



Persistance et dissémination de l'antibiorésistance dans les écosystèmes aquatiques

Depuis les années 2000, l'antibiorésistance est reconnue par l'OMS comme l'un des grands défis sanitaires du XXI^e siècle. L'utilisation massive d'antibiotiques, et/ou leur mésusage, en médecine humaine, vétérinaire, voire en agriculture, a favorisé l'émergence de bactéries multirésistantes aux antibiotiques. Ces résistances reposent le plus souvent sur des gènes spécifiques, qui peuvent circuler entre bactéries issues des compartiments humain, animal et environnemental. Ainsi, si cette problématique est historiquement abordée sous l'angle médical ou vétérinaire, elle doit être appréhendée dans le cadre du concept « Une seule santé » ou « *One Health* », en intégrant la dimension environnementale.

Les milieux aquatiques jouent en effet un rôle particulier dans cette dynamique. Ainsi, les rivières urbaines sont le siège, à la fois d'une contamination par des bactéries résistantes aux antibiotiques et des supports génétiques correspondants, et d'une contamination chimique (antibiotiques, éléments traces métalliques et pesticides). Ces différents apports s'expliquent majoritairement par les rejets des effluents traités de stations d'épuration, auxquels peuvent s'ajouter des apports agricoles dus aux ruissellements sur les sols. Les cours d'eau deviennent ainsi des milieux où des bactéries résistantes, majoritairement d'origine humaine, peuvent persister et/ou se disséminer, tout en impactant la faune sauvage.

En raison de la forte densité de population et de la concentration d'établissements de santé sur son territoire, l'hydrosystème de la Seine est particulièrement exposé à ces apports. Il constitue à ce titre un territoire pertinent pour étudier les facteurs favorables à la dissémination des marqueurs de l'antibiorésistance dans les milieux aquatiques.

Depuis 2009, le PIREN-Seine mène des recherches interdisciplinaires sur le devenir des marqueurs de l'antibiorésistance dans le bassin de la Seine. De leur persistance dans les milieux aquatiques à leur dissémination par les organismes aquatiques, ces travaux, inscrits dans l'approche « *One Health* », améliorent la compréhension des hydrosystèmes et éclairent leur gestion.



La phase 9 du PIREN-Seine

Depuis le 1^{er} janvier 2025, le PIREN-Seine est entré dans sa phase 9, qui s'achèvera le 31 décembre 2028. Pour répondre aux enjeux environnementaux du bassin de la Seine, le programme s'est organisé en 5 axes de recherche, qui ont chacun pour objectif de répondre aux attentes des acteurs de la gestion de l'eau face aux défis du changement climatique, de la transition écologique de la société et de l'avenir de la ressource. Un sixième axe se consacre aux transferts de connaissances et aux données. Les recherches sur l'antibiorésistance s'inscrivent dans cette dynamique interdisciplinaire, en mobilisant les compétences du programme pour mieux comprendre le devenir des marqueurs microbiens dans les milieux aquatiques et fournir des connaissances utiles à la gestion du bassin.

AXE 1 : Vulnérabilités des territoires face au changement climatique

AXE 2 : Les flux de matières et d'énergie dans les filières et leurs impacts territoriaux

AXE 3 : Histoire, paysage, territoires et restauration écologique

AXE 4 : Effets des contaminants sur la santé et les écosystèmes

AXE 5 : Dynamique des contaminants : de la compréhension des processus au métabolisme territorial

AXE 6 : Transfert des connaissances et gestion des données

De la persistance des marqueurs bactériens de l'antibiorésistance...

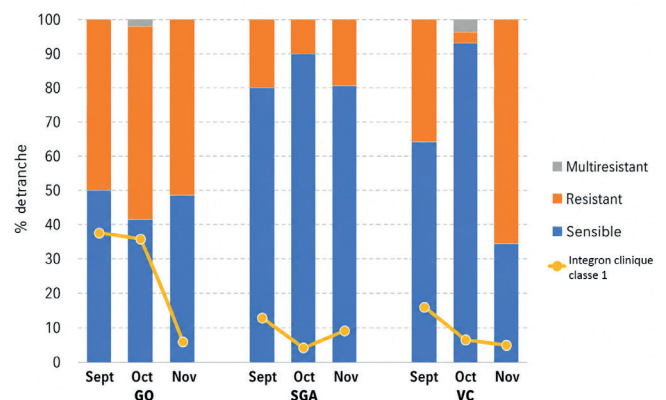
Dans le milieu aquatique, les biofilms et les sédiments constituent des niches écologiques importantes pour les communautés microbiennes. Ces dernières sont exposées à de faibles concentrations d'antibiotiques, mais également à de nombreux contaminants chimiques (métaux, pesticides et autres polluants organiques). Elles reçoivent par ailleurs un apport continu de bactéries antibiotiques d'origine humaine ou animale, ainsi que des gènes de résistance aux antibiotiques, tels que des intégrons cliniques.

Dans le bassin de l'Orge, trois sites localisés le long d'un gradient d'urbanisation ont été instrumentés avec des systèmes de collecte de sédiments de surface et des pièges à biofilms. Entre 2018 et 2019, trois campagnes de prélèvements de sédiments et de biofilms, âgés de 2 à 10 mois, ont été réalisées à Gué d'Orge (GO), site de référence amont, à proximité de la ville de Saint-Martin-de-Bréthencourt; à Saint-Germain-lès-Arpajon (SGA), situé en aval du rejet filtré de la station de traitement des eaux usées (STEU) d'Ollainville; et à Viry-Châtillon (VC) site aval, dans une zone fortement urbanisée après la confluence avec l'Yvette.

Sur tous les sites, les biofilms bactériens se sont développés sur les supports immergés, jusqu'à atteindre une densité bactérienne élevée et stable dès le deuxième mois. Des bactéries indicatrices de contamination fécale, comme *E. coli*, y sont systématiquement retrouvées, avec des concentrations plus élevées dans les secteurs les plus urbanisés. Toutefois, les analyses montrent que ces bactéries ne s'accumulent pas au cours du temps dans ces biofilms, suggérant plutôt un rôle de piégeage temporaire.

L'étude des profils phénotypiques de résistance à 16 antibiotiques d'intérêt clinique met en évidence un effet net de l'urbanisation. Sur le site aval (VC), le plus urbanisé, la proportion d'*E. coli* sensibles aux 16 antibiotiques est plus faible avec une proportion d'environ 63 %, alors que 17 % des bactéries résistent à au moins un antibiotique. Sur le site SGA, proche du rejet de la STEU, il n'y a pas d'augmentation de la proportion d'*E. coli* résistantes qui s'explique par l'élimination des bactéries fécales par la filtration du rejet. Sur le site amont, un épisode de contamination accidentelle, due à une rupture de canalisation consécutive à un événement orageux, a permis d'illustrer la sensibilité du système : la proportion de bactéries sensibles y chute à 47 %, correspondant à un apport anormal de bactéries fécales avant de remonter après réparation du réseau d'assainissement.

Une contamination des sédiments par *E. coli* est aussi observée avec une abondance plus élevée sur le site aval urbanisé et sur le site amont lors d'une rupture de canalisation des eaux usées. Ces résultats montrent ainsi l'importance des particules en suspension dans la dissémination des bactéries. Pour autant, la proportion de bactéries *E. coli* résistantes aux antibiotiques reste très faible (<1 %). Comme pour les biofilms, une baisse nette est observée sur le site amont après réparation d'une canalisation d'eaux usées, soulignant le rôle direct des infrastructures d'assainissement dans cette contamination.



Proportion d'*E. coli* résistante à au moins un antibiotique ; ou à 3 antibiotiques appartenant à des familles différentes (multirésistant) ; et porteurs d'un intégron clinique de classe 1, isolés de biofilms le long de l'Orge : GO (Gué d'Orge), Saint-Germain-lès-Arpajon (SGA) et Viry-Châtillon (VC).

Au sein de la population d'*E. coli*, la proportion d'isolats portant un intégron clinique, un élément génétique conférant une résistance multiple aux antibiotiques, est de 16 % dans les biofilms et de 9,2 % dans les sédiments. Dans ces derniers, 89 % des *E. coli* portant l'intégron *intI1* sont résistants à au moins un antibiotique, alors qu'en absence de ce gène seuls 24 % des isolats sont résistants à au moins un antibiotique. Ainsi, la présence de l'intégron *intI1* est associée à une augmentation de la résistance aux antibiotiques, et informative d'une origine principalement humaine de la contamination.

Les analyses chimiques réalisées mettent en évidence une contamination différenciée entre biofilms et sédiments, avec des concentrations en antibiotiques plus élevées dans les biofilms, alors que certaines molécules persistantes, des antibiotiques ou des pesticides, sont peu ou pas détectées dans l'eau. L'ensemble de ces résultats souligne que ces conditions peuvent favoriser la sélection et le maintien de bactéries résistantes dans le milieu.

Ces résultats montrent que dans des environnements aquatiques fortement urbanisés, les biofilms et les sédiments constituent des zones de piégeage d'*E. coli* résistantes aux antibiotiques, et d'antibiotiques persistants dans ces environnements. Pour autant, la proportion d'*E. coli* résistantes aux antibiotiques ne persiste pas longtemps sous leur forme cultivable.

Au-delà de ces compartiments, se pose alors la question du rôle des organismes aquatiques, et notamment de l'ichtyofaune, dans le transport, le stockage et la dissémination de ces bactéries et de leurs gènes de résistance à l'échelle du réseau hydrographique.

... à leur dissémination par l'ichtyofaune dans le réseau hydrographique

Au-delà de leur piégeage dans différents compartiments du milieu, les bactéries résistantes aux antibiotiques et les gènes correspondants peuvent également être transportés et dispersés. Si la modélisation des coliformes développée au sein du PIREN-Seine permet d'appréhender le devenir spatial de cette contamination le long des cours d'eau, le rôle potentiel des organismes aquatiques dans la dissémination est quant à lui peu renseigné.

Les poissons interagissent en permanence avec leur environnement et sont en contact avec des bactéries présentes dans l'eau, les sédiments ou les biofilms. Les microbiotes de leur tégument cutané ou de leur tube digestif sont susceptibles d'abriter des bactéries porteuses de gènes de résistance. Les travaux menés dans le cadre du PIREN-Seine ont ainsi exploré le rôle potentiel de l'ichtyofaune dans la dispersion de bactéries résistantes et des gènes correspondants. Une expérimentation *in situ* a été conduite dans l'Orge en 2021, en encageant des poissons sauvages en amont et en aval d'un rejet filtré de la STEU, limitant fortement l'apport de bactéries fécales. Cette configuration permet d'isoler l'effet d'une contamination chimique, notamment par des résidus d'antibiotiques présents dans les rejets filtrés d'une STEU sur l'émergence de l'antibiorésistance au sein des microbiotes cutané et digestif des poissons.

Au total, 42 individus ont été capturés puis répartis entre une condition non exposée en amont (19 poissons) et une condition exposée en aval (18 poissons), complétées par quelques individus analysés directement après capture. Les poissons ont été maintenus en cage pendant 7 et 20 jours, permettant de suivre l'évolution de leur microbiote en fonction de l'exposition.

Les résultats montrent que, malgré une exposition nettement plus élevée aux antibiotiques en aval, jusqu'à 10 à 200 fois plus élevée selon les molécules, les tissus des poissons ne bioaccumulent pas les antibiotiques. Aucune augmentation significative de la quantité de gènes d'antibiorésistance n'est observée dans le microbiote des poissons, que ce soit au niveau du tube digestif ou des téguments cutanés. De même, aucune augmentation de la proportion de bactéries résistantes aux antibiotiques n'est observée au

sein de populations bactériennes d'intérêt clinique présentes dans le microbiote des poissons, notamment les genres *Pseudomonas* et *Aeromonas*, ainsi que les *Enterobacterales*. Ces résultats s'expliquent par le fait que les concentrations en antibiotiques des rejets filtrés de la STEU d'Ollainville sont inférieures à celles requises (de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-6}) pour sélectionner des bactéries résistantes au sein du microbiote des poissons.

En revanche, des modifications de la structure des communautés bactériennes sont mises en évidence, en particulier au niveau du microbiote cutané. Une augmentation de certains groupes bactériens, notamment au sein des *Gammaproteobacteria*, incluant des genres d'intérêt clinique tels que *Pseudomonas* ou *Aeromonas*, a été observée. Par ailleurs, parmi les bactéries cultivables, environ 50 % des isolats sont résistants à au moins un antibiotique chez les poissons non exposés, proportion pouvant atteindre plus de 60 % chez les poissons exposés. Ces résultats s'expliquent par le fait que les concentrations en antibiotiques du rejet filtré de la STEU sont insuffisantes pour sélectionner des bactéries résistantes.

Enfin, des bactéries résistantes, y compris à plusieurs antibiotiques, sont détectées dans le microbiote des poissons, bien que ces cas restent rares, représentant moins de 1 % des isolats analysés dans la collection totale. Ces résultats indiquent que les poissons peuvent héberger et transporter des bactéries d'intérêt clinique, indépendamment d'une exposition ponctuelle.

Dans ce contexte, le microbiote des poissons apparaît moins comme un environnement favorable à l'amplification de l'antibiorésistance que comme un vecteur potentiel de dispersion. En se déplaçant au sein du réseau hydrographique, ils peuvent contribuer à redistribuer des bactéries et des gènes de résistance entre différents compartiments et différentes zones du bassin.

Ces travaux invitent ainsi à considérer le rôle du vivant dans la circulation de l'antibiorésistance, en complément des processus purement hydrologiques, et à intégrer ces dynamiques dans une approche *One Health* globale.

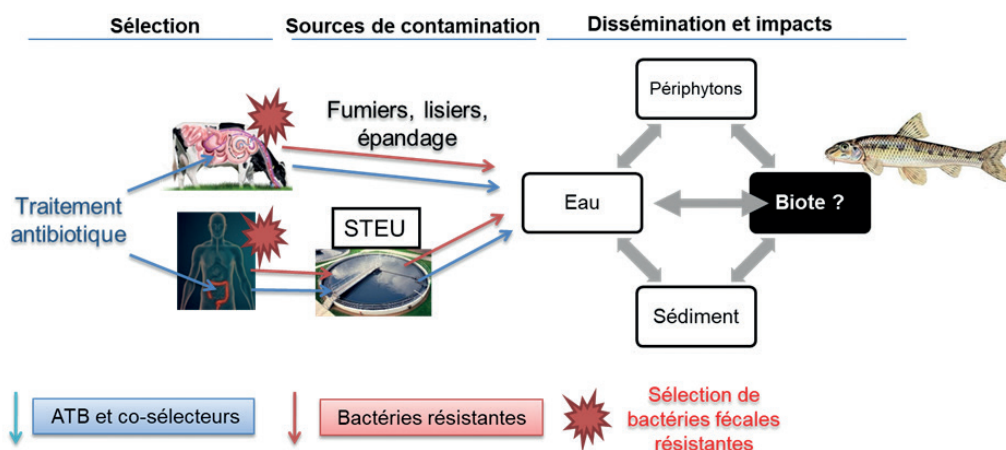


Schéma conceptuel sur la dissémination des bactéries résistantes aux antibiotiques et des contaminants (antibiotiques (ATB) et co-sélecteurs) dans les rivières. (E. Marchand, 2023)

Limites actuelles et enjeux pour la gestion des milieux aquatiques

Les recherches menées ces dernières années ont permis de mieux documenter la présence de bactéries résistantes aux antibiotiques et des gènes associés dans les milieux aquatiques, en identifiant différents compartiments susceptibles de jouer un rôle dans leur stockage et leur dissémination. Néanmoins, de nombreuses incertitudes demeurent quant à l'ampleur réelle de ces processus et à leurs implications pour la gestion des milieux.

Les relations entre les sources de contamination, les réservoirs environnementaux et les mécanismes de dissémination restent encore difficiles à quantifier précisément. Les dynamiques observées résultent d'interactions complexes entre pressions anthropiques, processus écologiques et circulation hydrologique. Les transferts horizontaux de gènes entre bactéries, l'influence des biofilms, des sédiments ou encore des mélanges de contaminants constituent autant de facteurs susceptibles de moduler ces dynamiques. Aujourd'hui, en l'absence d'une caractérisation de l'exposition humaine ou animale, il n'est pas possible d'évaluer les risques sanitaires ou écologiques à partir de la seule présence de marqueurs microbiens de l'antibiorésistance dans l'environnement.

Mieux intégrer l'antibiorésistance dans la gestion de l'eau

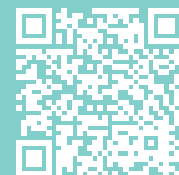
Ces incertitudes ne remettent cependant pas en cause l'intérêt d'une approche environnementale de l'antibiorésistance. Les milieux aquatiques constituent un maillon essentiel dans la circulation des bactéries résistantes et de leurs gènes, et leur étude contribue à une meilleure compréhension des dynamiques globales de ces résistances. Le développement d'une surveillance environnementale fondée sur des indicateurs microbiens, combinée au suivi des pressions exercées sur les milieux, pourrait ainsi renforcer les dispositifs existants de connaissance et d'aide à la décision.

Pour les gestionnaires du bassin, ces travaux soulignent l'importance d'une approche intégrée reliant santé humaine, santé animale et santé des écosystèmes. Inscrite dans la démarche « Une seule santé », cette vision permet de mieux prendre en compte les interactions entre les différents compartiments du système et d'orienter les actions visant à limiter les sources de contamination, préserver le bon fonctionnement des milieux aquatiques et réduire les conditions favorables à la dissémination de l'antibiorésistance.



Pour plus d'informations, rendez-vous sur www.piren-seine.fr

Contact :
francois.mercier
@arceau-idf.fr



Crédits photos : Etienne Marchand
Edition : ARCEAU-Idf 2026 - www.arceau-idf.fr
Création graphique : id bleue (Sablé)
www.idbleue.com
ISSN : 2610-0916

Sources bibliographiques : https://piren-seine.fr/publications/fiches_4_pages/persistence_et_dissemination_de_lantibioresistance_dans_les_0

Le **PIREN-Seine** est un programme de recherche interdisciplinaire dont l'objectif est de développer une vision d'ensemble du fonctionnement du bassin versant de la Seine et de la société humaine qui l'investit, pour permettre une meilleure gestion qualitative et quantitative de la ressource en eau.

Cette fiche est éditée par la *Cellule transfert* du PIREN-Seine, animée par l'association ARCEAU-IDF.

Les partenaires opérationnels de la phase 9 du PIREN-Seine



Les partenaires scientifiques de la phase 9 du PIREN-Seine

