

# IMPACT DES REJETS DE CHLORE EN MER

Dossier de presse



24 Juin 2021 - 17h30

Centre Culturel Marcel Pagnol - Fos-sur-Mer



## CONTEXTE ET OBJECTIFS

La chloration de l'eau de mer reste considérée comme l'un des moyens les plus efficaces et les moins coûteux pour contrôler la formation de biofilms ou le développement de moules dans les conduites industrielles (micro et macro-fouling). Ce procédé est employé par de nombreux sites industriels dans le monde afin d'utiliser ces eaux à des fins de régulation thermique (refroidissement, réchauffement), ou à des fins de production d'eau destinée à la consommation humaine. Ce procédé de chloration est également autorisé pour traiter les eaux de ballast des navires et éviter la dissémination de micro-organismes.

Suite à ce traitement, une partie du chlore est rejetée dans le milieu marin et réagit avec la matière organique selon une chimie complexe, donnant naissance à de nombreux composés – les sous-produits de chloration – reconnus comme toxiques pour l'environnement et l'être humain.

Le Golfe de Fos compte plusieurs sources d'eaux chlorées qui ressortent froides ou chaudes selon la nature de l'activité industrielle : terminaux méthaniers, centrales de production d'électricité, sidérurgie et pétrochimie.

Bien que les concentrations en chlore soient faibles aux exutoires, les débits des rejets peuvent être toutefois très importants (de l'ordre de 10 à 60 000 m<sup>3</sup>/h par site). Se pose alors la question du cumul des émissions et de l'effet sur l'écosystème, d'autant que ces rejets de chlore en mer produisent de nombreux sous-produits potentiellement persistants, mutagènes ou carcinogènes pour les animaux et les humains.

Ces rejets de chlore dans l'eau de mer aboutissent à la production de plusieurs sous-produits bromés. Ces derniers sont, pour la plupart, soupçonnés ou reconnus toxiques, avec un impact sur la faune et la flore marine en fonction des teneurs présentes. Les sous-produits de chloration et le chlore libre ont notamment une toxicité avérée sur la vie marine : des niveaux de 0,2 mg/l (à peine supérieurs aux niveaux d'autorisation) entraînent la disparition de la vie bactérienne.

Mais la littérature scientifique fournit peu de données sur la dynamique chimique de ces composés dans les eaux côtières et, souvent, des analogies sont faites avec ce qui est observé pour les molécules chlorées dans les eaux douces.

Pourtant, il est indispensable de connaître le comportement et le devenir de ces composés pour s'assurer de l'efficacité de ces procédés tout en minimisant leurs impacts sur l'environnement et la santé.

En 2011, parallèlement au lancement du processus de consultation des terminaux méthaniers Fos Faster et Fos Tonkin, l'Institut a démarré une thématique d'étude portant sur les rejets de chlore en mer, suivie en 2013 de mesures des sous-produits de chloration (SPC) dans le cadre de l'étude de contamination des congrès du Golfe de Fos. Il s'agissait de mieux connaître l'influence de ces émissions de chlore sur les écosystèmes et d'inscrire cette connaissance dans le cadre de la réduction des quantités rejetées. Le territoire disposait alors, en 2015, d'une cartographie chimique des contaminations et d'une connaissance plus précise de la dynamique des sous-produits de chloration, polluants à fort enjeu écotoxicologique.

Les résultats ont identifié treize espèces de sous-produits de chloration – dont le bromoforme – et ont montré que certains de ces composés étaient dispersés et présents à des niveaux mesurables dans l'ensemble du golfe. Il a aussi été constaté que le bromoforme pouvait se diffuser assez loin dans le Golfe de Fos à partir de son point de rejet.

Si les niveaux rencontrés ne sont pas directement dangereux pour la santé humaine, ils pourraient avoir un effet néfaste sur l'écosystème.

A la suite de ces premières études, le projet de recherche FOS-SEA, soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche, la Région Sud Provence-Alpes-Côte-d'Azur, et mis en œuvre par plusieurs laboratoires universitaires (le Laboratoire Chimie de l'Environnement - LCE, l'Institut Méditerranéen d'Océanologie - M.I.O. et l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale - IMBE), l'Institut Ecocitoyen et les partenaires industriels (E.D.F et ELENGY), vise à déterminer les effets des rejets d'eaux chlorées dans le Golfe de Fos :

- identifier et quantifier les différents composés bromés et chlorobromés qui peuvent être présents et/ou générés durant les procédés de chloration (dans l'eau, l'air, ainsi que dans les poissons, les oursins et les moules pêchés et ramassés pour la consommation humaine),
- déterminer les schémas réactionnels de leur formation et de leur devenir,
- étudier leur transfert (eau, air, mollusques et poissons, sédiments) et leur dissémination (effet de dilution, hydrolyse, photolyse et/ou persistance),
- observer leur toxicité globale ainsi que celle de leurs produits de transformation,
- évaluer leurs impacts potentiels, notamment écotoxicologiques sur le phytoplancton et un organisme modèle (larves d'oursins)



## UNE RECHERCHE TERRITORIALISÉE POUR ADAPTER LE SUIVI DE L'ESPACE MARIN

Au moyen d'analyses de l'air, de l'eau, des effets sur la faune et la flore marines, cette vaste étude permet de préciser le risque de ces rejets sur la vie du golfe, mais également de trouver des solutions pour réduire les impacts.

D'un coût global de 2,8 millions d'euros, l'étude a duré 3 ans et s'articule autour de 7 campagnes de terrain dans le Golfe de Fos avec :

- prélèvements d'eau de mer et mesures des paramètres descriptifs et de la courantométrie,
  - prélèvements d'air,
  - pose de capteurs passifs,
  - prélèvements de sédiments,
  - pêche de biota pour analyses (congres, oursins, moules), et études écotoxicologiques
- Des essais toxicologiques ont été réalisés pour en savoir plus sur les effets sanitaires éventuels des sous-produits de chloration (SPC).

### Le consortium de recherche



Le Laboratoire de Chimie de l'Environnement (LCE/AMU) coordonne le projet et assure l'identification et la quantification des composés bromés dans l'eau de mer et dans l'air, par différents protocoles analytiques basés sur l'analyse chromatographique liquide et gazeuse couplée à différents types de détecteurs utilisés seuls ou en tandem (capture d'électrons, spectromètre de masse, fluorescence, spectromètre UV-visible).

- | *Prélèvements (eaux, sédiments, air).*
- | *Analyses chimiques (eaux, sédiments, air, biota).*
- | *Déploiement et analyse de capteurs passifs.*
- | *Mesures atmosphériques (COV).*
- | *Constantes thermodynamiques.*
- | *Modélisation.*



L'Institut Ecocitoyen, dont les compétences et les connaissances concernent les aspects scientifiques, la communication et l'implication locale, a été notamment chargé d'organiser des campagnes de prélèvements et mesures en mer, de coordonner et interpréter les résultats de bioaccumulation en milieu marin, d'organiser la communication grand public (vidéo, colloques, médias) et d'établir des relations d'échange avec les acteurs locaux, industriels, collectivités, associations, population, services de l'État. Un volet modélisation hydraulique et courantologie mené avec le LCE permet de prendre en compte les effets potentiels de dilution et de dissémination liés aux courants et à la force et l'orientation des vents.

| Campagnes en mer dans l'ensemble du Golfe de Fos.

| Courantologie.

| Mesures CTD salinité, température, profondeur, O2 dissous, chlorophylle-a.

| Prélèvements poissons, moules & oursins, bioaccumulation.

| Observations citoyennes VOCE diversité marine, salinité.

| Communication (vidéo, colloque).



L'équipe Ecologie et Biologie Marines du laboratoire PROTEE (aujourd'hui M.I.O.) de l'Université de Toulon a étudié l'impact de ces molécules sur le plancton : impact écotoxicologique de quelques composés bromés représentatifs de la contamination du Golfe de Fos et écologiquement pertinents sur les micro-organismes planctoniques, en terme de diversité et d'abondance et sur les oursins (*Paracentrotus lividus*) notamment vis-à-vis de la toxicité de ces composés relations dose-effet, individuellement et combinés effet « cocktail », sur les larves pluteus.

| Diversité planctonique.

| Toxicologie sur plancton.

| Toxicologie in-situ et en laboratoire sur oursins.



EDF - Recherche et développement :

| Analyses chimiques – paramètres globaux.



L'équipe Toxicologie et santé Environnementale de l'IMBE/AMU a étudié la toxicité des molécules concernées : identifier des réponses biologiques face aux polluants, notamment aux mutagènes environnementaux et aux nouveaux contaminants. Basés sur une approche « multimarqueurs » moléculaires, cellulaires, histologiques et physiologiques, les travaux s'appuient sur des organismes modèles allant de la bactérie jusqu'aux vertébrés en passant par les invertébrés en évaluant la génotoxicité de polluants par la mise au point, l'adaptation et l'utilisation de différents tests Ames, COMET, micronoyaux.

| Toxicité globale eaux, sédiments, moules.

| Toxicité ciblée sur molécules identifiées et sur mélange effet « cocktail ».



La société Elengy, gestionnaire du terminal méthanier de Fos Cavaou a accompagné le projet en mettant à disposition certaines données d'exploitation et en donnant accès à son site de Fos-Cavaou pour les prélèvements d'air et d'eau.

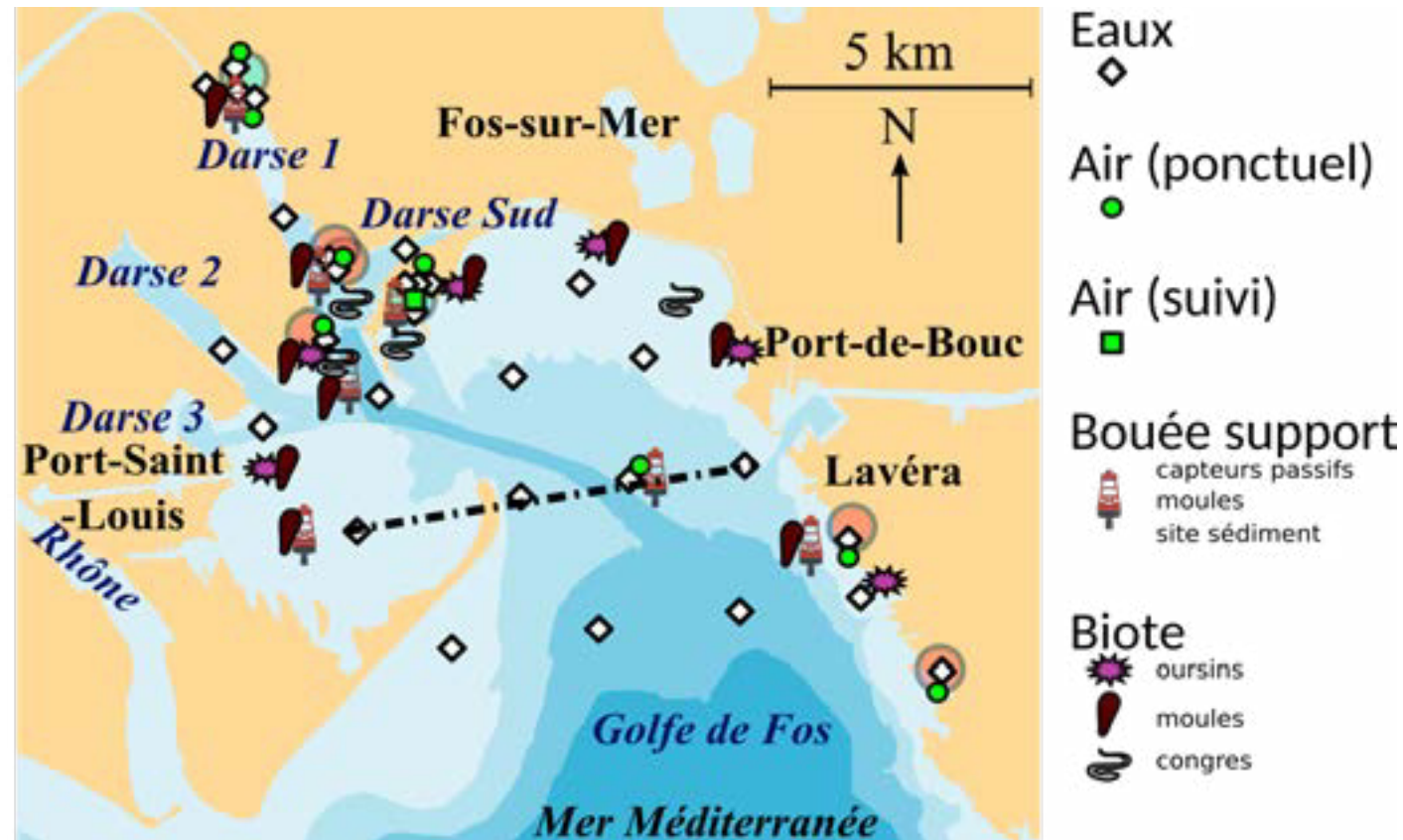
| Site industriel d'expérimentation.

Ce consortium représente une trentaine de scientifiques, deux travaux de thèse, un post-doctorat, et près de 10 stagiaires. Le projet a également impliqué des pilotes de navires, ainsi que des citoyens volontaires de Fos-sur-Mer, Port-de-Bouc, Martigues et Port-Saint-Louis-du-Rhône, notamment.

## Un programme d'échantillonnage et d'analyses sans précédent

Dans le cadre du programme d'échantillonnage, 7 campagnes de prélèvement d'eau et d'air ont été réalisées depuis le début du projet, dont 3 se sont déroulées en 2018. Elles représentent, chacune, une situation saisonnière particulière, afin d'acquérir des données représentatives des différents contextes climatologiques sur l'année.

Les sous-produits de chloration ont été recherchés dans l'air grâce à une analyse en continu, mobilisant la plateforme de recherche MASSALYA, sur le site du terminal méthanier d'Elengy au Cavaou, sur des périodes qui englobent les différentes campagnes. Des prélèvements ponctuels à l'aide de canisters complètent le dispositif à différents endroits du golfe, ainsi qu'au niveau des exutoires.



L'eau a été prélevée sur 26 points du Golfe de Fos, en surface et jusqu'à 7 mètres de profondeur, pour analyser sa composition chimique (nitrates, phosphates, SPC, chlore total...), et connaître l'abondance et la diversité planctonique. A chacun de ces sites, la courantométrie (système acoustique doppler) et les paramètres hydrologiques de l'eau ont été mesurés. Des capteurs passifs ont été installés sur 8 emplacements, à proximité desquels des sédiments ont été prélevés. S'ajoutent des prélèvements totalisant plus de 600 moules, 300 oursins et 24 congres.

Dans une approche de recherche participative, les volontaires de l'Observatoire Citoyen de l'Environnement (VOCE) contribuent aux relevés de biodiversité et aux mesures physico-chimiques du milieu marin : 12 sorties en 18 mois pour des mesures physico-chimiques sur toute la largeur du Golfe, et des observations de biodiversité sous-marine sur 3 sites.

Le volet écotoxicologique du projet se fonde sur une dizaine de campagnes régulières pour prélever des larves d'oursins et réaliser des tests écotoxicologiques.

Les études de toxicité (génotoxicité, mutagénèse) permettront d'établir si la nature et les niveaux d'exposition qui seront relevés sur site et dans les produits de consommation (poissons, oursins, moules) induisent un risque sanitaire pour les consommateurs et pour l'environnement.

## L'Observatoire Citoyen de l'Environnement : noyau de la recherche participative.

L'Observatoire Citoyen de l'Environnement VOCE a été fondé en 2012 au sein de l'Institut Ecocitoyen pour répondre à une demande croissante sur les impacts écologiques et sanitaires des zones industrielles du Golfe de Fos et de l'Étang-de-Berre, en intégrant la population directement dans une réelle approche scientifique. Cette démarche permet de disposer d'une source informative mais également de fonder des échanges sur un socle de confiance entre science et information.

Cet observatoire propose aux citoyens de suivre leur environnement en participant directement à certaines études conduites par l'Institut Ecocitoyen ou même en proposant des suivis des milieux.

Ces études, basées sur des protocoles scientifiques réalisés en étroite collaboration entre les chercheurs de l'Institut et les volontaires intègrent, au moins à une étape, l'action des citoyens dans l'acquisition de données. Les volontaires peuvent ainsi être amenés à intervenir lors des phases préliminaires (reconnaitances de terrain, historiques d'usages, choix d'espèces...) et des phases opérationnelles (réalisations de prélèvements, suivis de paramètres,...). L'intérêt mutuel est ainsi de répondre à un questionnement précis à l'aide de nos connaissances scientifiques en façonnant des études scientifiques d'une ampleur multipliée par l'intervention des volontaires.

L'Observatoire VOCE a été mis en œuvre avec le soutien du Ministère en charge de l'Ecologie et du Développement Durable, et labellisé par la commission pluraliste REPERE sur les sciences participatives. Il assure la formation des volontaires, la logistique, la réalisation des protocoles de mesure et l'interprétation des résultats.

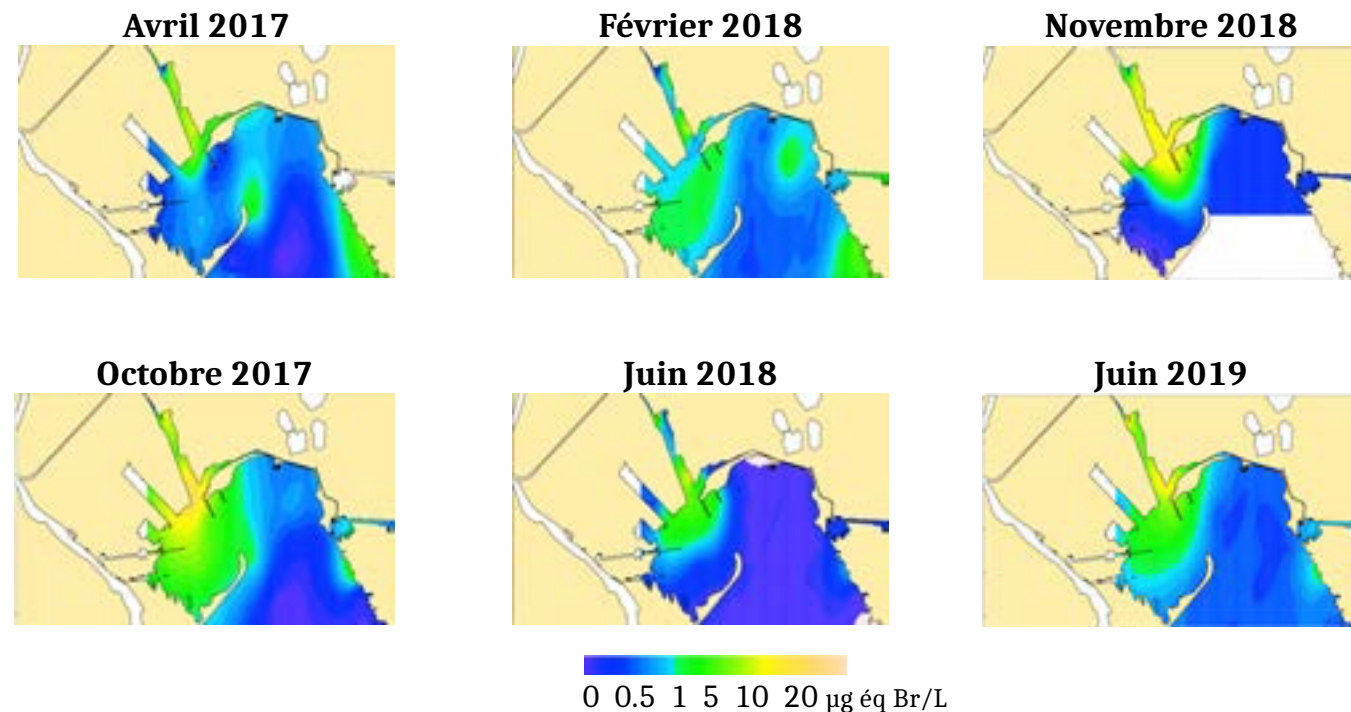
Afin de réaliser leurs missions et d'homogénéiser les informations recueillies, les volontaires bénéficient de formations établies en lien avec les membres du Conseil Scientifique de l'Institut Ecocitoyen. Ces formations comprennent deux éléments principaux : une explication de l'étude, de son objet, des éventuels polluants observés... et une formation par l'Institut Ecocitoyen à l'application du protocole établi par le scientifique. Ces formations sont conçues pour être accessibles à tous, sans conditions de connaissances préalables.



## RÉSULTATS

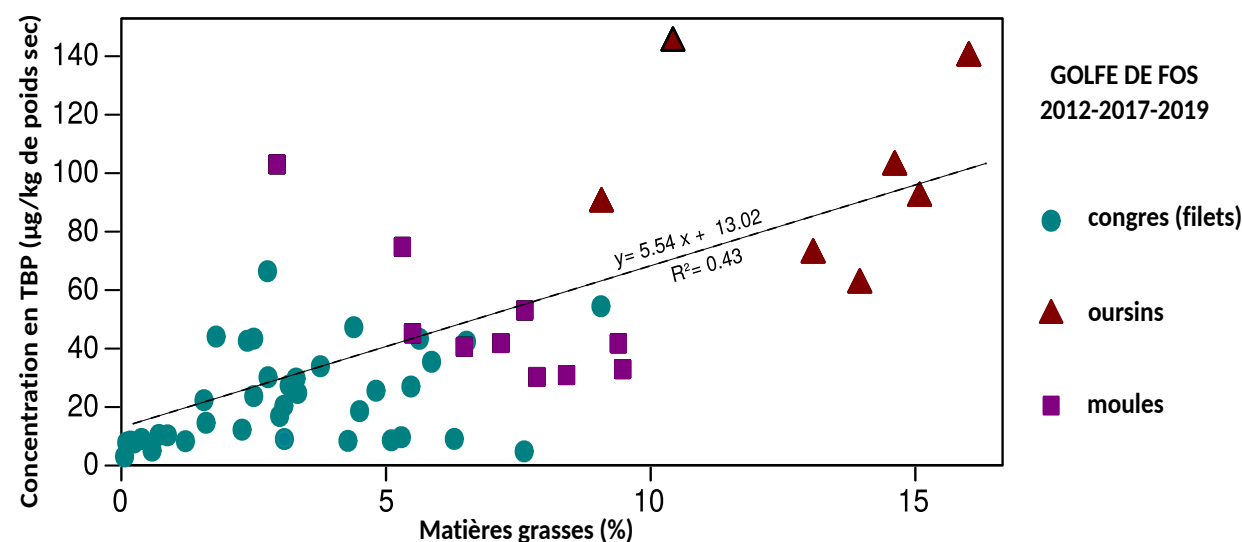
### Présence de sous-produits de chloration dans l'eau et dans l'air

Des sous-produits de chloration (SPC) ont été mesurés dans l'ensemble du golfe, notamment dans le port et l'anse de Carteau, avec un net impact de la météo sur les concentrations rencontrées.



### Accumulation dans les organismes marins

Le tribromophénol est peu volatil et hydrophobe. Ces deux caractères expliquent qu'il s'accumule au sein de la matière grasse des organismes étudiés, quelle que soit l'espèce.



La présence de ce type de produit dans l'environnement et au sein de certaines espèces conduit à chercher à déterminer leur toxicité pour le milieu.

### Ecotoxicité des sous-produits de chloration : effets sur le plancton

Au terme d'expériences consistant à exposer le plancton à des concentrations similaires à celles mesurées dans le golfe, le risque de toxicité aiguë à court terme est évalué comme étant très faible.

On manque encore en revanche de recul pour se prononcer sur l'effet de l'exposition à plus long terme.

Cependant, la connaissance scientifique doit prendre en compte l'effet de ces rejets de façon plus exhaustive, pour mieux comprendre l'influence de la température, de la salinité, des ressources nutritives, et des autres contaminants organiques et inorganiques.



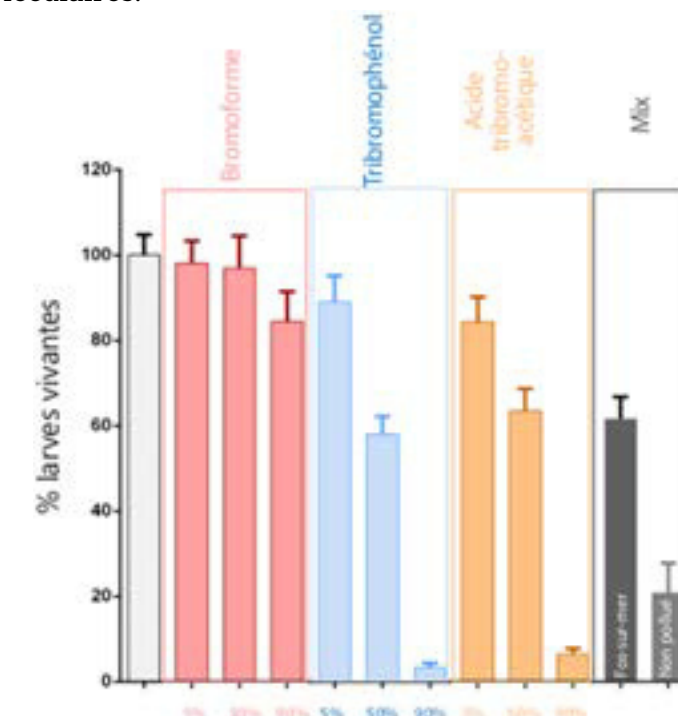
### Toxicité des sous-produits de chloration sur un modèle animal plus complexe

La toxicité des sous-produits de chloration a été mesurée sur des oursins, en exposant les larves à des mélanges de sous-produits de chloration dont la composition et les concentrations variaient.

Bien qu'il y ait besoin de très fortes concentrations en sous-produits de chloration pour induire un effet (très supérieures aux concentrations environnementales), on observe un effet synergique d'un mélange de sous-produits de chloration. On peut parler ici d'effet « cocktail » des sous-produits de chloration, dans la mesure où certaines combinaisons de ces composés, à faible dose, s'avèrent plus toxiques que l'addition de leurs effets.

Par ailleurs, les travaux montrent que les oursins du Golfe de Fos ont développé une forme de résistance à ces polluants : la dose létale de ces produits combinés est, en effet, plus importante pour les larves d'oursins venues du golfe que pour des larves de la même espèce issues d'un milieu protégé.

Ce phénomène de résistance des individus issus de Fos-sur-Mer suggère que les individus locaux ont pu développer des aptitudes à répondre à l'exposition au stress chimique chronique. Pour tenter d'entrevoir une partie des mécanismes mis en jeu dans cette résistance, l'équipe de l'Université de Toulon (MIO) a réalisé des analyses moléculaires.



Ces dernières ont permis de révéler que les mécanismes de réponse au stress différaient entre les larves issues de Fos et des larves témoins, en ce sens que les larves issues de Fos ont, de façon constitutive, une aptitude à faire face à un stress métallique et répondent aux stress chimiques des SPC en favorisant l'expression des gènes de survie cellulaire et de production d'énergie. De plus, une sélection des individus dans le Golfe de Fos a été révélée, ceux-ci présentent des particularités au niveau de différents gènes, par exemple impliqués dans le stress oxydant, la réparation de l'ADN, ou la régulation des mécanismes de vieillissement cellulaire, ce qui pourrait expliquer l'adaptation locale observée aux conditions de Fos. Enfin, l'influence de la sélection opérée par les conditions environnementales du Golfe de Fos, semble s'étendre localement, puisque les populations d'oursins de Carry-le-Rouet sont d'un point de vue génétique plus proches de celles de Fos que de celles du Var, bien que non exposées aux stress chimiques, et que toutes les deux sont sensiblement différentes des populations non exposées situées 50 km plus à l'est (Giens).

En conclusion, la nature multi-contaminée du Golfe de Fos a clairement un impact sur les populations locales du golfe, en agissant comme un stress chimique chronique. Il apparaît clairement que les individus sont adaptés d'une part au stress métallique et aux stress aux SPCs en ayant développé des mécanismes de réponse aux stress spécifiques.

## LES RESULTATS DE LA RECHERCHE

Le projet de recherche Fos-Sea a permis de montrer que la chloration de l'eau de mer induit la formation de sous-produits bromés, dont certains ont une durée de vie courte dans l'eau et se transforment majoritairement en bromoforme.

On retrouve ce composé dans l'eau et dans l'air, car il est volatil. Le bromoforme peut avoir un impact sur la couche d'ozone.

Un des sous-produits de la chloration de l'eau est bioaccumulable (tribromophénol) : il se retrouve dans les poissons, moules, oursins...

La toxicité des sous-produits identifiée semble faible mais cela reste à vérifier pour :

- Le mélange des 15 molécules identifiées (seule la toxicité du mélange de 3/15 molécules a été mesurée)
- Ces sous-produits s'ajoutent aux contaminants déjà présents dans le Golfe (toxicité du cocktail à mesurer)
- Les effets à long terme (à l'échelle d'une population...)

L'écotoxicité de ces produits a été étudiée. Les résultats montrent que les organismes marins (oursins) se sont adaptés aux multiples pollutions du Golfe. Le plancton semble cependant plus sensible aux variations de salinité et de température qu'aux pollutions chimiques. Enfin, l'impact du chlore lui-même est limité aux exutoires.

## LES RECOMMANDATIONS

### Suivis réglementaires

- Fixer une limite réglementaire sur les composés organohalogénés totaux (limite à définir en fonction de la connaissance issue de la recherche).
- Homogénéiser les seuils réglementaires dans les rejets en fonction des débits.
- Fixer la limite seuil en bromoforme à 30 µg/L ou moins par rejet.
- Fixer une limite intégrant l'ensemble des rejets dans le Golfe de Fos.

### Limiter l'usage du chlore

- Encourager l'abandon du chlore pour des techniques alternatives.
- Veille technologique et partage d'expériences et de connaissances.

### Poursuivre les travaux de recherche sur :

- les effets à long terme, en mélange,
- les autres effets écotoxicologiques (perturbation endocrinienne...),
- les effets sur la santé humaine (études toxicologiques) du tribromophénol notamment,
- l'effet sur la couche d'ozone.



## Contacts

Institut Ecocitoyen pour la Connaissance des Pollutions  
04 90 55 49 94 | [contact@institut-ecocitoyen.fr](mailto:contact@institut-ecocitoyen.fr) | [www.institut-ecocitoyen.fr](http://www.institut-ecocitoyen.fr)