

De la chimie des écosystèmes et des cocktails...

Éric Blin est responsable du Centre de Compétence Milieux aquatiques de la Lyonnaise des Eaux¹, à la Direction de la Protection de l'Environnement.

1 Généralités sur la pollution des eaux

1.1. Historique sur l'origine des pollutions des eaux

La chimie a beaucoup contribué à l'amélioration de la santé de l'homme et de son confort, mais quelles peuvent en être les conséquences sur l'environnement ? Commençons par un historique sur l'évolution de la nature des pollutions (**Figure 1**). Avant le XX^e siècle, la pollution était principalement constituée de matières fécales et organiques, avant que n'apparaissent les premiers impacts de la pollution métallique qui augmente avec le développement industriel. Dans les dix dernières années en

particulier, le développement de la chimie et de ses applications dans la vie quotidienne conduit à l'apparition de nouveaux polluants, qui atteignent notamment l'environnement. Aujourd'hui, on parle de polluants dits « émergents » car leur détection résulte des progrès de notre savoir et de la reconnaissance analytique ; c'est le cas des nanoparticules, des polluants d'origine pharmaceutique ou phytosanitaire, ou encore de certains solvants.

1.2. Évolution de la nature des polluants chimiques

Il est intéressant de se pencher sur l'évolution de la

1. www.lyonnaise-des-eaux.fr

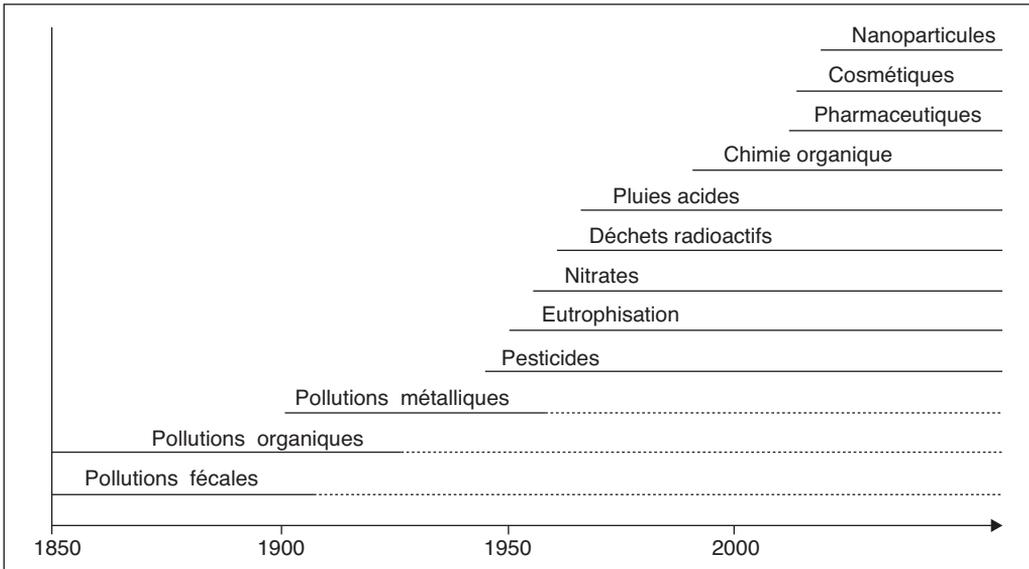


Figure 1

Chronologie des principales sources de pollution des eaux continentales dans les pays industrialisés.

nature des polluants chimiques (**Tableau 1**) : avant 1900, on trouvait principalement des composés comme le sulfate de cuivre, le soufre, la nicotine... puis au fur et à mesure du développement de nos connaissances et de la chimie industrielle, les molécules se sont multipliées et complexifiées. Les sources de pollution proviennent de l'agriculture et l'industrie, mais aussi de l'activité domestique dont chacun de nous reste l'acteur principal.

1.3. Cheminement des polluants dans l'eau

Les polluants émis par ces multiples sources se retrouvent ensuite partout dans notre environnement (**Figure 2**), en particulier dans les milieux aquatiques, qui

les récupèrent *via* les eaux de ruissellement et nos rejets multiples. Il en résulte une contamination progressive de nos masses d'eau, qu'elles soient souterraines ou superficielles, par des rejets directs ou diffus.

2 Des eaux insuffisamment dépolluées

La difficulté des problèmes à résoudre varie selon la nature des polluants : certaines molécules ont une durée de vie de plusieurs milliers d'années et d'autres de quelques heures seulement. Certaines sont toxiques à court terme et d'autres à long terme comme par exemple ces molécules qui agissent comme perturbateurs endocriniens et peuvent induire des changements de

Tableau 1

Évolution de la nature des produits chimiques utilisés depuis 1900.

	HERBICIDES	FONGICIDES	INSECTICIDES
Avant 1900	Sulfate de cuivre Sulfate de fer	Soufre Sels de cuivre	Nicotine
1900-1920	Acide sulfurique		Sel d'arsenic
1920-1940	Colorants nitrés		
1940-1950	Phytohormones...		Organo-chlorés Organo-phosphorés
1950-1960	Triazines, urées substituées Carbamates	Dithiocarbamates Phtalimides	Carbamates
1960-1970	Dipyridyles, toluidines...	Benzimidazoles	
1970-1980	Amino-phosphonates Propionates...	Triazoles Dicarboximides Amides, phosphites Morholines	Pyréthriinoïdes Benzoyl-urées (régulateurs de croissance)
1980-1990	Sulfonyl urées...		
1990-2000		Phénylpyrroles Strobilurines	

sexe des poissons en milieux estuariens.

La mobilité de la molécule dans la chaîne alimentaire est également un paramètre important à prendre en compte, le risque étant la bioaccumulation (Figure 3). Par exemple, dans le cas des pesticides ou du DDT, on a observé un accroissement de concentration de l'ordre d'un facteur de 200 000 à travers toute la chaîne alimentaire en bout de chaîne comme le héron ! Et l'homme, comme le héron, est capable de concentrer ces molécules. Le corps humains lui-même fabrique également des molécules de type perturbateur

endocrinien qui sont excrétées.

Six millions de produits chimiques sont commercia-

Figure 2

Cheminement de la pollution des masses d'eaux superficielles et souterraines.

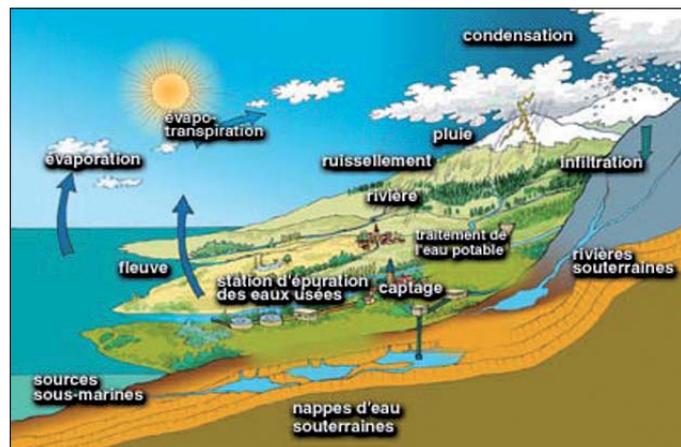
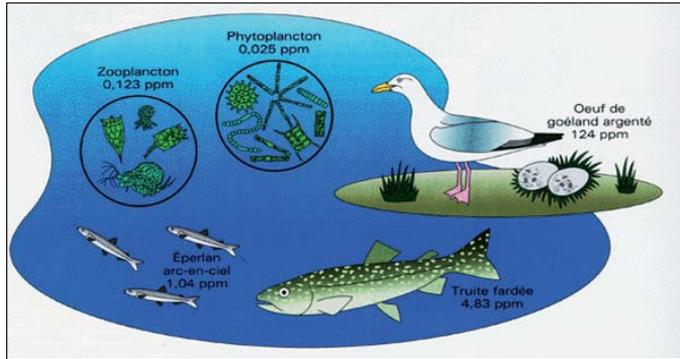


Figure 3

A) Bioaccumulation et bioamplification de substances (pesticides, DDT, PCB...) dans la chaîne alimentaire. Ces substances sont absorbées par les organismes et peuvent s'accumuler dans les graisses ou le foie (bioaccumulation) ; à mesure que les autres organismes mangent ceux qui sont contaminés, les substances gravissent les échelons du réseau trophique et deviennent de plus en plus concentrées (bioamplification).



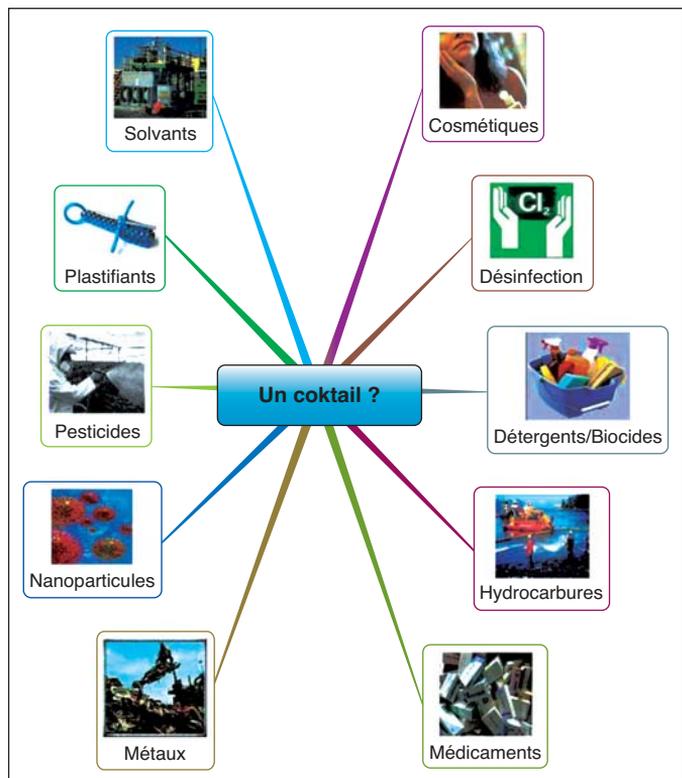
lisés dans le monde actuellement. Vingt-deux millions de molécules sont connues par les chimistes, qui en créent 4 000 nouvelles chaque jour. Sur les 4 300 médicaments différents s'ajoutent 23 nouveaux principes commercialisés chaque année. Le cocktail

des molécules utilisées n'a donc pas fini de s'agrandir (Figure 4).

La grande difficulté pour protéger l'environnement est donc d'évaluer l'impact réel que peuvent avoir les nombreuses substances qui ont été fabriquées pour améliorer

Figure 4

L'activité humaine génère potentiellement des millions de molécules : un véritable cocktail !



notre confort de vie. Seules ou en synergie avec d'autres – des combinaisons conduisent à ce que l'on appelle l'« effet cocktail » –, elles auront des effets que nous nous devons de quantifier, au fur et à mesure de la mise au point de méthodes analytiques adaptées, et de limiter en fixant des seuils de concentrations à ne pas dépasser.

De nombreuses stations d'épuration sont installées partout en France, mais la chaîne de traitement des eaux usées n'a encore qu'une efficacité relative, comme l'illustre la **Figure 5** (voir aussi le **Chapitre de M. Coquery/S. Martin Ruel**). Ces stations épurent ou retiennent près de 80 % des polluants considérés comme substances dangereuses ou émergentes.

Il reste donc 20 % de molécules qui finissent par s'accumuler dans les écosystèmes, avec un cocktail de polluant de « base », comme le montre en exemple l'analyse de sortie d'une station d'épuration d'une commune rurale de 3000 habitants, sans artisanat, industrie, hôpital ni maison de retraite, donc sans pollution spécifique particulièrement importante (**Tableau 2**).

3 La chimie et la nature pour dépolluer l'eau

Comment améliorer la qualité des eaux rejetées dans nos rivières ? La nature nous offre des pistes intéressantes. Rappelons combien celle-ci fait preuve de grandes performances, qui ne sont pas

Figure 5

Vision globale des filières conventionnelles. Réf. : programme AMPERE.

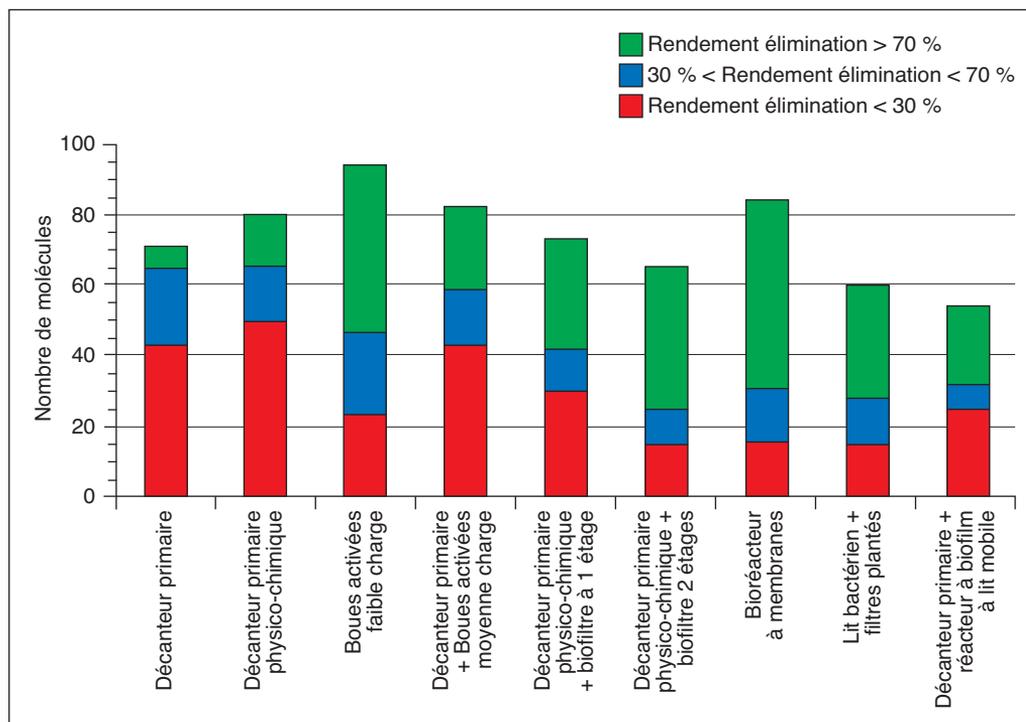


Tableau 2

Analyse de sortie d'une station d'épuration d'une commune rurale de 3 000 habitants (Saint-Just, juin 2009) – LDE 2009. De nombreux résiduels se retrouvent dans les écosystèmes où ils vont s'accumuler.

Famille	Composé	Concentration St-Just Sortie clarif (µg/L)	Normes NQE (µg/L)
Pesticides	Lindane	0,02	0,02
	Diazinone	0,04	–
	Terbuthrine	0,04	–
	Tébutame	0,04	–
	Diuron	0,05	0,2
	Pipéronil butoxide	0,03	–
	Tébuconazole	0,04	–
	Aminotriazole	0,96	–
	AMPA	4,70	–
	Glyphosate	1,1	–
	Imidaclopride	0,09	–
HAP	Phénanthrène	0,04	
Alkylphénols	Para-nonylphénols	0,82	0,3
	Nonylphénols	–	
Métaux	Zinc	20	7,8
Antibiotiques	Doxycycline	0,052	–
	Erythromycine	0,760	–
	Roxythromycine	0,017	–
	Tétracycline	0,037	–
Antiépileptiques Analgésiques/Anti inflammatoires	Carbamazépine	1,11	–
	Kétoprofène	0,305	–
	Ibuprofène	0,189	–
	Diclofénac	0,921	–
Hypolipidémiants	Fénofibrate	0,329	–

toutes encore totalement expliquées comme celles de la photosynthèse (**Figure 6**) ; rappelons aussi l'incroyable richesse de cette nature qui a ouvert la voie au développement de médicaments : la moitié des médicaments utilisés en chimiothérapie sont d'origine naturelle, comme rappelé dans **Chapitre de F. Guéritte**.

Comment utiliser la physico-chimie de la nature afin de mieux dépolluer l'eau ? Examinons les pistes actuelles de recherche...

3.1. La phytoremédiation

L'une des méthodes envisageables pour dépolluer les eaux usées est d'utiliser les écosystèmes naturels et en

particulier les processus liés à la phytoremédiation, abordée plus en détail dans le **Chapitre de J.-L. Morel**. Les molécules sont assimilées ou transformées par les plantes et leur système racinaire, en passant par des formes chimiques qui peuvent être totalement différentes de leur forme d'origine. Elles peuvent ainsi migrer du compartiment eau au sol ou au compartiment air. Les molécules peuvent également être dégradées dans la phase eau par les exsudats des racines, ou encore grâce à des échanges enzymatiques entre les racines et des champignons ou bactéries, dans une association symbiotique.

La pollution diffuse : le cas des micropolluants organiques

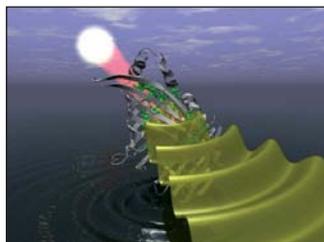
Qu'en est-il des nouveaux polluants organiques, qui sont diffusés à faibles concentrations dans le milieu, tels que les pesticides, hydrocarbures, solvants, détergents, antibiotiques, anticancéreux, anti-inflammatoires, antistress, perturbateurs endocriniens (hormones, résidus plastiques, etc.) ? Les recherches dans ce domaine sont en plein développement. Une analyse bibliographique de 350 publications (**Figure 7**) fait ressortir un nombre d'études important sur les métaux, mais encore peu sur les micropolluants organiques, alors même qu'il reste encore beaucoup de travail à développer dans ce domaine.

On trouve néanmoins des avancées scientifiques intéressantes sur l'activité dépolluante de quelques plantes (**Figure 8**) : l'*Helianthus annuus* (tournesol) dégrade un anti-



Figure 6

La nature est performante et recèle encore des mystères : elle fait preuve de prouesses inégalées par l'homme en utilisant par exemple la mécanique quantique pour convertir sans perte l'énergie des rayons du soleil en énergie chimique de photosynthèse.



biotique comme la tétracycline, le *Dracaena sanderiana* absorbe le bisphénol A, connu comme perturbateur endocrinien, et l'*Arabidopsis* dégrade le trinitrotoluène (TNT).

On le voit, les plantes nous offrent la possibilité d'exploiter des propriétés dépolluantes

Figure 7

Synthèse bibliographique sur les pollutions de l'eau (Jérôme Schuehnmacher – juillet 2011). Étude réalisée à partir de 349 publications, 599 espèces végétales (dont 464 pour les métaux) considérées comme ayant un effet positif sur l'élimination des polluants.

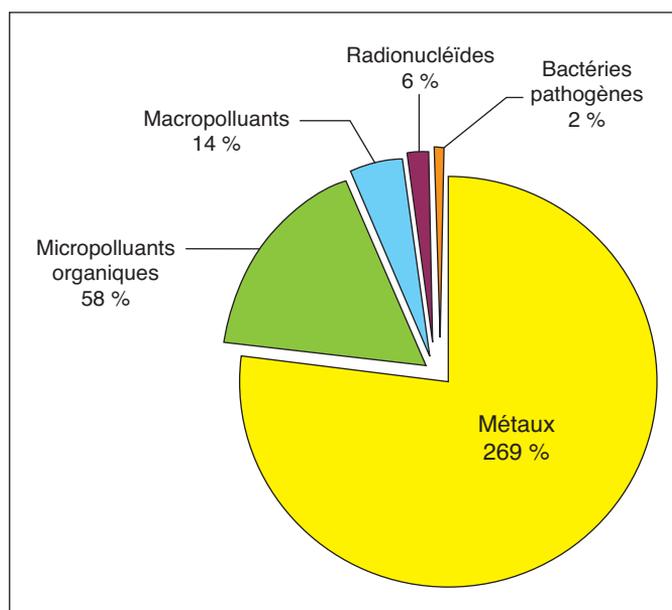
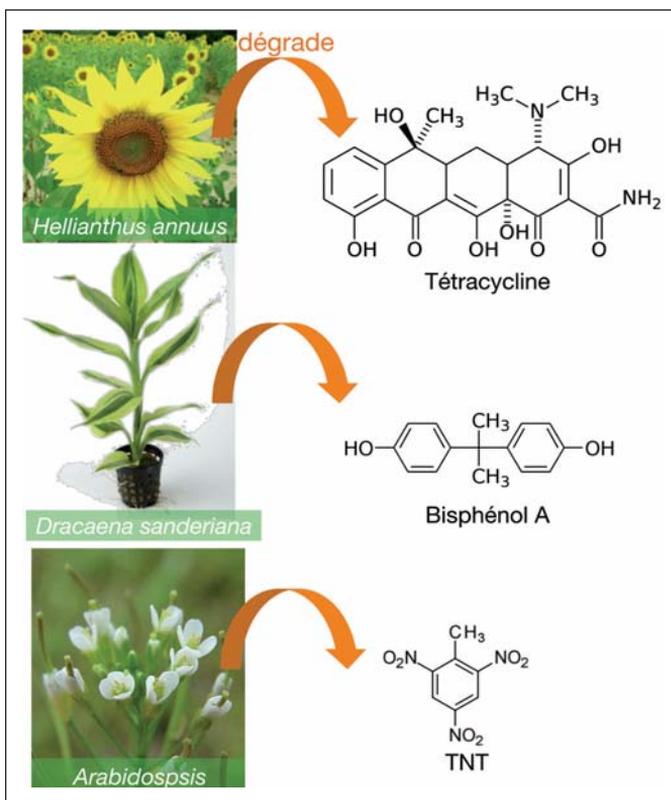


Figure 8

Quelques plantes pour la phytoremédiation par dégradation enzymatique de molécules au niveau des racines.



performantes. Malheureusement, elles sont comme d'autres espèces en voie de régression notamment en France, qui a perdu, au cours d'un siècle, 50 % de surface de zones humides, riches en biodiversité. Un soutien réglementaire important favorise maintenant la reconquête de ces terrains (*Encart « La problématique des zones humides en France »*).

3.2. À la reconquête des zones humides : la zone libellule

3.2.1. Principe de la zone libellule

Dans le cadre d'une politique de protection de la qualité des masses d'eaux et de recon-

quête des zones humides, la société Lyonnaise des Eaux a mis en place un modèle expérimental de zone humide artificielle appelé Zone Libellule® [= Zone de Liberté Biologique Et de Lutte contre les polluants Emergents, *Figure 10*], avec deux objectifs :

- revitaliser la biodiversité en créant des paysages humides écologiques et des habitats favorables à une flore et à une faune irremplaçables ;
- recréer un écosystème aquatique complexe qui puisse réduire naturellement les micropolluants.

La stratégie consiste à développer une suite d'écosystèmes spécifiques qui profitera de la biodiversité naturelle des

LA PROBLÉMATIQUE DES ZONES HUMIDES EN FRANCE (Figure 9) EN QUELQUES CHIFFRES...

50 % de surface ont disparu en un siècle.

Ces zones humides ne représentent que 5 % du territoire, mais :

- 1/3 des espèces végétales menacées ;
- la moitié des espèces d'oiseaux ;
- la totalité des batraciens.

Une demande réglementaire de reconquête a été mise en place à différents niveaux :

- international : Convention Ramsar¹ (1971)
- européen : Directive Cadre sur l'Eau² (2000), Directive Habitats³ (1992)
- français : Loi sur l'eau et les milieux aquatiques⁴ (2006)



Figure 9

Une zone humide est une zone « où l'eau est stagnante ou courante, douce, saumâtre ou salée, y compris des étendues d'eau marine dont la profondeur à marée basse n'excède pas six mètres » (Convention Ramsar).

¹<http://www.ramsar.org>

²http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28002b_fr.htm

³http://europa.eu/legislation_summaries/environment/nature_and_biodiversity/l28076_fr.htm

⁴<http://www.developpement-durable.gouv.fr/La-loi-sur-l-eau-et-les-milieux.html>

zones humides (biofilms, diatomées, planctons, microphytes, macrophytes, faune...) pour apporter une complémentarité très riche en processus biologiques et biochimiques, aux systèmes épuratoires classiques.

L'intérêt de la mise en œuvre de systèmes extensifs comme les Zone Libellule réside sur-

tout dans la complexification et la fragmentation des écosystèmes en systèmes complémentaires, sources d'une augmentation générale des performances. En utilisant de nouveaux processus comme des symbioses animales ou végétales, avec des temps de contacts différents, les forces naturelles



Figure 10

La zone libellule est un espace tampon humide et végétalisé permettant de développer la biodiversité locale et de réduire l'impact des eaux usées traitées sur le milieu récepteur.

permettront une action renforcée capable de dégrader, transformer ou d'assimiler le cocktail de polluants résiduels sortant de la station d'épuration (Figure 11).

L'idée est d'utiliser le flux d'eau, issu d'une usine de traitement des eaux usées le plus souvent, pour remettre en eau une parcelle de terrain et ainsi recréer divers écosystèmes humides. Ainsi, une succession d'habitats humides vont se succéder pour constituer la Zone Libellule : l'eau coule tout d'abord dans une petite cascade – ce qui introduit déjà une nouvelle niche, notamment pour les organismes filtreurs microscopiques –, puis passe par un

bassin qui va finaliser l'élimination des macropolluants (carbone, azote, phosphore) grâce à des herbes de rivage ou des microphytes. Lors d'une pluie, il faut noter que l'eau s'écoulera de ce bassin par surverse vers une prairie humide où elle s'infiltrera, créant ainsi un biotope supplémentaire particulier. Le circuit du fil d'eau se poursuit en traversant une roselière, connue elle aussi pour ses activités épuratoires, et qui constitue ainsi un filtre horizontal. L'eau circule ensuite un peu plus vite dans un méandre, moins profond mais avec davantage de surface de contact racinaire, avant d'arriver dans une zone plane de



Figure 11

Une zone humide peut être constituée en créant un véritable cocktail d'écosystèmes pour lutter contre un cocktail de polluants !

type **delta**, plantée d'îlots, pour se diriger vers un bassin aménagé en **herbier**, avant de passer à travers un **filtre à sable** et de rejoindre la rivière. L'ensemble de la zone est entouré d'une haie à baies

vives, de manière à attirer les oiseaux et de mares temporaires, ce qui permet de compléter la chaîne alimentaire, mettant ainsi en place une biodiversité riche et stable (Figure 12).

Figure 12

Schéma de principe de la zone libellule.

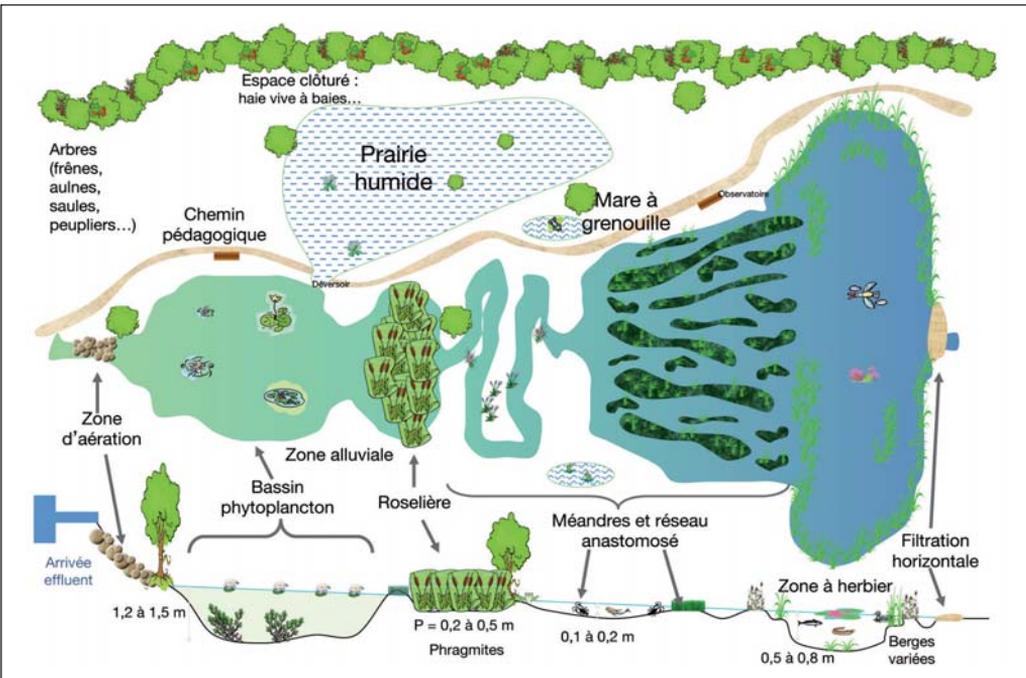




Figure 13

Vue aérienne de la Zone Libellule de Saint-Just (Hérault).

3.2.2. Suivi scientifique de la Zone Libellule de Saint-Just (34)

Ce schéma de principe a été mis en œuvre dans l'Hérault, dans la commune de Saint-Just (Figure 13). La Zone Libellule a été conçue avec dix zones d'habitats : la cascade d'aération, le bassin à microphytes (Encart « Le bassin à microphytes de la zone libellule de Saint-Just »), la rose-lière, les méandres, le delta, le bassin à herbiers, la zone de filtration granulaire, la prairie humide, la mare temporaire et la haie vive (voir la Figure 15). Les espèces végétales choisies, toutes impérativement des espèces locales, ont été réparties sur ces dix zones en faisant varier leur nombre selon la zone, afin d'en étudier les meilleures conditions d'efficacité épuratoire.

La Figure 15 retrace les étapes de construction de la zone et montre comment, en une année, la nature reconquiert rapidement l'ensemble du terrain grâce à l'apport d'eau et de sels minéraux.

Le suivi scientifique de cette zone, accompagné par différents organismes², a été étalé sur une durée de trois ans (2009-2012), avec les objectifs suivants :

- démontrer que la création de la Zone Libellule génère un **gain environnemental**, en suivant le développement écologique par des inventaires faune/flore et en effectuant des comparaisons avec un site témoin proche et comparable au terrain initial (prairie sèche) ;
- démontrer sa **capacité épuratoire**, en particulier concernant les micropolluants, en effectuant des analyses multizones sur les polluants et en

2. Composition du comité scientifique : Suez Environnement, Lyonnaise des Eaux, SIVOM de la Palus, Agence de l'eau Rhône Méditerranée et Corse, le Conseil Général du département de l'Hérault, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques, l'Irstea, Biotopie, HydroSciences Montpellier et le Laboratoire de Physico et Toxico-Chimie des systèmes naturels (LPTC) de Bordeaux.

LE BASSIN À MICROPHYTES DE LA ZONE LIBELLULE DE SAINT-JUST (Figure 14)

Configuration

- 2000 m²
- Profondeur : 1,50 m
- Pente de 60 % des berges
- Enrochement dans le bassin de déversement

Espèces végétales (exemple de plantes choisies pour les berges du ruisseau, à cause de leur capacité de maintien)

- roseaux (*Phragmites australis*)
- massette (*Typha latifolia*, *Typha augustifolia*)
- *Sparganium emersum*
- Glycérie aquatique (*Glyceria fluitans*)
- Millefeuille aquatique (*Myriophyllum spicatum*)
- Potamot (*Potamogeton pectinatus*)
- Iris des marais (*Iris pseudacorus*)



Figure 14

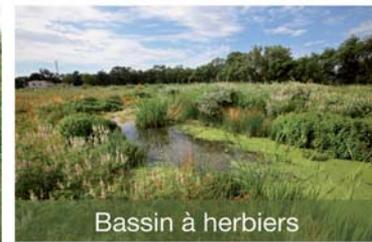
Détail du bassin à microphytes de la zone libellule de Saint-Just.



1 an



1 an



1 an



Figure 15

Étapes de construction de la Zone Libellule de Saint-Just en un an.

suivant les espèces bio-indicatrices.

La biodiversité (Figure 16)

L'évolution des plantes a été suivie à travers l'étude de nombreux paramètres. D'une année sur l'autre, on observe une variation des espèces et de leurs répartitions dans les différentes zones (Figure 17). On constate un développement rapide de la biodiversité du site, puisqu'on est passé de 38 espèces plantées à 112 en 2010, pour atteindre 136 espèces en 2011, à comparer au site témoin qui n'en contient que 23. Il en est de même pour l'évolution de la faune comme les odonates (libellules et demoiselles), typique des milieux humides, et les orthoptères (sauterelles, etc.) qui ont reconquis le terrain, avec certaines espèces d'intérêts et endémiques comme *Mertrioptera fedschenkoii azami* (Tableau 3).

La biodiversité microscopique planctonique, qui nous intéresse tout particulièrement car elle constitue le maillon écologique primordial, a quant



Figure 16

Biodiversité des plantes de la Zone Libellule de Saint-Just (Rosa canina, Silybum marianum, Typha angustifolia, ...)

à elle été multipliée par sept en deux ans, avec une diversité d'espèces spécifiques à chaque zone.

Bilan hydraulique

Un bilan hydraulique quantitatif a été réalisé sur toutes les zones (Figure 18). Il est à noter que de par la réduction des flux hydriques rejetés (dus à

Figure 17

Cartographies de la flore de 2009 à 2011 pour le suivi de la biodiversité des plantes de la Zone Libellule de Saint-Just.

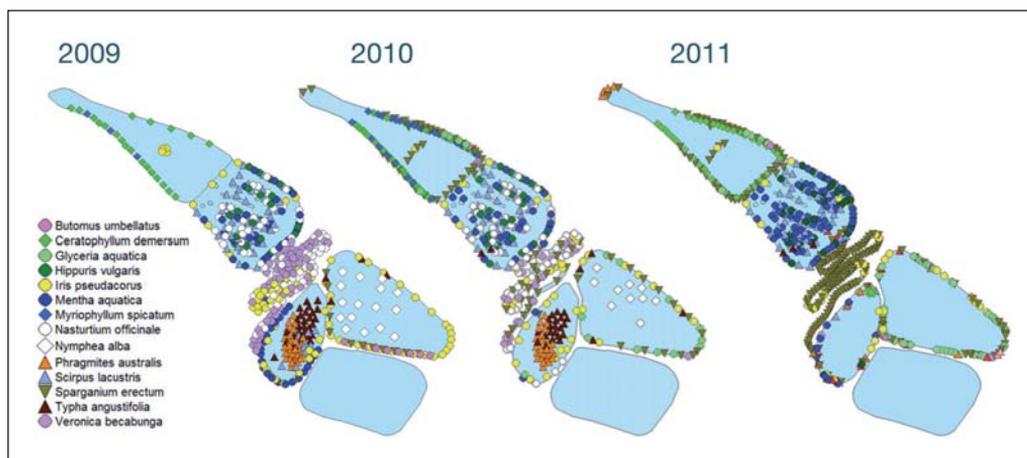


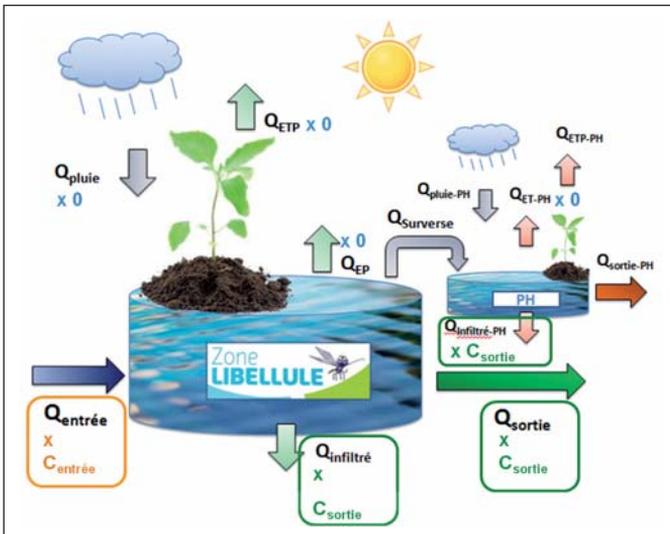
Tableau 3

Évolution de la biodiversité végétale et animale de la Zone Libellule de Saint-Just.

Indicateurs		2009	2010	2011	Site Témoin
Végétation aquatique		18	21	27	-
Végétation terrestre		20	93	114	23
Orthoptères		0	17	23	4
Odonates adultes		0	12	16	1
Plancton		8	38	54	-

Figure 18

Bilan hydraulique et quantitatif de la Zone Libellule de Saint-Just.



l'évaporation, l'évapotranspiration et l'infiltration), la Zone Libellule permet de minimiser significativement les flux de polluants (azote, phosphore, micropolluants) rejetés à la

rivière. En période d'étiage, cet effet est accentué, ce qui représente un atout supplémentaire pour la rivière à protéger dans une période de sensibilité accrue des écosystèmes aquatiques.

Suivi physico-chimique

Pour commencer, si l'on examine par exemple le suivi de la température (**Figure 19**), en particulier en hiver, on constate que les eaux sortant de la station d'épuration sont toujours un peu chaudes (environ 12 °C), mais qu'à la sortie de la Zone Libellule une remise à température de l'eau à la température de l'air permet un rejet à la rivière sans induire de stress thermique.

Le suivi physico-chimique montre que de l'entrée dans la Zone Libellule jusqu'à la

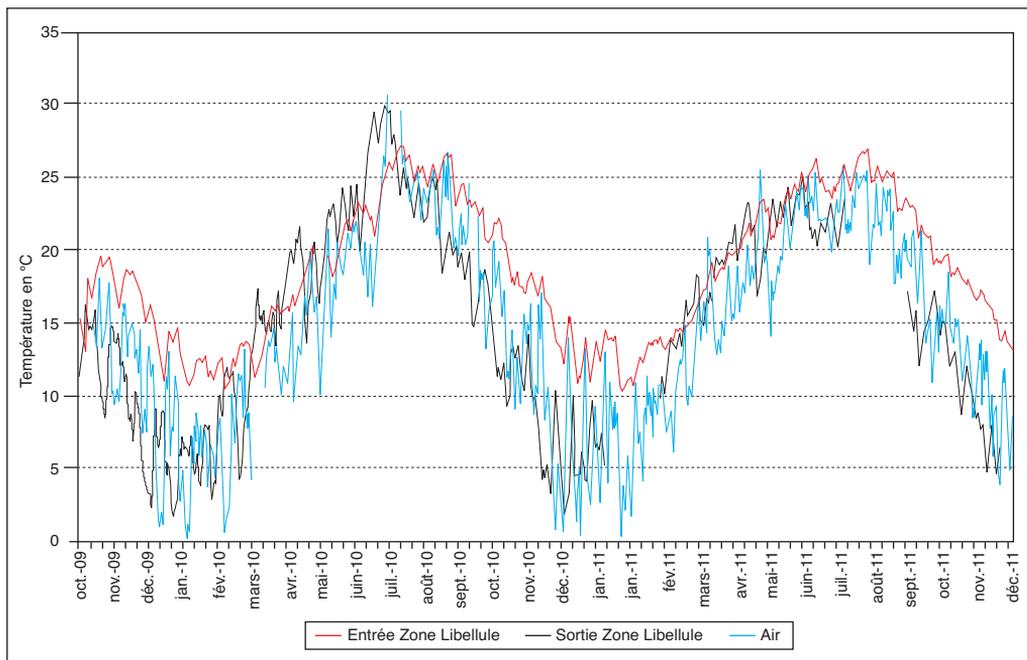


Figure 19

Évolution des températures journalières moyennes.

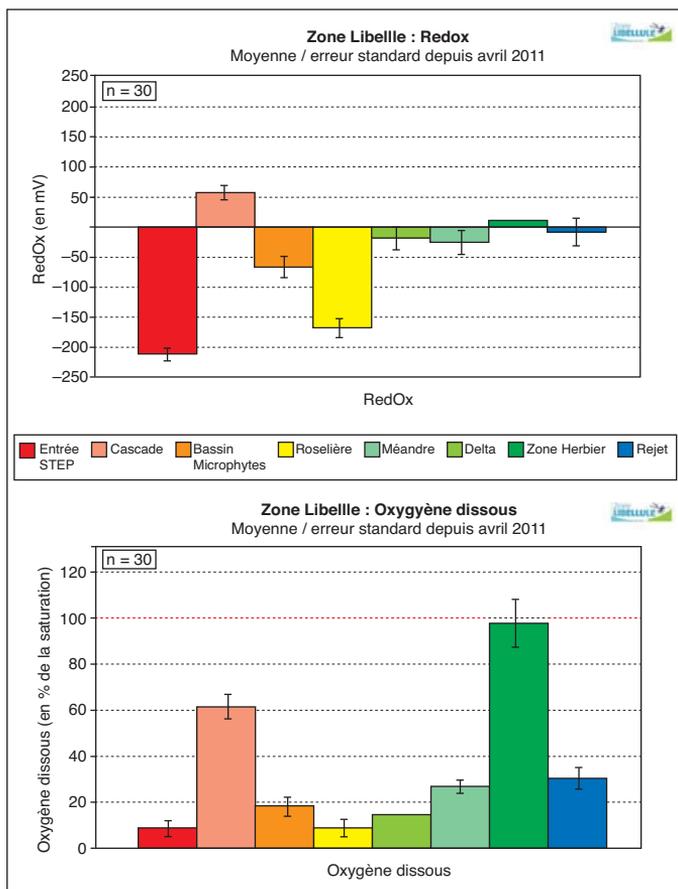


Figure 20

Suivi physico-chimique de l'entrée à la sortie de la Zone Libellule de Saint-Just.

L'eau passe dans des milieux à différents potentiels d'oxydo-réduction, pour aboutir à une ré-oxygénation finale du système.

sortie, l'eau circule à travers toute une série de milieux d'états d'oxydation différents ; ce sont ces différents potentiels d'oxydo-réduction qui conditionnent les biodisponibilités d'échanges entre les molécules dans les différentes zones (Figure 20). On assiste également à une ré-oxygénation complète du système par les plantes cératophylles au fond du bassin à herbiers, ce qui permet un rejet d'eau plus oxygénée et donc plus acceptable par le milieu que celle issue de la station d'épuration.

Suivi de l'azote et du phosphore

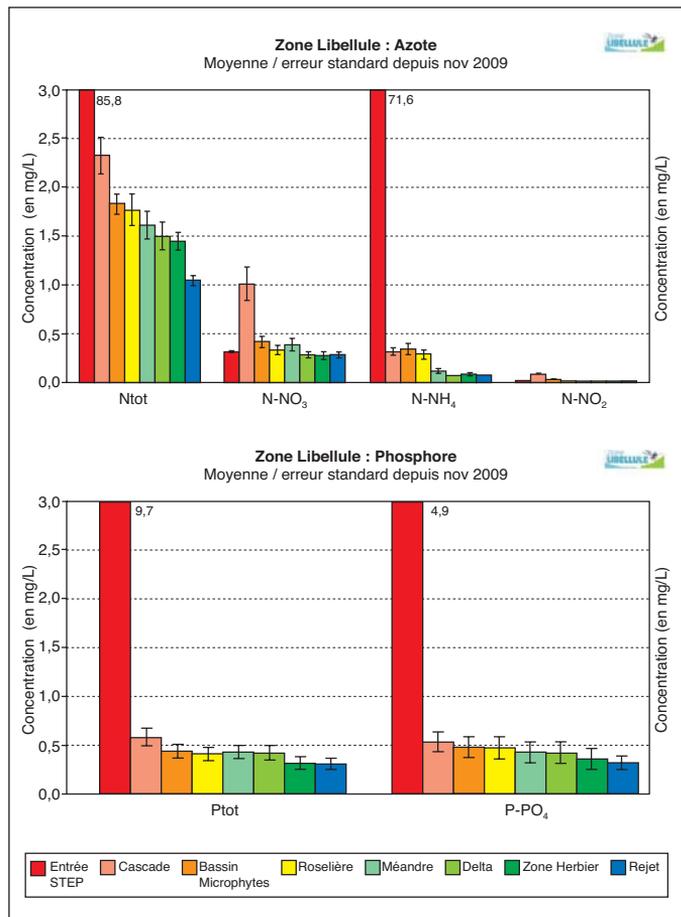
Un suivi a également été effectué sur l'ensemble des formes de l'azote (azote organique, nitrate, ammonium) et le phosphore (total sous forme phosphate) tout au long du circuit. On constate que l'azote et le phosphore (de manière moins importante) sont tous deux utilisés par les plantes (Figure 21).

Suivi bactériologique

L'évolution bactérienne a été étudiée par une analyse des concentrations des germes habituels (Figure 22) *Escheri-*

Figure 21

Suivi des concentrations en azote et phosphore (macropolluants), montrant la réabsorption de ces deux éléments par les plantes.



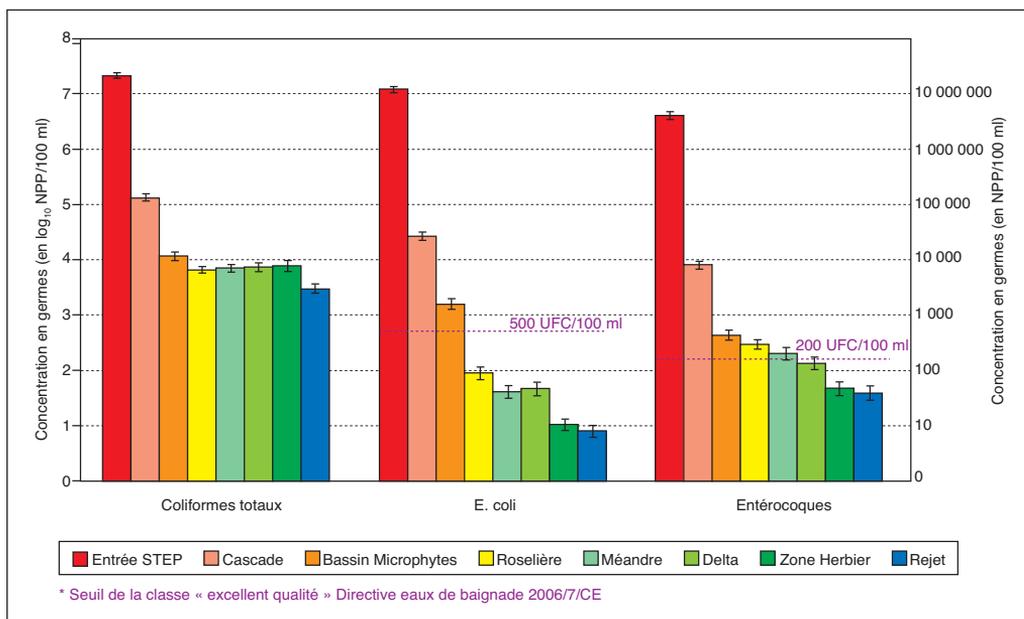


Figure 22

Suivi bactériologique de la Zone Libellule à l'aide d'indicateurs de contamination fécale. Moyenne/erreur standard depuis novembre 2009.

chia coli et Entérocoques qui sont bien éliminés, jusqu'à un taux même inférieur à celui considéré comme d'excellente qualité pour les eaux de baignade pour *E. Coli* (directive 2006) !

Suivi des micropolluants

Des campagnes d'analyses de micropolluants ont été menées au cours des trois années de suivi, ce qui a représenté un lourd travail d'analyse sur près de

CAMPAGNES D'ANALYSES DE MICROPOLLUANTS DE LA ZONE LIBELLULE DE SAINT-JUST

Prélèvements

- 3 campagnes en 2010 : avril-juin-octobre
- 10 bilans en 2012, en entrée/sortie de la zone, étalés sur 34 jours + 1 prélèvement en sortie de chaque compartiment

Molécules analysées

195 molécules recherchées

Familles de traceurs recherchés

Médicaments d'usage courant, bêta-bloquants, antibiotiques, antiviraux, pesticides, phtalates, alkylphénols.

200 molécules (*Encart : « Campagnes d'analyses de micropolluants de la Zone Libellule de Saint-Just »*). Alors que les hormones ont bien été dégradées par la station d'épuration qui fonctionne bien, on retrouve en revanche en sortie plus d'une centaine de molécules.

Pour chacune de ces familles de molécules, treize cam-

pagnes ont été effectuées pour déterminer les concentrations en polluants en entrée et en sortie de la Zone Libellule. Les graphes de la *Figure 23* indiquent les résultats obtenus pour cinq familles de molécules : les alkylphénols (perturbateurs endocriniens principalement issus des résidus de savons), les bêta-blo-

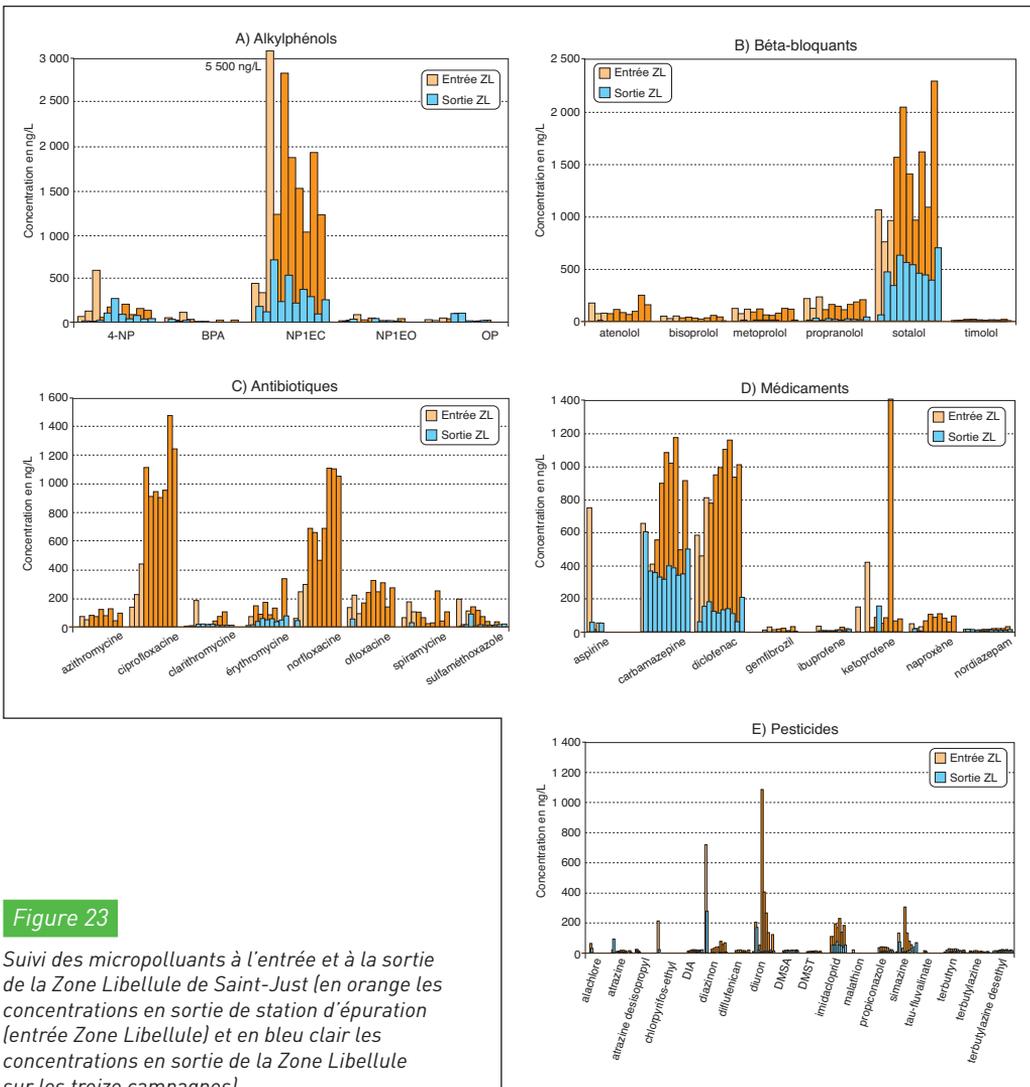


Figure 23

Suivi des micropolluants à l'entrée et à la sortie de la Zone Libellule de Saint-Just (en orange les concentrations en sortie de station d'épuration (entrée Zone Libellule) et en bleu clair les concentrations en sortie de la Zone Libellule sur les treize campagnes).

fréquemment utilisés dans les traitements quotidiens des maladies cardiovasculaires), les pesticides, les antibiotiques et les médicaments de manière générale.

On observe tout d'abord la présence en quantité très variable d'une centaine de molécules encore présentes dans le rejet de la station d'épuration. La variabilité notamment pour les médicaments (*Figure 23D*) dépend de l'état de santé de la population, tandis que la présence des pesticides dépend de l'usage domestique saisonnier (traitements insecticides et herbicides).

Les analyses montrent à quel point la dissémination de nos déchets médicamenteux est réelle, pourtant il n'existe pas encore de réglementation pour leurs rejets en sortie de station d'épuration. Leurs concentrations résultantes restent toutefois relativement faibles par rapport à notre consommation habituelle : si nous prenons l'exemple du paracétamol, pour une station fonctionnant correctement, on évalue en moyenne qu'il faudrait qu'un homme boive pendant trois mois l'eau traitée de cette station pour avaler l'équivalent de la quantité d'un comprimé antalgique par exemple. Mais qu'en est-il de l'effet sur une bactérie, une larve d'insecte ou un œuf de poisson, et de l'accumulation des concentrations dans la chaîne alimentaire ? Les effets de tailles et de nature de l'organisme vivant récepteur, ainsi que les relations entre la concentration de la molécule et ses effets, sont encore peu connus.

Les analyses en sortie de Zone Libellule font état d'une élimination significative de la carbamazépine, anti-épileptique difficilement dégradé par les stations d'épuration. Il en est de même pour le diclofénac, antidouleur et anti-inflammatoire dont la toxicité environnementale est importante ; on sait par exemple qu'il est la cause de la mortalité des vautours au Pakistan et en Afrique qui consommaient des carcasses de bétails traitées par le diclofénac d'usage vétérinaire. Cette molécule vient d'ailleurs d'être proposée pour rejoindre la liste des substances prioritaires. On observe également une bonne assimilation de l'isoprofène et du kétoprofène (anti-inflammatoires) par le cocktail d'écosystèmes (*Figure 23D*) de la Zone Libellule.

Examinons à présent le cas des pesticides (*Figure 23E*), pour lesquels il existe cette fois-ci une réglementation rigoureuse. On constate que ces toxiques ne proviennent pas seulement de flux de ruissellement de l'agriculture, mais que l'on en trouve des quantités non négligeables issues de l'usage domestique (jardins, potagers, ...), et qui se retrouvent dans les eaux usées.

En établissant le bilan global des trois ans d'analyses de micropolluants trouvés en sortie de station d'épuration (*Figure 24*), on observe que la plupart ont été éliminés par la Zone Libellule : la nature fait donc bien les choses, l'usine verte a bien fonctionné !

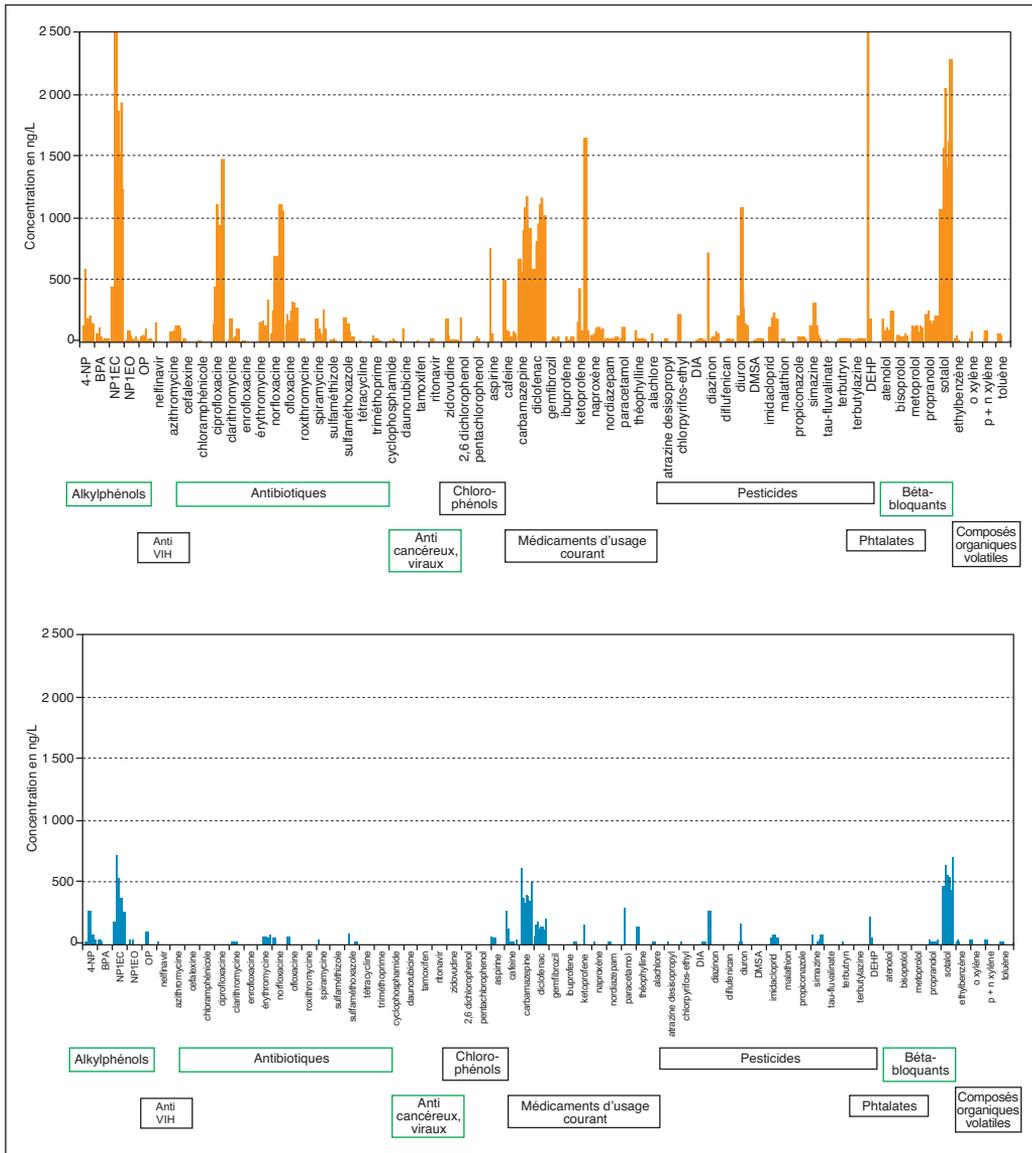


Figure 24

Bilan des micropolluants en entrée/sortie de la Zone Libellule de Saint-Just.

Chimie et nature, vers des usines vertes pour le bien-être de l'Homme

Nous ne pouvons plus nous passer des molécules mises à notre disposition par la chimie moderne pour notre confort quotidien et notre santé. Malheureusement, malgré les efforts et progrès réalisés pour les éliminer dans les eaux usées, de nombreux produits persistent à l'état résiduel et diffusent dans l'environnement, sans que l'on connaisse leurs effets sur le vivant à long terme. Les scientifiques et les organismes de tutelle de surveillance du milieu en ont pris conscience et cherchent des solutions.

Les résultats obtenus sur cette zone humide expérimentale montrent qu'à condition de préserver les milieux naturels adéquats ou en les reconstituant, la nature peut encore nous aider à dégrader ces polluants résiduels. Il est donc important de reconstituer ce type de zones humides qui peuvent également rendre de nombreux autres services « écosystémiques » comme la pollinisation, la production de nourriture primaire, le support à l'éducation ou encore la provision de biodiversité locale.

Pour que ces « usines vertes » assurent leur rôle efficacement, il reste encore beaucoup d'études à mener afin d'élucider le fonctionnement biochimique de ces écosystèmes et de développer ces procédés d'épuration biomimétiques. Il reste également des efforts importants à fournir pour adapter éventuellement le concept des Zone Libellule à des stations d'épuration industrielles et à d'autres types d'eaux.

Aujourd'hui, les obligations réglementaires se mettent en place en ce qui concerne les polluants émergents et une prochaine révision d'arrêté devrait obliger à placer derrière la sortie des stations d'épuration une « Zone de

Rejet Végétalisée » en vue de protéger par effet tampon le milieu récepteur de la station d'épuration. Associées à d'autres mesures comme le développement de molécules biodégradables et la limitation de l'usage de produits nocifs à la source, nous pourrions alors espérer atteindre l'objectif de rendre à la nature une eau de qualité suffisante pour qu'elle puisse à nouveau la purifier et nous permettre de la puiser une nouvelle fois pour nos usages et notre santé.

Pour atteindre ce résultat et parmi le cortège de solutions à mettre en place pour protéger notre environnement, la Zone Libellule est une manière innovante et efficace d'améliorer la qualité de l'eau et de contribuer à la protection de la biodiversité et à la beauté des paysages.

Crédits photographiques

Fig. 1 : d'après C. Lévêque,
Écosystèmes aquatiques,
Hachette, 1996. Adapté par É. Blin.
Fig. 2 : www.ademe.fr

Fig. 3 : US EPA Great Lakes
National Program Office.

Fig. 8 : Landes *et coll.* 2010.