échelle planétaire soit dans tous les esprits, qu'à l'exception du "mussel watch" les systèmes de surveillance méthodiquement organisés pour le suivi des habitats aquatiques continentaux commencent seulement à être mis en place. Leur montée en puissance est cependant prévisible et ils devraient logiquement bénéficier de l'élan donné par les exemples "terrestres" et par la surveillance des eaux de consommation humaine. Aussi n'est-il pas superflu, pour terminer, de revenir sur les rapports qu'entretiennent les sentinelles et les bio-indicateurs dans les stratégies de surveillance, en essayant d'imaginer l'avenir que pourraient connaître les deux concepts à la lumière de certains développements en cours. De fait, la distinction peut parfois sembler ambiguë dès lors qu'ils apportent une information équivalente ou se combinent dans une même démarche. C'est surtout dans l'appréciation de l'état général des milieux naturels que s'opère cette rencontre.

Ainsi, une enquête menée en France sur des populations de poissons sauvages (Girard, 1998) avait conduit à proposer l'infestation par un cilié ectoparasite du genre *Trichodina* comme indicateur de l'état sanitaire environnemental dans les milieux dulçaquicoles. On peut voir indifféremment dans cette proposition l'emploi des deux outils : l'estimation périodique de la charge parasitaire dans une population de poissons clairement désignée fait bien de ces derniers des sentinelles tandis que les parasites, pour leur

part, dont on suit les fluctuations de la population colonisant les poissons, satisfont bien à la définition des indicateurs. Cette double fonction tient en fait à l'adoption d'un organisme pathogène comme indicateur de l'état de santé de l'environnement. On retrouve la même dualité dans les conclusions d'auteurs américains qui ont étudié l'incidence et la dynamique des infections mycobactériennes en baie de Cheseapeake. Montrant que les espèces bactériennes en cause, variées, souvent nouvelles au plan taxonomique, ne peuvent être raisonnablement qualifiées de pathogènes typiques et attribuant leurs effets à la pollution rémanente qui sévit dans la baie, ils proposent de faire des mycobactérioses de poissons marins un indicateur (improprement qualifié de « sentinelle » !) de la dégradation du milieu environnemental.

Sans remettre en cause les définitions retenues, on conçoit que la multiplication des démarches, la diversité des champs d'application et des échelles d'organisation biologique considérées, ainsi que les évidents points de rencontre ou de chevauchement entre les notions de surveillance, de sentinelles et de bioindicateurs ont un impact particulièrement fort dans les habitats aquatiques. Liés et solidaires, ces outils manifestement appelés à se compléter et à jouer un rôle majeur dans le développement des politiques de surveillance des eaux auront, au fil du temps, à s'affirmer, à s'affiner, et ne sont certainement pas voués à l'immuabilité.

---

## BIBLIOGRAPHIE

---

Ali J.H., Maschinchian A., Yoong Y.K., Jambarl L. - Use of mollusks as sentinel species for monitoring pollution and indicators for quality of river waters. 7th International Congress on Medicinal and Applied Malacology, Los Banos, Laguna, Philippines, 2002.

Antón A., Serrano T., Angulo E., Ferrero G., Rallo A. - The use of two species of crayfish as environmental quality sentinels: the

relationship between heavy metal content, cell and tissue biomarkers and physico-chemical characteristics of the environment. *Sci. Total Environ.*, 2000, **247**, 239-251.

Basu N., Scheuhammer A.M., Bursian S.J., Elliott J., Rouvinen-Watt K., Chan H.M. - Mink as a sentinel species in environmental health. *Environ. Res.*, 2007, **103**, 130 -144.

Boily M. - Les grenouilles : sentinelles de la santé des écosystèmes aquatiques en

- milieu agricole. *FrancVert*, 2006, **3**, 5-11. (<http://www.francvert.org/pages/32dossierlesgrenouilles sentinelles dela.asp>)
- Bonnet M.-E., Fecherolle J., Floc'h C. - Mesure en continu et surveillance des ressources en eau. EHESP, Ateliers Santé-Environnement, 2008, 72 pp.
- Bossart G.D. - Marine mammals as sentinel species for oceans and human health. *Oceanography*, 2006, **1**, 134-137.
- Brassard P., Curtis M.A., Rau M.E. - Seasonality of *Diplostomum spathaceum* (Trematoda; Strigeidae) transmission to brook trout (*Salvelinus fontinalis*) in northern Quebec, Canada. *Can. J. Zool.*, 1982, **60**, 2258-2263.
- DAFA (Australian Department of Agriculture, Fisheries and Forestry. - Aquavetplan (Australian Aquatic Veterinary Emergency Plan.). <http://www.daff.gov.au/animal-plant-health/aquatic/aquavetplan>, 2009 (dernière mise à jour).
- Davidson C., Shaffer H.B., Jennings M.R. - Spatial tests of the pesticide drift, habitat destruction, UV-B, and climate-change hypotheses for California amphibian Declines. *Conserv. Biol.*, 2002, **16**, 1588-1601.
- Dietz R., Rigét F.F., Sonne C., Letcher R.J., Backus S., Born E.W., Kirkegaard M., Muir D.C.G. - Age and seasonal variability of polybrominated diphenyl ethers in free-ranging East Greenland polar bears (*Ursus maritimus*). *Environ. pollut.*, 2007, **146**, 166-173.
- Ferreira M., Antunes P., Gil O., Vale C., Reis-Henriques M.A. - Organochlorine contaminants in flounder (*Platichthys flesus*) and mullet (*Mugil cephalus*) from Douro estuary, and their use as sentinel species for environmental monitoring. *Aquat. Toxicol. (Amst.)*, 2004, **69**, 347-357.
- Fuglei E., Bustnes J.O., Hop H., Mørk T., Bjørnfoth H., Van Bavel B. - Environmental contaminants in arctic foxes (*Alopex lagopus*) in Svalbard : Relationships with feeding ecology and body condition. *Environ. pollut.*, 2007, **146**, 128-138.
- Gay M., Okamura B., De Kinkelin P. - Evidence that infectious stages of *Tetracapsula bryosalmonae* for rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* are present throughout the year. *Dis. Aquat. Org.*, 2001, **46**, 31-40.
- Girard P. - Le poisson sentinelle des milieux aquatiques : pertinence et optimisation des indicateurs sanitaires. *Bull. Fr. Pêche Piscic.*, 1998, 350-351, 429-443.
- Goldberg E.D., Bowen V.T., Farrington J.W., Harvey G., Martin J.H., Parker P.L., Riseborough R.W., Robertson W., Schneider E., Gamble E. - The mussel watch. *Environ. Conserv.*, 1978, **5**, 101-125.
- Hedrick R.P., El-Matbouli M. - Recent advances with taxonomy, life cycle and development of *Myxobolus cerebralis* in the fish and oligochaete hosts. In : Whirling disease: Reviews and current topics. Bartholomew J.L., Wilson J.C. (Ed.). American Fisheries Society Symposium 29, Bethesda, Maryland, 2002.
- Jessup D.A., Miller M., Ames J., Harris M., Kreuder C., Conrad P.A., Mazet J.A.K. - Southern sea otter as a sentinel of marine ecosystem health. *Ecohealth*, 2004, **1**, 239-245.
- Lamb T., Bickham J.W., Lyne T.B., Gibbons J.W. - The slider turtle as an environmental sentinel: multiple tissue assays using flow cytometric analysis. *Ecotoxicology*, 1995, **4**, 5-13.
- Miller W.A., Atwill E.R., Gardner I., Miller M., Fritz H., Hedrick R., Melli A., Barnes N., Conrad P.A. - Clams (*Cornicula fluminea*) are bioindicators of fecal contamination with *Cryptosporidium* and *Giardia* in freshwater ecosystems of California. *Journal for Parasitology*, 2005, **35**, 673-684.
- Milnes M.R., Guillette L.J.J. - Alligator tales: New lessons about environmental contaminants from a sentinel species. *Bioscience*, 2008, **58**, 1027-1036.
- Mora P., Michel X., Narbonne J.F. - Cholinesterase activity as potential biomarker in two bivalves. *Environ. Toxicol. Pharmacol.*, 1999, **7**, 253-260.
- Morris D.J., Adams A. - Transmission of *Tetracapsuloides bryosalmonae* (Myxozoa: Malacosporea), the causative organism of salmonid proliferative kidney disease, to the freshwater bryozoan *Fredericella sultana*. *Parasitology*, 2006, **133**, 701-709.
- Moutou F. - Les animaux sauvages sentinelles de la pollution. *Le Point vétérinaire*, 1993, **24**, 667-672.
- Oidtman B., Geiger S., Steinbauer P., Culas A., Hoffman R.W. - Detection of *Aphanomyces astaci* in North American

- crayfish by polymerase chain reaction. *Dis. Aquat. Org.*, 2006, **72**, 53-64.
- Poletta G.L., Larriera A., Kleinsorge E., Mudry M.D. - *Caiman latirostris* (broad-snouted caiman) as a sentinel organism for genotoxic monitoring: Basal value determination of micronucleus and comet assay. *Mutat. Res.*, 2008, **650**, 202-209.
- Ralph S., Petras M. - Genotoxicity monitoring of small bodies of water using two species of tadpoles and the alkaline single cell gel (comet) assay. *Environ. Mol. Mutagen.*, 1997, **29**, 418-430.
- Rivière J.-L. - Les animaux sentinelles. *Cour. Environ.*, 1993, **20**, 59-68.
- St-Hilaire S., Stephen C., Kent M., Ribble C. - Sentinels in the bay: using farm fish to monitor for pathogens in the environment. *ICES J. Mar. Sci.*, 2001, **58**, 369-373.
- Stocking R.W., Lorz H.V., Holt R.A., Bartholomew J.L. - Surveillance for *Ceratomyxa shasta* in the Pudget Sound watershed, Washington. *Journal of Aquatic Animal Health*, 2007, **19**, 116-120.
- Thompson K.G., Nehring R.B., Bowden D.C., Wygant T. - Field exposure of seven species or subspecies of salmonids to *Myxobolus cerebralis* in the Colorado River, Middle Park, Colorado. *Journal of Aquatic Animal Health*, 1999, **11**, 312-329.
- Toma B. - La fonction sentinelle en épidémiologie. *Epidémiol. et santé anim.*, 2009, **56**, 5-14.
- Zelikoff J.T. - Biomarkers of immunotoxicity in fish and other non-mammalian sentinel species: predictive value for mammals. *Toxicology*, 1998, **129**, 63-71.

