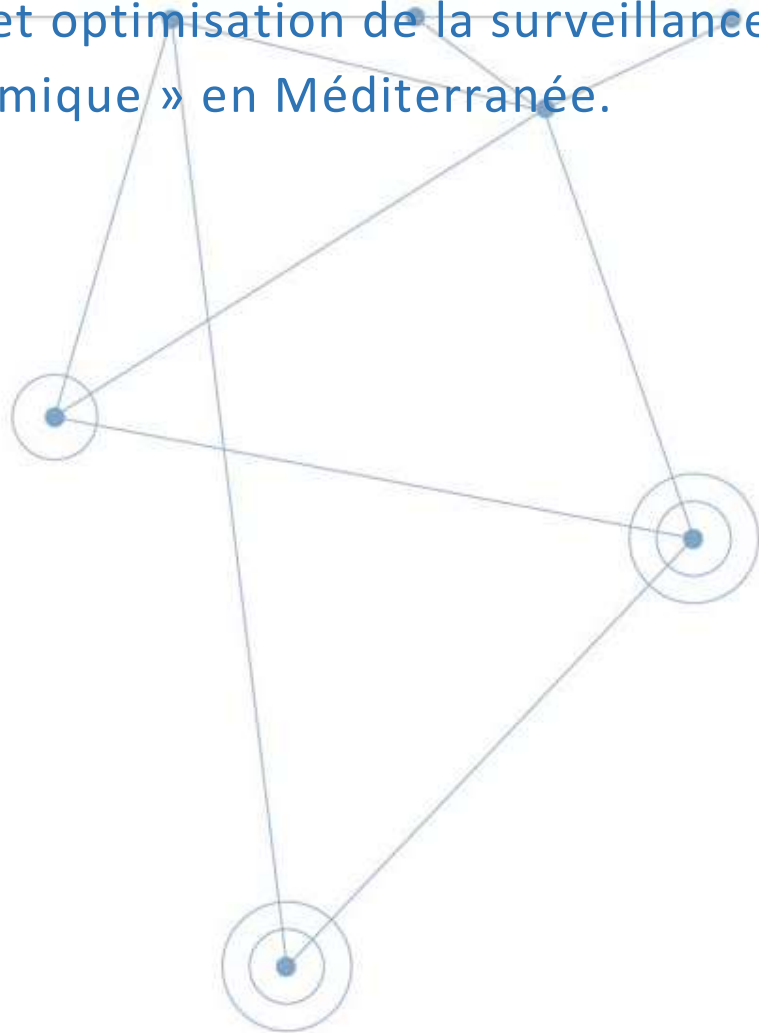


## Action CONTACT : CONTAmination des Chaînes Trophiques

- Evaluation et optimisation de la surveillance  
« chimique » en Méditerranée.



## Fiche documentaire

<b>Titre du rapport : Action CONTACT : CONTAmination des Chaînes Trophiques</b>	
<b>Référence interne :</b> ODE/UL/LER-PAC/21-05 <b>Diffusion :</b> <input checked="" type="checkbox"/> libre (internet)  <input type="checkbox"/> restreinte (intranet) – date de levée d’embargo : AAA/MM/JJ  <input type="checkbox"/> interdite (confidentielle) – date de levée de confidentialité : AAA/MM/JJ	<b>Date de publication :</b> 06/12/2021  <b>Version :</b> 1.0.0  <b>Langue(s) :</b> Français
<b>Résumé/ Abstract :</b> Initiée par l’agence de l’Eau Rhône Méditerranée Corse et l’Ifremer en 2019, l’action CONTACT a pour objectif de mobiliser des experts régionaux et nationaux sur la thématique de la contamination chimique pour : <ol style="list-style-type: none"> <li>i) Dresser le bilan des réseaux de surveillance actuels de la contamination chimique en Méditerranée ;</li> <li>ii) Identifier les lacunes et les principaux verrous scientifiques à lever afin de caractériser la contamination du milieu suivant une approche réseaux trophiques ;</li> <li>iii) Proposer une feuille de route pour l’acquisition des connaissances nécessaires à la mise en œuvre d’un suivi optimisé des contaminants et de leurs effets au sein des réseaux trophiques marins méditerranéens (sens large) dans les années futures.</li> </ol> Ce document présente les conclusions et préconisations des personnes sollicitées.	
<b>Mots-clés/ Key words :</b> Expertise, contamination chimique, réseaux trophiques, Méditerranée, surveillance, recherche, prospective	
<b>Comment citer ce document :</b>  	
<b>DOI :</b>  	

<b>Commanditaire du rapport : AERMC</b>	
<b>Nom / référence du contrat :</b> <input type="checkbox"/> Rapport intermédiaire (réf. bibliographique : XXX) <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif	
<b>Projets dans lesquels ce rapport s'inscrit (programme européen, campagne, etc.) :</b>	
<b>Auteur(s) / adresse mail</b>	<b>Affiliation / Direction / Service, laboratoire</b>
Briand Marine	ODE/UL/LER-PAC
Brach-Papa Christophe	ODE/UL/LER-PAC
Tronczynski Jacek	RBE/BE
Bouchoucha Marc	ODE/UL/LER-PAC
<b>Encadrement(s) :</b>	
Destinataire : AERMC	
<b>Validé par : Christophe Brach-Papa</b>	

## Sommaire

### Table des matières

<b>1</b>	<b>Surveillance chimique en Méditerranée.</b>	<b>5</b>
1.1	Contexte et objectifs du projet CONTACT.	5
1.2	Présentation des réseaux de surveillance en Méditerranée.	7
1.2.1	Mesures dans le milieu : EPI, ROCCHSED, REPOM et REMTOX.	8
1.2.2	Mesures dans le biote : ROCCH MV, RINBIO, CONTAMED et CETAMED.	12
1.2.3	Projets de surveillance en cours d'élaboration : ROMPOM et SELIMED.	17
1.2.4	Exemples de réseaux de surveillance à l'étranger.	19
1.3	Bilan et analyse critique des réseaux de surveillance en Méditerranée.	21
<b>2</b>	<b>Verrous scientifiques à lever</b>	<b>22</b>
2.1	Acquérir des données pour la surveillance.	22
2.1.1	L'apport des projets scientifiques.	22
2.1.2	S'appuyer sur des sites ateliers de référence.	24
2.1.3	S'appuyer sur des réseaux d'observation existants.	25
2.2	Vers une approche globale et intégrée.	27
2.2.1	Appréhender la contamination des réseaux trophiques.	27
2.2.2	Identifier et caractériser les effets des contaminants sur les organismes et le fonctionnement des écosystèmes.	30
<b>3</b>	<b>Engager une évolution des réseaux de surveillance.</b>	<b>34</b>
3.1	Réévaluer les objectifs de la surveillance.	34
3.2	Faire évoluer la stratégie opérationnelle.	35
3.3	Propositions d'évolution des réseaux de surveillance actuels.	37
	<b>Conclusions</b>	<b>40</b>
	<b>Références bibliographiques</b>	<b>41</b>
	<b>Annexes.</b>	<b>44</b>

# 1 Surveillance chimique en Méditerranée.

## 1.1 Contexte et objectifs du projet CONTACT.

La coordination des réseaux de surveillance ne relève pas de la seule volonté technocratique. Elle est une obligation : il apparaît à tous les niveaux que les données issues de la surveillance ne révèlent leur richesse que lorsqu'elles sont rassemblées, corrélées et synthétisées, de façon à faire apparaître les causes et les effets, les interactions entre les compartiments physiques et biologiques, entre politique d'occupation des espaces et altération des usages, entre court et moyen terme. Même s'ils présentent des limites, détaillées dans ce rapport, les réseaux de surveillance de la contamination chimique opérés en Méditerranée ont tous prouvé individuellement leur pertinence et leur robustesse. Cependant, l'expérience montre que, malgré les efforts déployés, la caractérisation globale de la contamination chimique en Méditerranée française reste mal appréhendée. Des divergences entre réseaux d'approches spatio-temporelles, de substances suivies ou encore de matrices utilisées conduisent à des incohérences difficiles à prendre en compte dans un processus de décision. Par ailleurs, les effets des contaminants sur les organismes et le fonctionnement des écosystèmes ne sont quasiment pas pris en compte dans les réseaux actuels.

C'est dans ce contexte que l'action CONTACT a été initiée par l'Ifremer et l'agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse (AERMC). Cette démarche vise à :

- iv) Dresser le bilan des réseaux de surveillance actuels de la contamination chimique en Méditerranée ;
- v) Identifier les lacunes et les principaux verrous scientifiques à lever afin de caractériser la contamination du milieu suivant une approche réseaux trophiques ;
- vi) Proposer une feuille de route pour l'acquisition des connaissances nécessaires à la mise en œuvre d'un suivi optimisé des contaminants et de leurs effets au sein des réseaux trophiques marins méditerranéens (sens large) dans les années futures.

Une plus grande synergie des actions passe nécessairement par une meilleure interaction entre les différents acteurs concernés. Le projet CONTACT s'est voulu ouvert à une large partie de la communauté française travaillant sur la thématique de la contamination chimique en Méditerranée. La liste des participants aux réunions CONTACT est fournie ci-après. Cette communauté se compose de divers acteurs (tableau 1), notamment des organismes de recherche, des établissements publics ou encore des structures de gestion dont les objectifs sont différents mais qui contribuent tous à apporter des connaissances, proposer des solutions d'amélioration ou encore mettre en place des mesures de protection. L'intégration de ces acteurs dans le groupe de travail CONTACT ne peut toutefois se faire que progressivement. Ainsi dans cette première phase de travail, ce sont principalement des chercheurs d'instituts de la région Marseillaise/Toulonnaise qui se sont impliqués. Les autres partenaires potentiels listés, appartenant à d'autres instituts plus éloignés géographiquement, à des établissements publics de gestion et opérant les réseaux d'observations devront également être sollicités dans un avenir proche.

Liste des participants consultés dans cette première phase de CONTACT (dont sept référents d'ateliers\*) :

- De l'Ifremer : Jacek TRONCZYNSKI (BE), Marc BOUCHOUCHA\*, Christophe BRACH-PAPA et Marine BRIAND (LERPAC), Jean-François CADIOU (DAEI), Thiphaine CHOUVELON et Joël KNOERY\* (LBCM), Aourel MAUFFRET (BE), Nathalie WESSEL\* (VIGIES), Audrey BRUNO (LERPC), Marie-Pierre HALM-LEMEILLE (LERN) ;
- Du M.I.O : Daniela BĂNARU\*, François CARLOTTI, Jean-Louis JAMET (EMBIO), Javier CASTRO-JIMENEZ\*, Lars-Eric HEIMBURGER, Stéphane MOUNIER\*, Nathalie PATEL, Virginie SANIAL et Marc TEDETTI (CEM), Natacha JEAN, Benjamin MISSON et Olivier PRINGAULT (MEB), Dominique JAMET (CYBELE) ;

D'autres instituts : Sabine CHARMASSON (IRSN/Ifremer), Emmanuel WAFO (Faculté de Pharmacie de Marseille AMU), Daniel LAFFITE (Faculté de Pharmacie de Marseille AMU), Jean-François BRIAND (UTLN/MAPIEM).

Tableau 1. Liste des partenaires actuels (v) et potentiels (o) impliqués dans le projet CONTACT.

Instituts de recherche	Etablissements publics de gestion
<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (<b>Ifremer</b>) ;</li> <li>✓ Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (<b>IRSN</b>) ;</li> <li>✓ Institut Méditerranéen d'Océanographie (<b>M.I.O</b>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse (<b>AERMC</b>).</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Parc National des Calanques.</li> <li>○ Parc National de Pros-Cros et Porquerolles.</li> <li>○ Comités de Baie</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Université d'Aix-Marseille/Université de Toulon/CNRS/IRD ;</li> <li>✓ <b>Faculté de Pharmacie de Marseille</b> Université d'Aix-Marseille ;</li> <li>✓ Laboratoire Matériaux Polymères Interfaces Environnement Marin (<b>MAPIEM</b>) Université de Toulon</li> <li>○ MARine Biodiversity, Exploitation and Conservation (<b>MARBEC</b>) UMR IRD/Ifremer/Université de Montpellier/CNRS ;</li> <li>○ Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement (<b>CEREGE</b>)</li> <li>○ Institut Paul Ricard</li> </ul>	

## 1.2 Présentation des réseaux de surveillance en Méditerranée.

### **Définition d'un réseau de surveillance**

Afin de suivre et d'évaluer « l'état chimique et écologique » du milieu marin, des dispositifs opérationnels appelés réseaux de surveillance (RdS) sont mis en place. Contrairement aux observatoires, leur but est de répondre à un ou plusieurs objectifs clairement identifiés. La donnée qu'ils produisent doit être interprétable et utilisée dans un processus de prise de décision. Le bon fonctionnement d'un RdS repose sur cinq éléments essentiels :

- l'existence d'un lien entre l'état observé et les pressions exercées ;
- la définition d'une stratégie spatio-temporelle adaptée et évolutive ;
- l'existence de grilles d'interprétation des résultats ;
- la capacité de bancarisation des données dans un système opérationnel et pérenne ;
- l'existence d'une ou plusieurs sources de financement pérennes.

Ce type de réseau est par définition adaptatif, évolutif et itératif ; il peut ainsi disparaître si la question posée n'est plus d'actualité. Les dispositifs de surveillance de la contamination chimique en Méditerranée répondent à des objectifs réglementaires sanitaires, aux obligations des conventions marines régionales (convention de Barcelone en Méditerranée), aux objectifs environnementaux des directives européennes (Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE-DCE et Directive Cadre Stratégie Milieu Marin 2008/56/CE-DCSMM) et aux objectifs de bassin. Si les réseaux alimentant la DCE ont pu bénéficier d'une construction itérative entre les préconisations scientifiques, les besoins opérationnels et une prise en compte significative du lien « état/pressions », la surveillance DCSMM plus récente reste, à ce stade, encore en construction. Cette dernière nécessite d'intégrer des dynamiques hydro et biogéochimiques avec de nouveaux descripteurs de l'état écologique des eaux marines dans un cadre géographique redéfini, distinct des masses d'eau côtières retenue pour la DCE, et étendu au large (*cf. 2.3.2 Faire évoluer la stratégie opérationnelle*). Une bonne articulation de la mise en œuvre de la DCE et de la DCSMM constitue donc un enjeu majeur en termes d'efficacité, comme cela est souligné dans le PAMM (programme de mesure 2016-2021).

### **Les RdS de la contamination chimique**

Dans les pays du Nord de la Méditerranée, notamment dans les pays membres de l'Union européenne, des efforts considérables ont été déployés au cours des dernières décennies pour surmonter les problèmes de pollution liés aux eaux usées et à l'utilisation de produits chimiques, par la mise en place de mécanismes de prévention, de technologies correctives et d'un cadre juridique approprié (PNUE/PAM, 2009). Ainsi, plusieurs programmes nationaux de surveillance du milieu marin ont été mis en œuvre en France dès les années 70, notamment en Méditerranée. Leur principal objectif est de caractériser les concentrations en substances dans différents compartiments : certains suivent exclusivement la qualité chimique du milieu, c'est-à-dire dans l'eau et les sédiments (RNO/ROCCHSED et REPOM), alors que d'autres s'appuient sur une approche plus écosystémique intégrant le biote (RINBIO, RNO/ROCCHMV, CONTAMED, OPERA, CETAMED et ROMPOM). Seuls quelques dispositifs ou études plus récents tentent d'évaluer les effets potentiels de ces contaminants sur les organismes marins (REMTX et SELIMED).

D'autres pays de Méditerranée occidentale, notamment l'Espagne, l'Italie et la Grèce, ont également mis en place des RdS de la contamination chimique de leur milieu marin (détaillés ci-

dessous), dont les objectifs et les protocoles se rapprochent de ceux des réseaux français. Dans les pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée la mise en œuvre des suivis reste limitée à quelques initiatives. Il n'existe pas de réseaux bien établis (PNUE/PAM, 2009).

### 1.2.1 Mesures dans le milieu : EPI, ROCCHSED, REPOM et REMTOX.

#### **Mesures dans la colonne d'eau**

Les contaminants chimiques sont généralement présents dans la colonne d'eau à l'état de traces et d'ultra-traces, distribués entre les formes dissoutes et particulaires (*e.g.* quelques ng.L<sup>-1</sup> eau pour la plupart des ETMs dissous et de quelques µg à quelques mg.Kg<sup>-1</sup> pour les formes particulaires). Très rapidement, des limites au suivi en routine et à fréquence élevée dans l'eau par les techniques "classiques" ont été soulignées : concentrations très faibles et souvent proches des limites de détection des techniques analytiques, risque important de contamination secondaire accidentelle, grande variabilité spatiale et temporelle des concentrations, part biodisponible des composés indiscernable, spéciation des composés peu prise en compte (Rainbow 1995 ; Amiard 2011 ; Gonzalez et al. 2011). Une méthode alternative présentée ci-dessous réduit en partie ces difficultés techniques et est aujourd'hui privilégiée pour les mesures dans l'eau.

Pour pouvoir fournir une évaluation de la contamination des masses d'eau qui soit fiable, rapide et à moindre coût, des échantillonneurs passifs intégratifs (EPI) ont été déployés en Méditerranée dès 2008 en collaboration avec l'AERMC (Gonzalez et al. 2011). Ces mesures ne font pas l'objet d'un RdS à part entière mais sont régulièrement réalisées dans le cadre de la DCE (littoral et lagunes). Ces dispositifs mesurent des concentrations dans l'eau de la fraction dite « opérationnelle » de nombreux contaminants chimiques et/ou mettent en évidence leur présence (à des niveaux très faibles) ou leur absence dans le milieu. L'utilisation d'EPI permet d'extraire certains composés et de les concentrer *in situ* sur une certaine durée, réduisant ainsi une partie des difficultés techniques et analytiques, *i.e.* mise en œuvre rapide, intégration dans le temps et spéciation des contaminants perturbées au minimum. Ces systèmes permettent aussi une mesure de la concentration en contaminant dissous "labile", contrairement aux techniques classiques (*e.g.* mesures de la concentration « dissoute totale », *i.e.* < 0,45 µm). Il existe différents EPI à ce jour, dépendamment des composés ciblés : les POCIS (Polar Organic Chemical Integrative Sampler) conçus pour l'échantillonnage intégratif des composés organiques hydrophiles, les DGT (Diffusive Gradients in Thin-films) utilisés pour extraire et concentrer *in situ* les contaminants métalliques et la technique SBSE (Stir Bar Sorptive Extraction) qui permet d'extraire et de concentrer des composés organiques hydrophobes.

#### **Mesures dans les sédiments**

Les contaminants s'accumulent (ou sont piégés) dans les sédiments et les concentrations y sont donc plus élevées que dans la matrice eau, plus facilement mesurables et beaucoup moins sensibles aux contaminations accidentelles lors de l'échantillonnage. Les sédiments offrent également un degré d'intégration dans le temps amenuisant l'effet de la variabilité temporelle. Cependant, cette accumulation est fortement affectée par les caractéristiques du sédiment lui-même (*e.g.* taux de sédimentation, granulométrie, nature minéralogique, teneur en CO), qui varient dans le temps et géographiquement. De plus les quantités de contaminants mesurées sont



dépendantes des protocoles analytiques mis en œuvre (*i.e.* digestion totale, extractions séquentielles...). Ainsi les concentrations mesurées, notamment pour les contaminants métalliques ne correspondent pas toujours à celles des fractions biodisponibles (Rainbow 1995 ; Amiard 2011).

#### Réseau d'Observation de la Contamination Chimique\_Sédiment (ROCCH SED)

Dès 1974 le Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin (RNO) a été mis en place sous l'impulsion du Ministère chargé de l'environnement pour i) déterminer les niveaux de concentrations en contaminants dans l'eau et le sédiment, ii) cibler les stations côtières au-dessus des seuils environnementaux et iii) caractériser les variations spatiales et temporelles des concentrations. Passant d'un unique maître d'ouvrage à de multiples donneurs d'ordres (AE, DIREN, *etc.*), ce dispositif est remplacé par le ROCCH en 2008 (tableau 2). En 1984, les analyses dans l'eau ont été arrêtées au bénéfice de mesures dans le sédiment (ROCCH SED, Bouchoucha et al. 2018) et le biote (ROCCH MV, *cf.* 1.2.2. *Mesures dans le biote*). Ce réseau « historique » d'envergure nationale est encore aujourd'hui le seul à analyser le compartiment sédimentaire, en plus de renseigner d'importantes séries chronologiques. C'est aussi le support du réseau REMTOX.

#### Réseau national de surveillance de la qualité des eaux et des sédiments des Ports Maritimes (REPOM)

Malgré la mise en place de mesures de prévention, les activités pratiquées dans les ports maritimes influencent la qualité du milieu aquatique, sans toutefois que leur impact soit réellement bien connu. Le REPOM a donc été mis en place en 1997 (tableau 2, CETMEF 2010) par le Ministère en charge de l'écologie \_ actuellement le Ministère de la transition écologique et solidaire (MTES) et la Direction de l'eau et de la biodiversité (DEB) \_ et opéré par les services en charge de la police des eaux littorales \_ initialement les Cellules de la Qualité des Eaux Littorales (CQEL) et aujourd'hui le Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (CEREMA) \_ avec la participation financière de nombreux gestionnaires de ports. Celui-ci s'inscrivait dans le contexte de la mise en œuvre alors récente des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et de la nécessité pour les gestionnaires des milieux aquatiques, et plus particulièrement des milieux littoraux, de disposer d'informations leur permettant de guider et d'évaluer leurs actions.

Le programme « eau » n'étant plus actif depuis 2010, ce réseau évalue et suit aujourd'hui l'évolution de la qualité des sédiments des bassins portuaires (militaires, de commerce, de pêche et de plaisance), et notamment les concentrations des substances prioritaires de la DCE, afin d'identifier l'impact de ces installations portuaires sur les usages du milieu pratiqués dans l'enceinte portuaire ou à proximité. La stratégie du REPOM a nécessité plusieurs modifications suite à son intégration à la DCSMM (D8) en 2014 (*e.g.* fréquence minimale de passage une fois tous les 3 ans).

### Réseau de Mesure de la TOXicité globale des sédiments (REMTOX)

Afin d'évaluer l'effet potentiel de ces substances présentes dans le sédiment sur les organismes marins, le réseau REMTOX été mis en place en 2009, en partenariat avec l'AERMC (tableau 2, Galgani et Baldi, 2010). Basé sur l'utilisation simple et rapide d'un test normalisé écotoxicologique d'embryotoxicité sur les larves d'huîtres, ce réseau permet de comparer les sites entre eux en termes de qualité des sédiments, de donner des éléments en vue d'une classification des zones prospectées et de localiser ou préciser des sources de pollution inconnues. A ce titre, les secteurs à risque (delta, ports, grandes agglomérations) ont été étudiés de manière plus approfondie ; en Méditerranée il s'agit des trois zones Rade de Toulon, baies de Cannes-Nice et Zone de Sète concentrant des activités portuaires et industrielles importantes. Cette approche est particulièrement adaptée au contexte méditerranéen en raison de la diversité des contaminants et de leurs effets limitant les approches chimiques traditionnelles lourdes à mettre en œuvre. C'est d'ailleurs à ce jour le seul réseau d'écotoxicologie actuellement actif sur la façade méditerranéenne.

Tableau 2. Résumé des protocoles mis en place pour les réseaux de surveillance dans le sédiment ROCCHSED, REPOM et REMTOX : méthodes utilisées, contaminants ciblés, couverture spatiale et temporelle (liste détaillée des contaminants en annexe 1).

	<b>ROCCHSED</b>	<b>REPOM</b>	<b>REMTOX</b>
<b>Matrice</b>	Sédiment.	Sédiment.	Sédiment. + larves d'huîtres creuse ( <i>Crassostrea Gigas</i> ).
<b>Contaminants</b>	15 combinaisons possibles selon les objectifs. Au minima : ETMs HAPs PCB pesticides organochlorés (dont DDT, DDE et DDD) PBDE HBCDD PFC	ETMs HAP TBT PCB	
<b>Spatialité</b>	59 stations côtières principales : 32 stations DCE ; 9 stations historiques ; 14 stations « embouchures des cours d'eau côtiers » ; 4 stations Saint Florent. ( <i>Carte en annexe 2.a</i> )	102 stations réparties dans 57 ports de la zone Rhône-Méditerranée + 14 stations réparties dans 8 ports de la zone Corse ( <i>Carte en annexe 2.b</i> ).	373 stations dans le champ proche (ports, émissaires) et le champ moyen. ( <i>Carte en annexe 2.b</i> )
<b>Temporalité</b>	Mensuellement sur une année tous les 6 ans depuis 1994.	Tous les 1 à 3 ans suivant le type de port depuis 1997.	Tous les 3 ans depuis 2009. Campagnes support : DCE 2009 & 2012 ; ROCCHSED 2016.

### 1.2.2 Mesures dans le biote : ROCCH MV, RINBIO, CONTAMED et CETAMED.

La surveillance reposant sur le biote, ou biosurveillance (en anglais « biomonitoring »), repose sur la capacité des organismes à accumuler dans leurs tissus des contaminants chimiques dans un facteur proportionnel à leur biodisponibilité (Cossa 1989 ; Casas et al. 2008). Cette approche est avantageuse vis-à-vis de l'analyse chimique conventionnelle dans l'eau, et dans une moindre mesure dans les sédiments (Zhou et al. 2008) pour plusieurs raisons : les concentrations élevées facilitent les manipulations et les analyses des échantillons, l'exposition à long terme des organismes et la mesure intégrée qui en découle donne une indication de l'état chronique actuelle du milieu, les modifications biologiques des organismes affectés sont révélées et cette surveillance est très sensible en raison des réponses rapides induites chez les organismes exposés. Un bon bioindicateur répond à un certain nombre de critères : forte bioaccumulation et faible régulation du contaminant, abondance sur le site d'étude, taille adéquate, durée de vie longue, sédentarité, résistance au stress de la manipulation (Cossa 1989 ; Rainbow 1995). Aucune espèce ne combinant toutes ces qualités, un compromis doit être trouvé. A ce jour, les bivalves restent les bioindicateurs cosmopolites les plus évidents car ils ont la faculté de concentrer de nombreux contaminants présents dans le milieu (cf. méthode « Mussel watch » présentée ci-dessous).

#### **Mesures dans les bivalves**

##### Réseau d'Observation de la Contamination Chimique\_Matière Vivante (ROCCH MV)

De nombreux pays mettent en œuvre des programmes de surveillance sous le terme générique de « moule-sentinelle ou mussel watch », en s'appuyant sur des populations naturelles de mollusques (biomonitoring passif) ou transplantées et encagées (biomonitoring actif). Initiée aux États-Unis au milieu des années 1960 (Goldberg, 1975 ; Tripp et al. 1992), cette méthode s'est rapidement étendue à l'international et notamment en France (Farrington et al. 2016). Depuis le début des années 1980, le réseau national ROCCH s'appuie ainsi sur le suivi de populations naturelles de coquillages (RNO MV puis ROCCH MV, tableau 3), dont l'abondance suffisante et les conditions de vie pérennes *sine qua non* (e.g. temps de résidence > 6 mois, support stable, nourriture abondante) conditionnent fortement la stratégie spatiale. Le réseau ROCCH est aussi le support d'autres suivis (e.g. Emerg'Risk et VEILLE POP du RSP\_Volet Littoral) et actions (e.g. établissement de valeurs « guide » VGE/BAF) de la part d'autres acteurs (Aquaref, l'AFB, ect.). Par ailleurs, ROCCH MV se compose d'un volet sanitaire en intégrant le suivi chimique des zones de production conchylicoles pour le compte de la Direction Générale de l'Alimentation (DGAL) du Ministère de l'agriculture et de la pêche.

### Réseau INTégrateurs BIOlogiques (RINBIO)

Depuis 1996, RINBIO évalue la contamination chimique des eaux côtières à l'échelle de l'ensemble de la façade méditerranéenne (tableau 3, Witkowsky et al. 2017). Ce réseau ancien et pérenne fait office de « référence » en Méditerranée et est très utilisé par les gestionnaires en raison de ses multiples avantages : souple et évolutif grâce notamment à sa méthode des stations artificielles de moules (biomonitoring actif), il propose une très forte couverture spatiale (dont des stations sentinelles). L'objectif est à la fois de caractériser l'état de la situation dans le champ moyen de dilution des apports provenant des bassins versants et de focaliser sur des secteurs prioritaires pour évaluer l'efficacité de mesures de gestion. Ce RdS permet donc de répondre aux besoins du bassin (AERMC) et aux attentes DCE/DCSMM/MEDPOL. Par ailleurs, de nombreux développements ont été réalisés autour de ce réseau, tant dans le domaine de la recherche (e.g. modèles de bioaccumulation, traitement, statistique des données) que de la gestion (e.g. grilles de diagnostic) (Andral et al. 2012). Sur la base de cette méthode, la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la mer Méditerranée (CIESM) a déployé depuis 2002 un programme interrégional nommé « Mediterranean Mussel Watch » de surveillance d'abord des radionucléides puis des métaux lourds et de certains polluants émergents. Le bassin Occidental puis Oriental de la Méditerranée ont été étudiés au travers de sept campagnes - MYTILOS (2004, 2005, 2006), MYTIMED (2007), MYTIAD (2008), MYTIOR (2009) et MYTITURK (2011) – qui ont permis de réaliser une première cartographie de la contamination chimique à l'échelle de tout le bassin selon un protocole standardisé (300 stations, voir la carte dans Sargian et al. 2014). Soutenu par le programme européen de coopération transnationale INTERREG MEDOCC, le PNUEIPAM - MEDPOL et l'AERMC, ce projet était sous la coordination scientifique d'Ifremer et la participation d'une vingtaine de laboratoires d'environnement marin de 20 pays de la Méditerranée et de la mer Noire (Rodriguez y Baena et Thébault, 2007). L'Italie et l'Espagne utilisent toujours cet outil de surveillance (cf. 1.2.4 Exemples de réseaux de surveillance à l'étranger).

Depuis 2010, le programme de VEILLE POP, né d'une collaboration Ifremer-OFB, suit annuellement les contaminants organiques émergents persistants recommandés par le CIEM (RFB, PBDE, HBCDD, PFAS, PFC, muscs synthétiques, RFP) dans les mollusques marins (les moules *Mytilus edulis* et *M. galloprovincialis* et l'huître creuse *Crassostrea gigas*). Cette démarche alimente les réflexions du « volet littoral » du Réseau de Surveillance Prospective de la qualité chimique des eaux de surface (RSP) mis en place en 2019 dans le cadre du Plan Micropolluants 2016-2021 du Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire (MTES). Les objectifs spécifiques de cette action sont principalement de i) déterminer les niveaux et empreintes de la contamination de l'environnement côtier par des contaminants organiques émergents, ii) disposer de méthodes analytiques adaptées aux analyses de ces contaminants, iii) déterminer la distribution géographique de la contamination sur le littoral métropolitain, iv) apporter des données récurrentes dans un objectif de suivi temporel de la contamination et v) situer les niveaux de contamination des côtes françaises par rapport aux niveaux européens. Pour son suivi, VEILLE POP s'appuie sur l'échantillonnage du réseau ROCCH MV en cinq sites : Embouchure de l'Hérault, Etang de Thau, Golfe de Fos, Baie de Marseille, Corse (voir la carte p.18 Munsch et al. 2018).

## Mesures dans les poissons

### Réseaux CONTaminant en MEDiterranée (CONTAMED) et COntaminants dans les REseaux troPHiques (COREPH)

Le réseau CONTAMED est issu d'un projet prospectif initié en 2012 en collaboration avec l'AERMC. Basé sur la logistique des campagnes halieutiques de l'Ifremer, il vise à caractériser les niveaux trophiques et les niveaux de contamination de plusieurs espèces de poissons démersaux du plateau et de la pente continentale. Quatre secteurs sont ciblés (tableau 3, Andral et al. 2014 ; Mille et al. 2018). Ce réseau à l'interface entre la chimie et l'écotoxicologie ne s'intéresse qu'à des espèces démersales. Il est complété depuis 2014 par le Suivi des COntaminants dans les REseaux troPHiques (COREPH) pour les espèces pélagiques. Il repose sur une forte expérience des équipes locales pour sa mise en œuvre (e.g. s'appuie sur les campagnes halieutiques MEDITS) et est aujourd'hui utilisé au niveau de la DCSMM pour les descripteurs D4 (réseaux trophiques) et D8/D9 (contaminants).

### Observatoire Permanent de la Radioactivité (OPERA)

Le réseau OPERA a été établi au début des années 1980 par l'Institut de protection et de sûreté nucléaire (IPSN) du Commissariat à l'énergie atomique CEA \_ devenu en 2002 Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) \_ afin d'établir les niveaux de référence et les tendances des radionucléides dans le milieu marin côtier en Méditerranée française (tableau 3). Ce n'est ni un système d'alerte précoce, ni un réseau de contrôle. Les activités des radionucléides artificiels, aussi faibles soient-elles, sont mesurées et versées au Réseau National de Mesures de la radioactivité de l'environnement (RNM) comme base pour l'évaluation d'impact, les études de transfert ou la validation des modèles prédictifs afin de fournir une information interprétée au public et aux « décideurs ».

## Mesures dans les cétacés

### CETAMED

Les échouages de mammifères marins sur le littoral français font l'objet d'un suivi continu depuis 1972 par le Réseau National d'Echouages (RNE), coordonné par l'Observatoire PELAGIS (Université de La Rochelle-CNRS). Au sein de ce réseau, le suivi méditerranéen est coordonné par le Groupe d'Etude des Cétacés de Méditerranée (GECEM) depuis 2000. Des études sur les teneurs en polluants dans les mammifères marins sont réalisées depuis 2001 par le Laboratoire de Chimie Analytique de la Faculté de Pharmacie de Marseille (tableau 3).

Tableau 3. Résumé des protocoles mis en place pour les réseaux de surveillance dans le biote ROCCH MV, RINBIO, CONTAMED et CETAMED : méthodes utilisées, contaminants ciblés, couverture spatiale et temporelle (liste détaillée des contaminants en annexe 1).

	ROCCH MV	RINBIO	CONTAMED	OPERA	CETAMED
<b>Matrice</b>	Bivalves - les moules <i>Mytilus edulis</i> et <i>M. galloprovincialis</i> ; - l'huître creuse <i>Crassostrea gigas</i> ; - la Donace (ou Olive ou Telline) <i>Donax trunculus</i> .	Bivalves - la moule <i>Mytilus galloprovincialis</i> .	Poissons démersaux : - le merlu européen <i>Merluccius merluccius</i> ; - le rouget-barbet de vase <i>Mullus barbatus</i> ; - le sébaste chèvre <i>Helicolenus dactylopterus</i> ; - la petite roussette <i>Scyliorhinus canicula</i> .	Moules : - <i>M. galloprovincialis</i> ; Poisson : - le rouget-barbet de vase <i>Mullus barbatus</i> ;	Cétacés : - le dauphin bleus et blancs <i>Stenella coeruleoalba</i> , le grand dauphin <i>Tursiops truncatus</i> ; - le globicéphale noir <i>Globicephala melas</i> - le rorqual commun <i>Balaenoptera physalus</i> .
<b>Contaminants</b>	15 combinaisons possibles selon les objectifs. Au minima : ETMs HAPs PCB pesticides organochlorés dont DDTs PBDE HBCDD PFC	ETMs HAPs DDT (DDD, DDE) PCB pesticides organochlorés radionucléides	ETMs PCB dioxin-like PCDD PCDF	Radionucléides : <sup>137</sup> Cs, <sup>60</sup> Co, <sup>40</sup> K, <sup>7</sup> Be, <sup>210</sup> Pb (+ U, Pu, <sup>14</sup> C, <sup>3</sup> H)	ETMs PCB pesticides HAP
<b>spatialité</b>	15/18 stations principales (Carte en annexe 2.a).	Entre 50 et 100 stations artificielles/campagnes artificielles entre 20 et 30 m de fond à la fois en mer ouverte (50 stations) et en lagunes (20 stations), soit	Plusieurs stations de prélèvements ont été réparties sur deux zones : l'Est du golfe du Lion et le plateau continental à l'Est de la Corse. Pour chaque zone, deux	8 stations	Aléatoire, dépendante des échouages. Répartition sur tout le littoral méditerranéen, avec davantage d'échouages de Marseille à Menton que dans le golfe du lion.

		<p>un linéaire de 1 800 km de côtes couvrant toutes les zones homogènes du Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Rhône Méditerranée Corse (RMC) et les masses d'eau des réseaux de contrôle de surveillance et opérationnel de la DCE .</p> <p>3 types de stations : historiques, DCE et sentinelles <i>(Carte en annexe 2.c).</i></p>	<p>tranches bathymétriques ont été considérées : le plateau continental (entre 75 et 150 m) et le rebord du plateau continental près des têtes de canyon (&gt;400m). <i>(Carte en annexe 2.d).</i></p>		Voir carte Medtrix
<b>Temporalité</b>	<p>Tous les ans depuis 1994 :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- en février (zones classées « surveillance sanitaire » pour les espèces réellement exploitées) ;</li> <li>- en novembre (Veille Pop).</li> </ul>	Tous les 3 ans depuis 1998.	Tous les 5 ans depuis 2012.	Tous les ans, fréquence bimestrielle, depuis les années 80.	Aléatoire, dépendante des échouages depuis 2010



### 1.2.3 Projets de surveillance en cours d'élaboration : ROMPOM et SELIMED.

Certaines études peuvent être également mentionnées. Dans le cadre du RNO par exemple, plusieurs analyses écotoxicologiques ont été testées sur des moules et des poissons, dont des biomarqueurs d'altération de l'ADN et d'aberrations chromosomiques, d'enzymes de détoxification (suivi EROD Ifremer), d'inhibition de la transmission de l'influx nerveux (AChE). Deux autres initiatives plus récentes sont quant à elles en cours d'élaboration.

#### SELIMED

Suite à la demande ministérielle d'un dispositif permettant de renseigner le D8C2 de la DCSMM (*cf.* le niveau de concentration des contaminants ne provoque pas d'effets dus à la pollution), l'IFREMER (RBE/BE) a mis en place le dispositif SELI (<https://doi.org/10.18142/285>). Les biomarqueurs et espèces suivis dans SELI sont en lien avec les recommandations de l'indicateur 18 de Medpol (Common Indicator 18: Level of pollution effects of key contaminants where a cause and effect relationship has been established : <https://www.medqsr.org/assessment-methods-ci18>). Il permet d'acquérir des données sur les effets biologiques de la contamination chimique chez des organismes marins grâce à la recherche de biomarqueurs (*e.g.* neurotoxicité (inhibition AChE), génotoxicité (Micronoyaux, Test des comètes), détoxification (métabolites biliaires de HAP), *cf.* tableau 4). L'étude régionale SELIMED dans le Golfe du Lion a partiellement eu lieu en 2016 (tableau 4, Mauffret et al. 2019).

#### Réseau d'Observation Méditerranéen des Polluants par les Oiseaux Marins (ROMPOM)

A travers le réseau des gestionnaires des Petites Iles de Méditerranée (Initiative PIM), le projet ROMPOM a été initié sur différents sites pilotes de la Méditerranée occidentale. L'objectif est d'évaluer les niveaux de pollution marine par l'analyse d'échantillons d'oiseau marins pélagiques et côtiers se reproduisant sur différents sites insulaires méditerranéens, *i.e.* concentrations dans le duvet, le sang et les œufs non fécondés, et analyse du biomarqueur « malformation des cellules sanguines ». Une phase de test a été menée en 2015, et les premiers échantillonnages sur le terrain ont débuté en 2017 (tableau 4). Les premiers résultats issus des analyses du Laboratoire de Chimie de l'Environnement d'Aix-Marseille sont disponibles depuis octobre 2019 et devraient orienter la décision de créer à plus long terme un observatoire à l'échelle méditerranéenne permettant l'analyse de ces derniers entre sous-bassins.

Tableau 4. Résumé des protocoles mis en place pour les dispositifs de surveillance en cours d'élaboration SELIMED et ROMPOM : méthodes utilisées, contaminants ciblés, couverture spatiale et temporelle (tableau détaillé en annexe).

	<b>SELIMED</b>	<b>ROMPOM</b>
<b>Matrice</b>	Bivalve : la moule ( <i>Mytilus galloprovincialis</i> ) ; Poisson : le rouget-barbet de vase ( <i>Mullus barbatus</i> ).	Oiseaux marins : le Puffin cendré ( <i>Calonectris borealis</i> ) et le Balbuzard pêcheur ( <i>Pandion haliaetus</i> ).
<b>Contaminants</b>	ETMs HAPs PCB PBDE HBCDD, PFC, PFOS, DDT, HCH.	ETMs POPs
<b>spatialité</b>	Moules : 5 stations du Golfe du Lion (également suivies dans le cadre du ROCCHMV en février 2018) Rougets : 5 stations dans le Golfe du Lion (également suivies dans le cadre du réseau CONTAMED et des campagnes MEDITS en septembre 2016) (Carte en annexe 2.d).	Parc National des Calanques (France) Parc National de Zembra (Tunisie), Archipel des Habibas (Algérie)
<b>Temporalité</b>	Perspectives : une fois par an (en septembre pour les poissons et en février pour les moules), tous les 3 ans.	Pas d'information.

#### 1.2.4 Exemples de réseaux de surveillance à l'étranger.

D'autres pays méditerranéens ont mis en œuvre des dispositifs de surveillance de la contamination chimique en milieu marin, notamment dans le cadre du D8 de la DCSMM (rapport MEDCIS, Mauffret et al. 2019) ; la Croatie, l'Espagne, la Grèce, l'Italie et la Slovénie pour les plus impliqués. Tous annoncent avoir suivi au moins une fois *a minima* la présence des 45 substances chimiques identifiées comme prioritaires et hautement prioritaires par la DCE (directive 2013/39/EC, amendant les Directives 2000/60/EC et 2008/105/EC) dans le sédiment, le biote, et dans l'eau. Dans un second temps, leurs réseaux de surveillance ont inclus ou prévu d'inclure l'utilisation de biomarqueurs pour surveiller les effets de ces contaminants sur les moules et/ou les poissons, *e.g.* LMS, SOS, EROD, AChE (annexe 7 du rapport MEDCIS). C'est le cas depuis 2007 en l'Espagne, depuis 2016 en l'Italie et en Croatie, prévu pour 2022 en Grèce et non encore envisagé par la Slovénie.

##### ***L'exemple du réseau de surveillance espagnol***

Depuis 1991 le Centre océanographique de Murcia (Institut espagnol d'océanographie, IEO) a mené des activités de recherche et surveillance de la pollution chimique le long de la côte ibérique de la Méditerranée (Martínez-Gómez et al. 2007). Les principaux objectifs de ce programme de biosurveillance sont :

- (1) la détermination de la distribution spatiale et des tendances temporelles de la contamination chimique dans les zones côtières et de référence ;
- (2) la recherche des preuves d'effets biologiques nuisibles et les évaluer au fil du temps.

Ce réseau s'est développé au départ dans le cadre de la phase III (1996-2005) du programme MEDPOL/UNEP. Plusieurs substances chimiques inorganiques et organiques étaient alors détectées dans de l'eau, du sédiment, des populations naturelles de moules et des poissons (tableau 5). C'est au cours de cette phase, en 2001, qu'une activité pilote testant plusieurs biomarqueurs dans le biote a été réalisée : activité Ethoxyresorufin-O-deethylase (EROD), contenu en métallothionéines (MTs), fréquence des micronoyaux (MN), dommages génotoxiques, inhibition de l'acétylcholinestérase (AChE), stress général (SOS) et stabilité de la membrane lysosomale (LMS). A partir de 2007 (MEDPOL Phase IV 2006-2013) l'application d'une approche à deux niveaux (« two-tier approach ») a été suggérée, préconisant l'utilisation de moules encagées et des biomarqueurs de base (LMS, SOS et mortalité), à compléter avec d'autres biomarqueurs pertinents proposés par le Groupe de travail du CIEM sur les effets biologiques des contaminants (*e.g.* croissance larvaire (LG), métabolites des HAPs (BM), Imposex (IMP), CIEM 2007). En parallèle, ces biomarqueurs ont répondu aux besoins du D8 de la DCSMM.

Tableau 5. Protocole du réseau de surveillance de la contamination chimique sur les côtes méditerranéennes espagnoles : matrices ciblées, contaminants analysés, couverture spatiale et temporelle.

<b>Matrice</b>	- Sédiments - Bivalve : la moule ( <i>Mytilus galloprovincialis</i> ) ; - Poisson : le rouget-barbet de vase ( <i>Mullus barbatus</i> ).
<b>Contaminants</b>	6 ETMs (Al, As, Cd, Hg, Ni, Pb,) 13 HAPs (anthracene, benzo [b]fluoranthene, benzo[a]anthracene, benzo[a]pyrene, benzo[e]pyrene, benzo[g,h,i]perylene, benzo[k]fluoranthene, chrysene, dibenzo[a,h]anthracene, indeno[1,2,3-c,d]pyrene, phenanthrene, pyrene) ; 9 PCB (CB28, CB52, CB101, CB105, CB118, CB138, CB153, CB156, CB180) op'-DDT, pp' (et métabolites pp'-DDE, pp'-DDD) 6 pesticides organochlorés (Aldrine, Dieldrine, Endrine, Isodrine, Lindane $\gamma$ -Hexachlorocyclohexane, $\alpha$ -Hexachlorocyclohexane, Hexachlorobencene, Transnonachlor).
<b>spatialité</b>	stations de la démarcation Levant-Baléares à la démarcation Détroit-Alboran (figure 1 ci-dessous)
<b>Temporalité</b>	- dans le biote : tous les ans (pour le suivi temporel) à tous les 5 ans (pour le suivi spatial) en avril pour les poissons (spécimens non-matures) mi-mai à mi-juin pour les moules (période de repos) -dans les sédiments : tous les 5 ans (Avril)

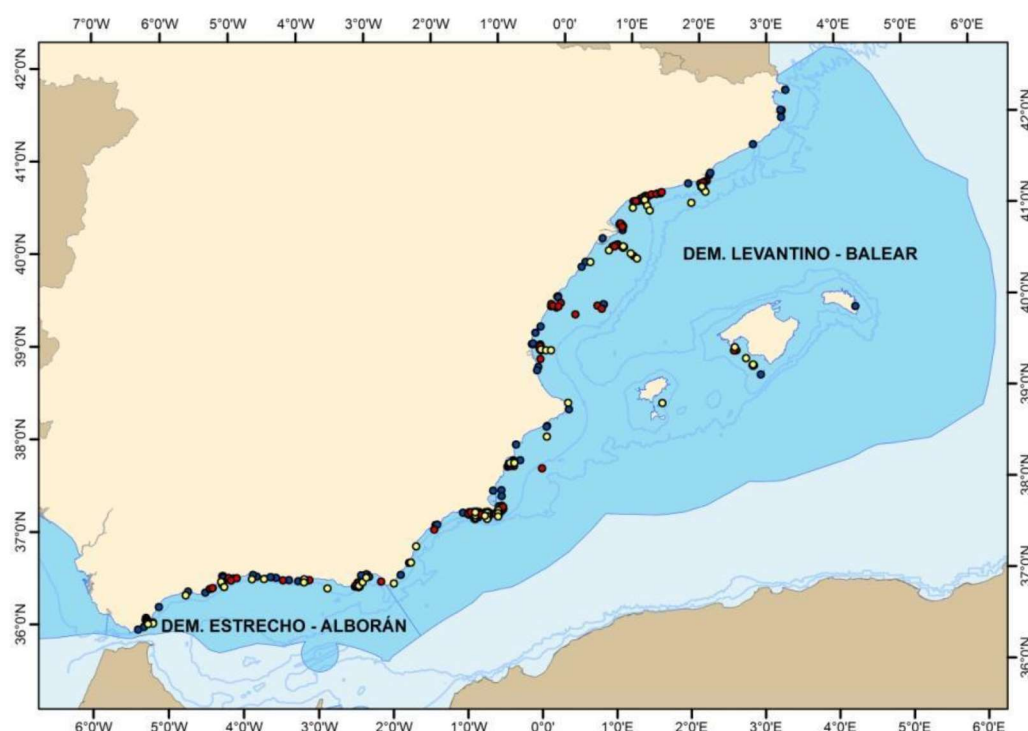


Figure 1. Répartition des stations d'échantillonnage du réseau de surveillance espagnol (rapport EsMarEs 2019 a,b).

### 1.3 Bilan et analyse critique des réseaux de surveillance en Méditerranée.

Le recensement des RdS actifs en Méditerranée rejoint les conclusions de l'analyse critique du Plan de Surveillance DCSMM menée par l'Ifremer en 2019 (Wessel 2019) ; il fait état de huit réseaux actifs en sous-région marine MO, dont cinq dispositifs associés aux sous-programme SP1 (D8C1) "contaminations chimiques dans les organismes marins" (CETAMED, CONTAMED, OPERA, RINBIO et ROCCH MV), 2 dispositifs associés au SP2 (D8C2) "contaminations chimiques dans le milieu" (REPOM et ROCCH SED) et un dispositif pour le SP3 (D8C1, D8C2) "effets des contaminants chez les organismes marins" (REMTOX). S'ajoutent à cette liste un dispositif de suivi parallèle (VEILLE POP) et deux dispositifs en cours d'élaboration (ROMPOM et SELIMED). Chaque réseau possède ses propres caractéristiques en termes de stratégie (contaminants/matrices suivies, couvertures spatiale et temporelle), d'acquisition des données (utilisation de laboratoire accrédités/agrés ou de recherche), et de relations entre acteurs. Pris individuellement, ces réseaux sont opérationnels et robustes, pour certains depuis longtemps, avec un niveau de stockage des données satisfaisant pour la majorité d'entre eux. De ces caractéristiques intrinsèques se dégagent des points forts et des points faibles généraux majeurs (tableau 6), déjà soulignés pour certains par Perez *et al.* (2000) et plus récemment par Wessel en 2019 (PdS DCSMM, Evaluation 2018). Les points caractéristiques des différents réseaux de surveillance opérés en Méditerranée sont résumés dans le tableau ci-après.

Tableau 6. Liste des points forts et des points faibles généraux pour l'ensemble des RdS de la contamination chimique en Méditerranée.

<u>POINTS FORTS</u>	<u>POINTS FAIBLES</u>
<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Haute qualité des données (ROCCH, RINBIO)</li> <li>○ Séries temporelles longues (ROCCH, RINBIO)</li> <li>○ Couverture spatiale étendue (RINBIO, ROCCH SED)</li> <li>○ Données bancarisées</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Qualité des données faible à moyenne (REPOM, CETAMED)</li> <li>○ Couverture spatiale peu étendue ou non optimisée (ROCCH MV, CONTAMED)</li> <li>○ Manque d'intégration des RT (<i>i.e.</i> souvent 1 taxon/RdS) ;</li> <li>○ Contaminants émergents peu pris en compte ;</li> <li>○ Peu d'analyses d'écotoxicité en dehors de REMTOX.</li> </ul>

## 2 Verrous scientifiques à lever

Comment mieux identifier et hiérarchiser les sources polluantes ? Comment relier la présence des polluants aux impacts écologiques constatés, et améliorer le diagnostic de l'état des eaux ? Comment identifier les substances « d'intérêt émergent » les plus préoccupantes ? (Basilico et al. 2013). Pour s'assurer d'une bonne évaluation de la contamination chimique, il est primordial d'appréhender toutes ces questions. Il faut ainsi encourager la complémentarité des approches en s'intéressant aux niveaux de contamination comme aux perturbations biologiques (Perez et al. 2000) et faire le lien entre ces outils de surveillance afin d'éviter le « tout chimique », le « tout biochimique » ou le « tout écologique ». Gestionnaires et autres acteurs du milieu marin expriment un besoin croissant de connaissances, d'outils et de méthodes opérationnelles nécessitant une plus grande synergie des actions entre la recherche et la surveillance.

### 2.1 Acquérir des données pour la surveillance.

#### 2.1.1 L'apport des projets scientifiques.

Au cœur de la politique française de l'eau (*e.g.* DCE 2000/60/CE, DCSMM 2008/56/CE, plan national Micropolluants 2010-2013), la thématique des contaminants chimiques des milieux aquatiques fait l'objet d'une abondante production documentaire dès les années 2000 : textes réglementaires, synthèses scientifiques, données spatialisées, guides opérationnels, informations de référence sur les substances (Basilico et al. 2013). Dans le cadre de CONTACT, une vingtaine de projets récents dédiés à la compréhension et à la caractérisation de la contamination chimique du système méditerranéen ont été recensés (tableau 7). Plusieurs de ces projets ont été développés dans le cadre du programme Ifremer MEDICIS débuté en 2003 ([www.ifremer.fr/medicis](http://www.ifremer.fr/medicis), Cadiou et al., 2008), dont l'objectif était d'améliorer les connaissances sur les sources, l'état, le devenir de la contamination chimique dans l'Ouest Méditerranée. Cette liste se restreint pour le moment essentiellement aux travaux scientifiques réalisés ou en cours des partenaires de CONTACT (*e.g.* Ifremer, M.I.O, UTLN, IRSN, MAPIEM, *cf. tableau 1*).

Tableau 7. Liste non-exhaustive des principaux projets de recherche sur la contamination chimique en Méditerranée française, au travers de différents aspects de la contamination (i.e. apports et flux des contaminants, transferts dans les Réseaux trophiques « RT », effets des contaminants sur les organismes) et à différentes échelles spatiales (large : Méditerranée ; moyenne : Golfe du Lion et Mer Ligure ; fine : Rade de Toulon, Baie de Marseille et Montpellier).

Site/Thématique	Apports/Flux	Transfert RT	Ecotoxicité
<b>Méditerranée</b>	MERITE- HIPPOCAMPE CONTAMPUMP MEDPOP IMPACT THRESHOLDS	MERITE- HIPPOCAMPE CONTAMPUMP MEDPOP THRESHOLDS	THRESHOLDS
<b>Golfe du Lion</b>	EXTREMA ECOLARGE ARC-MED CAREMED Blue-POLUT PARME	COSTAS MERLUMED CAREMED Blue-POLUT PARME	
<b>Mer Ligure</b>	DYCOMED		
<b>Rade de Toulon</b>	SCOTTI METFLUX	SCOTTI DROPLETT	METOPHYTO IMPRECI PREVENT
<b>Baie de Marseille</b>	METROC COMATIC APREM CONTAMPUMP Blue-POLUT IBISCUS	METROC CONTAMPUMP Blue-POLUT APREM	METROC
<b>Montpellier Etang de Thau</b>	ARDECO THRESHOLDS	THRESHOLDS	THRESHOLDS

Acronymes :

- APREM : Éléments Traces Métalliques et Métalloïdes dans le plancton et les poissons planctonophages de la baie de Marseille.
- ARC-MED : Apports en Contaminants organiques persistants et en mercure dans le Golfe du Lion, Méditerranée.
- ARDECO : Apports Régionaux et DEvenir des Contaminants.
- Blue-POLUT : Impact des polluants organiques associés aux microplastiques sur la qualité de l'eau et des organismes.
- CAREMED : Concentration, Accumulation et Risque potentiel des contaminants anthropogéniques dans les Environnements côtiers en mer Méditerranée nord-occidentale.
- COMATIC : Détermination des Coefficients de partage entre Matière organique dissoute et contaminants chimiques (HAPs, pesticides, phtalates) dans le milieu Côtier.
- CONTAMPUMP : Plankton: biological PUMP of CONTAMINANTS in marine ecosystems.
- COSTAS : Contamination chimique dans le Golfe du Lion.
- DROPLETT : Dynamique et ROle du Plancton lors du Transfert des contaminants vers les réseaux Trophiques.
- DYCOMED : Etude de la DYnamique des CONTaminants sur le site de DYFAMED en Méditerranée.
- ECOLARGE : Echanges côte-large à travers le courant liguro-provençal.

- EXTREMA : Épisodes météo-climatiques extrêmes, redistribution des masses sédimentaires et des polluants associés, au sein d'un système côtier.
- IBISCUS : Indicateurs Biologiques et chimiques de Contaminations Urbaines en milieu marin.
- IMPACT : Impatto Portuale su Aree marine protette: azioni Cooperative Transfrontaliere (Développement économique portuaire et environnement).
- IMPRECI : IMPacts RECIproques entre Microorganismes et Métaux traces en milieu marin côtier : qui contrôle qui ?
- MEDPOP : Integrated assessment of the fate and impacts of organic pollutants in the Mediterranean Sea.
- MERITE-HIPPOCAMPE : Marine Ecosystem Response to the Input of contaminants in the coastal zone.
- MERLUMED : Bioaccumulation des contaminants dans le réseau trophique du MERLU en Méditerranée.
- METFLUX : Evaluation des flux de métaux traces en zone côtière méditerranéenne –application à la Rade de Toulon.
- METOPHYTO : Influence de pollutions Métalliques multiples représentatives de l'environnement marin côtier Toulonnais sur le picoPHYTOplancton.
- METROC : Apports par les grandes métropoles.
- PARME : Importance de la spéciation de l'Arsenic et du Mercure.
- PREVENT : Protection du littoral méditerranéen: Evaluation, surveillance, conséquences, impact économique et sociétal –Application à la Rade de Toulon.
- SCOTTI : Etude des Sources des Contaminants et de leurs Transferts vers le réseau Trophique par des Traceurs Innovants.
- THRESHOLDS : Threshold of Environmental Sustainability.

La plupart de ces études se sont intéressées à l'identification et la hiérarchisation des sources primaires de contaminants et à l'étude des processus de transport *via* une approche biogéochimique (e.g. COMATIC, DYCOMED, METFLUX), ou au transfert des contaminants dans les RT *via* une approche biologique (e.g. CONTAMPUMP, COSTAS, MERLUMED). Assez peu ont appréhendé la question de « l'effet » (e.g. IMPRECI, METOPHYTO, METROC), et seules les plus récentes ont proposé une approche intégrée faisant le pont entre chimie et la biologie (e.g. MERITE-HIPPOCAMPE, CAREMED, SCOTTI, METROC). Or, la problématique de la contamination est par définition interdisciplinaire. **Les futurs projets scientifiques devraient donc encourager les approches transversales et mêler systématiquement chimie et biologie ou écologie.**

A l'issue de ces travaux, plusieurs verrous scientifiques restent à lever, dont deux semblent prioritaires et sont développés plus loin dans ce rapport (cf. 2.2 *Vers une approche globale et intégrée*) :

- **Comment aborder la problématique de la contamination des réseaux trophiques et comment la relier à la contamination du milieu ?**
- **Comment identifier et caractériser les « effets des contaminants » ?**

### 2.1.2 S'appuyer sur des sites ateliers de référence.

Pour répondre à ces deux questions, les experts sollicités ont proposé de s'appuyer sur des **sites ateliers de référence**. Ces sites permettent en effet de mutualiser et concentrer les moyens afin d'apporter des réponses qui peuvent être étendues à d'autres secteurs géographiques. Deux sites, ont été plus largement étudiés en Méditerranée française : **la baie de Marseille** et **la Rade de**





**Toulon** (12 projets concernés : APREM, Blue-POLUT COMATIC, CONTAMPUMP, IBISCUS, IMPRECI, DROPLETT, METFLUX, METOPHYTO, PREVENT, SCOTTI, METROC). Il est proposé donc de faire évoluer l'une de ces zones d'intérêt au rang de site atelier « de référence » sur la contamination chimique en Méditerranée. La centralisation des efforts de recherche permettrait de répondre plus efficacement à des questionnements scientifiques prioritaires et d'accélérer le développement d'innovations méthodologiques.


### 2.1.3 S'appuyer sur des réseaux d'observation existants.

Les réseaux d'observation se placent dans une démarche à long terme. Leur objectif principal est d'acquérir des données pertinentes et systématiques sur des paramètres mesurés *in-situ* pour en suivre les évolutions. Les informations sont alors mises à disposition auprès d'un large public sans avoir nécessairement une finalité opérationnelle de court ou de moyen terme (*e.g.* prise en compte dans un processus de décision). Ces données, en particulier les données biologiques, peuvent néanmoins être utilisées en appui à l'interprétation de données issues de la surveillance de la contamination chimique. Il existe différents types de services : les services nationaux d'observation (SNO) labellisés, les services d'observation (SO) d'établissements publics, les réseaux d'observation, les systèmes d'observation et d'expérimentation au long terme pour la recherche en environnement (SOERE) labellisés et les infrastructures de recherche (IR) du Ministère en charge de l'enseignement supérieur et de la recherche.

Dans le contexte de CONTACT, quatre réseaux d'observation méditerranéens ont été sélectionnés pour intégration au processus de surveillance : **SOMLIT**, **COAST-HF**, **PHYTOBS** et **T-MEDNET** (tableau 8). Il est à noter que le réseau CALOR n'a pas été identifié lors des différentes réunions des experts mais apporte au même titre que le réseau T-MEDNET des données de température essentielles. Les trois premiers services d'observation (CNRS-INSU/Ifremer/Université, en demande ou labellisés SNO) dit "réseaux élémentaires" font partie de l'infrastructure de recherche littorale et côtière (ILICO) créée en 2016, qui vise à observer et comprendre les milieux et les écosystèmes côtiers et marins dans leur globalité. Il est préconisé d'utiliser les données issus de ces réseaux pour l'interprétation des résultats des réseaux de surveillance de la contamination chimique en Méditerranée. Pour un maximum de cohérence dans l'interprétation des résultats, **il serait nécessaire de rapprocher autant que possible des points de la surveillance « chimique » de ceux des RSO**. Ce rapprochement doit néanmoins conserver la cohérence la stratégie spatiale de la surveillance de la contamination chimique en Méditerranée.

Tableau 8. Présentation des principaux réseaux d'observation d'intérêt pour la surveillance de la contamination chimique en Méditerranée : SOMLIT, COAST-HF, PHYTOBS, CALOR et T-MEDNET. Pour chaque réseau les objectifs, les paramètres et les sites suivis sont indiqués.

RESEAUX	REFERENTS	OBJECTIFS	PARAMETRES	SITES EN MED
<b>SOMLIT*</b> <i>(Service d'observation en milieu littoral)</i> 	Nicolas Savoye	Détecter les changements des écosystèmes côtiers et littoraux sur le long terme et quantifier les influences de la variabilité climatique et anthropique.	Ammonium ; Azote organique particulaire ; Carbone organique particulaire ; Chlorophylle a ; $\delta^{15}\text{N}$ ; $\delta^{13}\text{C}$ ; Matières en suspension ; Nitrates ; Nitrites ; Oxygène dissous ; Pico et nanoplancton ; pH ; Phosphates ; Température ; Salinité ; Silicium dissous et Profils CTD	[4] Banyuls/mer (SOLA) Marseille (SOLEMIO) Montpellier (BESSète) Villefranche/mer (EOL) ;
<b>COAST-HF</b> <i>(Coastal ocean observing system - High frequency)</i>  <a href="http://coast-hf.fr/">http://coast-hf.fr/</a>	Guillaume Charria (Ifremer) François Schmitt (CNRS)	Comprendre l'environnement côtier à multi-échelle au travers de l'analyse d'un ensemble de paramètres physiques et biogéochimiques.	Variables mesurées : Conductivité ; Direction des vagues ; Direction du vent ; Fluorescence ; Humidité relative ; Oxygène dissous ; PAR aérien ; Période des vagues ; pH ; Pression ; Pression atmosphérique ; Salinité ; Température de l'air ; Température de l'eau ; Turbidité ; Vitesse du courant ; Vitesse du vent	[6] Villefranche-sur-Mer (EOL), Marseille (SOLEMIO), zone Roustan embouchure du Rhône (MESURHO), Montpellier (BESSète), Perpignan (POEM), Banyuls-sur-Mer (SOLA) ;
<b>REPHYOBS*</b> <i>(Réseau d'observation du phytoplancton)</i>	Maud Lemoine (Ifremer) Pascal Claquin (Université de	Comprendre et améliorer la connaissance de la biomasse, de l'abondance et de la composition du phytoplancton marin des eaux côtières et lagunaires	réuni SOMLIT + REPHY : paramètres environnementaux + phytoplancton	[5] Banyuls-sur-Mer (SOMLIT), Bouzigues-Thau (REPHY), Marseille

	Caen-Normandie)	ainsi que du contexte hydrologique afférent.		(SOMLIT), Sète (point commun), Villefranche-sur-Mer (point commun) ;
<b>CALOR</b> (Suivi de la température en Méditerranée Française).  <a href="https://medtrix.fr/portfolio_page/calor/">https://medtrix.fr/portfolio_page/calor/</a>	Guilhem Marre (Andromède océanologie)  Julie Deter (MARBEC)	Mieux comprendre les données biologiques, faire la part de l'anthropique et de l'environnement et prédire l'impact du changement climatique sur la biodiversité marine.	Température de l'eau en continu à différentes profondeurs (entre -5 et -70m).	> 400 sites répartis sur l'ensemble du littoral méditerranéen français.
<b>T-MEDNET</b> ( <i>Tracking climate change effects in the Mediterranean</i> )  <a href="http://www.t-mednet.org">http://www.t-mednet.org</a>	Joaquim Garrabou  Institut de Ciències del Mar (Barcelone)	Comprendre les effets du changement climatique dans les écosystèmes côtiers marins en diffusant l'acquisition de protocoles de surveillance standard sur la température de l'eau de mer et les indicateurs biologiques à grande échelle et à long terme.	Température de l'eau de mer de surface.	50 sites répartis sur l'ensemble du littoral méditerranéen français.

SOMLIT et REPHYOBS s'intègrent désormais au dispositif PHYTOBS de l'infrastructure de Recherche Littorale et Côtière (IR ILICO, <https://www.ir-ilico.fr/Les-reseaux-elementaires/Fiches-d-identite-des-reseaux-elementaires/PHYTOBS>). Le volet DCE du REPHY fait partie du dispositif PHYTOBS.

## 2.2 Vers une approche globale et intégrée.

### 2.2.1 Appréhender la contamination des réseaux trophiques.

Il est fondamental de comprendre les processus écologiques qui régissent la structure et le fonctionnement des communautés pour tenter d'assurer la préservation et la gestion durable des écosystèmes. Parmi ces processus essentiels est compté l'ensemble des interactions d'ordre alimentaire entre les êtres vivants d'un écosystème, *i.e.* des premiers aux derniers maillons, représenté sous le concept de réseau trophique. Les réseaux révèlent généralement des interactions trophiques complexes directes ou indirectes, simultanées ou retardées, et présentant des réponses aux fluctuations de l'environnement souvent non linéaires (Frontier 1999). Ce sont également des voies de transfert privilégiées des contaminants dans les milieux marins. Pour aborder la problématique de la contamination chimique, il est donc primordial d'en étudier le fonctionnement, *i.e.* les multiples sources qui les alimentent et leur interconnexion. En Méditerranée française, plusieurs études se sont penchées sur la question du transfert des contaminants dans les RT (*e.g.* CAREMED, CONTAMPUMP, COSTAS, MERLUMED, MERITE-HIPOCAMPE, METROC, SCOTTI). La plupart des études se sont concentrées sur les réseaux trophiques pélagiques, étudiant des espèces de niveaux trophiques intermédiaires à élevés ou d'intérêt économique (*e.g.* le merlu, la sardine, l'anchois, *etc.*). Plus récemment, elles se sont

intéressées aux premiers maillons trophiques et à leur rôle dans le transfert des contaminants au sein des réseaux trophiques. Malgré l'apport considérable de ces travaux, plusieurs questions restent aujourd'hui sans réponse, comme par exemple l'influence d'un couplage benthopélagique sur le transfert de contaminants entre réseaux ou encore le processus de bioaccumulation chez certains organismes encore peu pris en compte.

Les RdS tels qu'ils sont conçus actuellement proposent une analyse des concentrations chimiques dans le biote (*i.e.* les bivalves et les poissons) sans fournir d'image globale du transfert des contaminants à l'échelle de l'ensemble d'un réseau trophique. Bien qu'il soit impossible de suivre en routine l'intégralité des compartiments de l'ensemble des réseaux à l'échelle de la Méditerranée, il semble maintenant nécessaire de mieux prendre en compte le fonctionnement des réseaux dans le suivi pour aller plus loin dans l'interprétation des résultats. A ce titre, le choix des compartiments / espèces suivis devrait être plus guidé par la pertinence des liens trophiques pour une vision plus intégratrice de l'état de santé du milieu.

### **Identifier les réseaux trophiques « types »**

De multiples réseaux trophiques, plus ou moins interconnectés, existent en Méditerranée et tous ne peuvent bien évidemment être pris en compte dans le cadre d'une surveillance de la contamination chimique. Il est donc proposé de cibler deux grands réseaux trophiques « types ». Ce choix s'est appuyé sur le travail réalisé par Bănaru et al. (2013), qui met en évidence le fonctionnement des principaux RT dans le Golfe du Lion à l'aide d'un modèle Ecopath GoL (niveaux trophiques 1 à + 4). Des réseaux représentant à la fois des systèmes benthiques et planctoniques, et couvrant à la fois la zone côtière et le large ont été privilégiés (figure 2).

Réseau type 1 : RT pélagique, MO particulaire / zooplancton « herbivore » / planctonophages carnivores (une espèce plateau/large) / piscivores (une espèce plateau/large).

Réseau type 2 : RT benthique, MO sédimentaire / macrophyte (1 espèce palatable) / bivalves suspensivores + 1 crustacé benthique / carnivore intermédiaire (une espèce plateau/large) / carnivore supérieur (une espèce plateau/large).

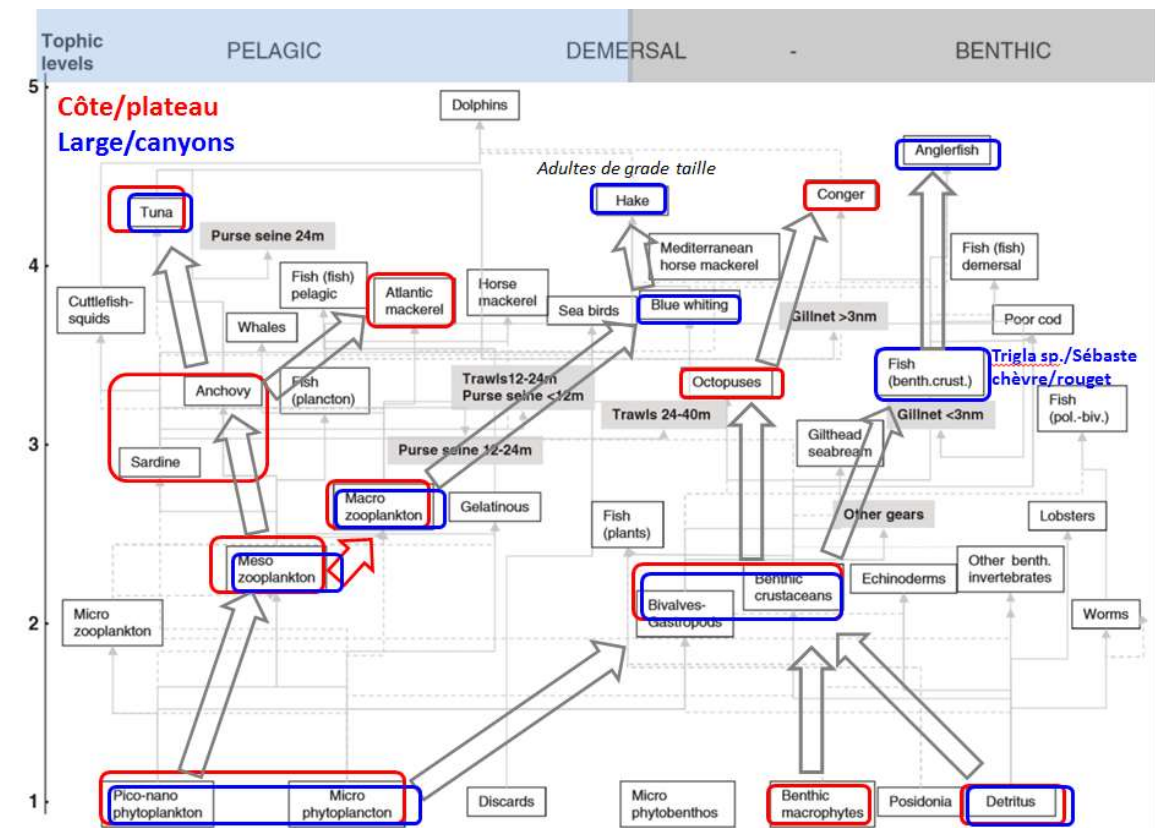


Figure 2. Structure des réseaux trophiques pélagiques, démersaux et benthiques. Les liens entre les différents compartiments indiquent les flux trophiques : flèches continues pour les flux principaux et flèches en pointillés pour les flux moins importants (Bănaru et al. 2013).

Le choix des espèces à échantillonner devra reposer sur deux critères principaux : leur ubiquité et leur importance en termes de biomasse et de flux trophiques. Celles proposées dans le modèle Ecopath GoL et présentées dans la figure 2 ci-dessus couvriraient 69 % de la biomasse du RT et 84 % des débarquements du GoL (Bănaru et al. 2013) et seraient donc à retenir dans le cadre d'une surveillance de la contamination chimique. Les avantages d'une telle approche pour les futurs RdS sont multiples :

- L'échantillonnage de groupes/espèces manquants précédemment (*e.g.* plancton) ;
- Une meilleure représentativité des groupes benthiques et de leurs sources ;
- L'échantillonnage des prédateurs supérieurs et de grandes classes de taille ;
- Des espèces comparables à des campagnes passées (*e.g.* tests DCSMM de 2015).

Il est donc proposé donc de retenir les espèces présentées dans la figure 2 pour suivre la contamination chimique dans les deux réseaux types identifiées.

L'intégration dans le suivi des premiers maillons trophiques, en particulier le pico/nanoplancton et le zooplancton de 200/300  $\mu\text{m}$ , est pour les experts sollicités une priorité. En effet, leurs rôles trophiques (*i.e.* une « ligne de base » indispensable pour estimer le positionnement trophique des autres compartiments) et fonctionnels (*i.e.* cette « pompe biologique » est un facteur clé dans la séquestration et donc dans le transfert des substances vers les maillons supérieurs) sont essentiels, comme l'ont démontré plusieurs travaux récents (*e.g.* DROPLETT, MERITE-HIPPOCAMPE). Le rôle du compartiment planctonique (phyto et zooplancton) lors des transferts

de contaminants par voie trophique est d'ailleurs abordé dans le cadre de différents projets conduits en Méditerranée (HIPPOCAMPE, CONTAMPUMP et DROPLETT). Un effort d'échantillonnage sur ce compartiment devra donc être fait.

### ***Echantillonner un réseau trophique***

Avant tout échantillonnage en routine lors de campagnes de surveillance il est nécessaire de répondre à diverses problèmes méthodologiques et techniques déjà identifiées pour certaines :

- l'échantillonnage du compartiment planctonique pose la question de la séparation efficace des classes de tailles, de la quantité de matière disponible et de la contamination possible des échantillons lors des phases de prélèvement et de pré-traitement ;
- l'échantillonnage des crustacés benthiques se heurte souvent à la faible efficacité des techniques de prélèvement et quantité de matière disponible ;
- l'échantillonnage des poissons se révèle parfois difficile à cause d'un échantillonnage du sex-ratio et des classes de tailles potentiellement déséquilibré. Option envisagée : solliciter les pêcheurs en plus des campagnes scientifiques.

Pour toutes ces raisons, il est vivement recommandé d'utiliser les protocoles d'échantillonnages développés et testés dans les projets scientifiques cités précédemment. L'utilisation de protocoles homogènes et éprouvés permettra de gagner du temps sur la mise en place de stratégies robuste de surveillance de la contamination chimique.

### ***L'apport de la modélisation***

La complexité du fonctionnement des réseaux trophiques peut être appréhendée par des outils numériques comme les modèles trophiques écosystémiques indicateurs d'un fonctionnement global (*e.g.* modèles ECOPATH, OSMOSE). Nous avons vu précédemment l'intérêt d'utiliser ces modélisations comme support de décision pour mettre en place une stratégie de surveillance. Les processus de transfert des contaminants vers et dans les réseaux trophiques sont également difficiles à appréhender, et certains modules ajoutant la dimension de transfert des contaminants dans les RT pourraient être très utiles (*e.g.* modèles ESCROC, ECOTRACER).

Ainsi, en parallèle de la mise en place d'une stratégie d'échantillonnage adaptée, il est recommandé d'approfondir les travaux de développement d'un ou plusieurs modèles de fonctionnement global couplé à un modèle de transfert de contaminant. Le développement d'un tel modèle à l'échelle adaptée à la surveillance devra nécessairement passer par une étude spécifique.

## 2.2.2 Identifier et caractériser les effets des contaminants sur les organismes et le fonctionnement des écosystèmes

Une analyse chimique permet de révéler la présence et de mesurer la concentration de différents contaminants dans un échantillon. En revanche, elle ne permet pas toujours de connaître la toxicité aiguë *versus* chronique de ces polluants vis à vis des organismes, ni d'évaluer les interactions entre les différents polluants ("effets en mélange" ou "effets cocktail"). Lors d'une analyse écotoxicologique, l'effet est mesuré. C'est pourquoi, il est recommandé de réaliser les

deux types d'analyses de manière complémentaire pour faire une évaluation du risque chimique dans l'environnement (Poisson et al. 2011). Evaluer l'impact des contaminants sur la santé des organismes et écosystèmes aquatiques demeure néanmoins difficile en raison de la présence de multiples facteurs de stress et la complexité des écosystèmes. *In situ*, l'influence de facteurs environnementaux sur les réponses biologiques à la pollution, ou les interactions entre les substances toxiques présentes dans les matrices marines (effets "en mélange" ou "effets cocktail") limite la compréhension des effets biologiques (MEDCIS 2019). En Méditerranée française, seules quelques études très récentes se sont intéressées à la question de « l'effet » (e.g. IMPRECI, METOPHYTO, METROC, SELIMED), et encore beaucoup de points restent à approfondir, comme par exemple les mécanismes d'impact des contaminants chimiques sur les organismes et les communautés (modes d'action, type de toxicité, interactions entre polluants et échelles d'étude) ou encore la relation entre les substances chimiques et les biomarqueurs classiques (effet des paramètres environnementaux et des mélanges de polluants).

Dans le domaine de la surveillance de l'environnement, l'écotoxicologie peut être appréhendée par deux approches : d'une part l'écotoxicologie prédictive ou préventive et d'autre part l'écotoxicologie rétrospective (Poisson et al. 2011). Cette dernière consiste à comprendre et estimer, *a posteriori*, l'effet d'un ou plusieurs contaminants sur l'écosystème et a pour objectif la mise en place de réponses adaptées à diverses pollutions afin de protéger l'environnement. Elle gouverne donc la mise en place de réseaux et est l'approche qui semble la plus appropriée pour la surveillance en Méditerranée. Ainsi, il est proposé de :

- faire de l'écotoxicologie un réseau de première intention en tant qu'outil de dépistage ;
- d'évaluer à la fois le potentiel toxique dans le milieu (e.g. REMTOX) et d'appréhender les effets dans le biote ;
- d'interpréter de façon conjointe les données acquises sur plusieurs paramètres, *i.e.* approche intégrée des indicateurs DCSMM 2019 « Etat de santé des bivalves », « Etat de santé des poissons », « Etat de santé des gastéropodes » ;
- de lier les descripteurs de la DCSMM D1 (diversité) et D8 (contaminants) autour de la question des pressions cumulées.

### **Les outils d'écotoxicologie**

L'intégration de l'écotoxicologie dans la surveillance devrait avant tout se faire au travers de l'utilisation de multiples outils complémentaires fiables recommandés par l'ICES et MEDPOL, dont la liste optimale serait amenée à varier au cas par cas.

Les bioessais (ou biotests de toxicité) : ces tests *in vitro* et *in vivo* reposent sur l'exposition d'organismes vivants à un ou plusieurs paramètres (e.g. substances chimiques, rayonnements), pour lesquels des effets sont recherchés (e.g. mortalité, taux de fécondation/d'éclosion, développement embryonnaire, croissance des populations, changements métaboliques ou physiologiques). Pratiquées en laboratoire, ces expérimentations normalisées ne reflètent pas l'état de santé des organismes vivant dans le milieu. Ils servent à déterminer les doses toxiques et il peut s'agir de tests létaux, ou sub-létaux basés sur l'appréciation d'effets indésirables sur les individus (Perez et al. 2000). En intégrant l'ensemble de la contamination chimique d'un site, les bioessais sont plutôt des outils d'appréciation du potentiel toxique du milieu qui ne mettent pas en évidence d'effet spécifique sur les organismes. Ils permettent, tels des systèmes d'alarme,

d'évaluer des risques de contamination en dépistant différentes sources de polluants, et ainsi d'enclencher des mesures directes de contrôle. Ils permettent également d'établir des valeurs de référence utiles à la mise en place de réglementations par les instances de gestion (Wernersson et al. 2015). Parmi les plus utilisés, certains bioessais *in vitro* sont considérés comme très sensibles car ils mesurent les effets à un niveau organisationnel bas. Ils conviennent particulièrement pour un criblage et des applications automatisées à haut débit, et peuvent être ajoutés à l'ensemble d'outils analytiques pour un coût relativement réduits. Ces outils possèdent de nombreux avantages (*e.g.* répondent aux considérations éthiques actuelles, sont réalisables sur beaucoup de matrices, requièrent de petites quantités d'échantillon, nécessitent un temps d'exposition court) et quelques inconvénients (*e.g.* systèmes étudiés très simplifiés par rapport à la complexité des organismes entiers).

Les biomarqueurs : ce sont des paramètres biochimiques, cellulaires, physiologiques ou comportementaux observables et / ou mesurables dans un organisme prélevé ou transplanté (encagé) dans le milieu naturel, afin de diagnostiquer l'exposition et/ou l'impact d'une contamination sur site (Depledge 1994 ; Lagadic *et al.* 1997). Leur mesure permet un suivi temporel et spatial (en particulier sur des espèces sessiles ou peu mobiles) de l'état de santé des individus, dans la mesure où l'on dispose d'un référentiel des niveaux attendus dans des conditions biotiques définies (espèce, stade de vie, maturité sexuelle, saison-température, *etc.*). Ils ont été largement développés à partir des années 1980 pour répondre au besoin de caractérisation de la pression chimique sur les milieux naturels et de mise en évidence de perturbations précoces (Garric 2009). Ils sont généralement classés en biomarqueurs d'exposition, lorsqu'ils signent l'activation de mécanismes de régulation intrinsèques au métabolisme de l'organisme (qui jouent alors un rôle de système d'adaptation et de défense), ou en biomarqueurs d'effet, qui diagnostiquent un dépassement, éventuellement transitoire des capacités de régulation de l'organisme avec des conséquences sur la viabilité (cellule, tissu, individu). (Rapport biomonitoring MEDPOL ; Galdies 1999 ; Vasseur et Cossu-Leguille 2003 ; Ramade 2007). De nos jours, plusieurs biomarqueurs fiables disponibles existent aux échelles moléculaires et biochimiques ou, pour des résultats plus intégrés, à l'échelle de l'individu. Il est toutefois plus compliqué de remonter à l'échelle des populations et des communautés et ces outils d'interprétation ne sont pas toujours bien développés (seuils). Par ailleurs, il existe peu de biomarqueurs reliés à des composés ou groupes de composés de manière spécifique. Enfin, en raison de la nature complexe des réponses biologiques (*e.g.* variabilité des statuts physiologiques des organismes au moment de l'échantillonnage, interactions entre substances), une extrême prudence doit être exercée lorsqu'on interprète les résultats de la surveillance.

Pour une utilisation en routine des analyses écotoxicologiques, il est recommandé d'utiliser en priorité des outils existants fiables pour lesquels nous disposons déjà d'une bonne connaissance sur leur sensibilité, sur les effets de facteurs confondant et sur la signification de la réponse, comme par exemple les biotests REMTOX et 2 à 3 biomarqueurs bien connus (annexe 3). Il apparaît primordial de continuer à poursuivre en parallèle les études sur les éléments d'interprétation de ces outils, tels que les seuils de « Bon Etat Ecologique » (BEE) pour différentes espèces voire pour différentes zones d'études, l'étude des facteurs confondants pouvant impacter d'autres biomarqueurs mesurés ou encore l'interprétation conjointe des résultats des différents biomarqueurs/bioessais.



A long terme il pourrait être envisagé de développer d'autres méthodes innovantes et multiplier ainsi les outils. L'écotoxicoprotéomique par exemple pourrait offrir la possibilité d'examiner la physiologie globale des organismes soumis aux xénobiotiques, mais aussi d'obtenir un bilan biochimique, physiologique et / ou à l'échelle de l'organisme reflétant l'état de la pollution dans l'environnement (Gouveia et al. 2019) en une seule expérience. Pour une utilisation en routine, plusieurs limites devront être évaluées au préalable : le coût financier, la lourdeur méthodologique sur le terrain, l'interprétation de l'effet réel sur la protéine. L'approche écologique, avec des mesures de changements de fonctions observés à des niveaux d'organisation biologique plus élevés (population et / ou communauté) devrait également être explorée. L'indice SPEcies At Risk (SPEAR) s'est par exemple révélé très sensible à des groupes particuliers de contaminants tels que les pesticides et relativement indépendant des facteurs de confusion (Wernersson et al. 2016).

## 3 Engager une évolution des réseaux de surveillance

### 3.1 Réévaluer les objectifs de la surveillance

Face à de nouvelles réglementations, de nouvelles problématiques environnementales, de nouvelles molécules, mais aussi avec le progrès des techniques et des outils, la surveillance doit évoluer pour rester pertinente. Cette évolution ne peut cependant se faire qu'à condition que la surveillance continue d'être opérationnelle, qu'elle réponde à ses objectifs, qu'elle s'adapte au contexte budgétaire et que les séries temporelles soient respectées.

#### **Répondre aux attentes de la société**

Les besoins sociétaux en termes de politiques de gestion des milieux sont grandissants et font appel notamment aujourd'hui à la nécessité d'accorder les actions et d'accéder plus facilement à l'information. A l'image de ce qui a déjà été engagé depuis plusieurs années, la surveillance devrait donc continuer à :

S'intégrer dans un cadre législatif et réglementaire défini : afin d'être encore plus optimisée, la surveillance devrait veiller à une plus grande harmonisation de l'approche régionale par bassin, permettant de cibler les enjeux et les spécificités méditerranéennes, avec les objectifs des directives européennes DCE et DCSMM ;

Soutenir la recherche et le développement : en réponse à ce besoin d'interaction forte entre la recherche et la surveillance, les campagnes des suivis devraient être considérées comme des supports techniques au développement et au test de méthodes/outils/stratégies de recherche, et les données qui en résultent comme des sources de documentation pour certaines études nécessitant des séries temporelles et spatiales larges. Des données de surveillance ont d'ailleurs déjà été régulièrement utilisées dans plusieurs travaux scientifiques sur la caractérisation des pressions anthropiques à l'échelle du bassin (*e.g.* Andral et al. 2011) ou sur l'étude de l'apport des grandes métropoles à la mer (programmes européens FP7 PERSEUS et ERA-NET MERMAID).

#### **Améliorer la pertinence et fiabiliser le diagnostic de l'état chimique**

Dans la perspective d'une évolution progressive mais cohérente de la surveillance, les campagnes récurrentes se doivent d'affiner à chaque occurrence le diagnostic de la contamination chimique. Cela se peut se faire au travers :

- de l'intégration de nouveaux dispositifs de prélèvements et d'analyses ;

- de la considération des maillons clés contrôlant le fonctionnement des réseaux trophiques (*i.e.* le compartiment planctonique) ;

- de l'intégration des effets des contaminants au travers d'analyses écotoxicologiques lors de l'évaluation d'un état écologique ;

- d'une réflexion continue sur l'amélioration de la liste des substances à considérer : élargir la surveillance à toutes les sources de contamination de la côte au large (telluriques, maritimes et atmosphériques), suivre les recommandations de priorisation des substances « d'intérêt émergent » en milieu littoral (appui du Réseau de Surveillance Prospective RSP\_volet « littoral », Amouroux et al. 2020 et de la Cellule Analyse des Risques Chimiques en milieu marin - ARC de l'Ifremer) en ciblant les molécules spécifiques à la Méditerranée (*e.g.* antibiotiques, néonicotinoïdes, nanoparticules, molécules spécifiques du trafic maritime, AERMC 2020), et repenser les analyses sous un angle « couples matrices-contaminants » ;

- d'un travail de standardisation des approches choisies : travail normatif, bancarisation et mise à disposition des échantillons et des données brutes/interprétées stockées sous des formats homogènes accessibles sur demande au public.

Ces recommandations ont été mises en œuvre dans le cadre de la campagne de surveillance de la contamination chimique SUCHIMED 2021.

### 3.2 Faire évoluer la stratégie opérationnelle.

La façade Méditerranéenne s'étend sur 1 795 km de côtes, de la frontière italienne à l'est à la frontière espagnole à l'ouest, incluant la Corse. Elle couvre 9 départements et 3 régions. Etant donné l'étendue de la zone, il est indispensable d'adapter la répartition des stations échantillonnées afin que celle-ci soit à la fois représentative, adéquate et homogène. Pour un réseau idéal, un premier zonage d'analyse permet l'identification des sites à surveiller, en fonction des apports en contaminants et de la dynamique locale qui régit leur dispersion. Puis un zonage plus technique de localisation procède au géoréférencement de ces premiers éléments d'analyse (référentiel géographique). Un zonage en unités spatiales fonctionnelles, en cohérence avec le premier, permet de délimiter les espaces adaptés et favorables à la gestion du littoral. Enfin, un dernier zonage de synthèse de zones sensibles, vulnérables ou à risques peut restituer des informations spécialisées et intégrées. Dans un contexte de sources ciblées de contamination (zones industrielles et portuaires, zones à forte densité urbaine, apports par les fleuves côtiers), associé à des caractéristiques hydrodynamiques particulières (quasi absence de marées), comme c'est le cas en Méditerranée Occidentale, la démarche par station actuellement pratiquée dans les principaux RdS (ROCCH et RINBIO) paraît la plus pertinente. Néanmoins, cette approche « station » ne permet pas d'avoir une vue d'ensemble de l'état des masses d'eaux et rend délicate la mise en cohérence entre les données de surveillance écologique et les informations de contamination chimique à différentes échelles spatiales. Le principe de base adopté à l'échelle de des districts « Rhône et côtiers méditerranéens » et « Corse » est d'instaurer des contrôles de surveillance dans des secteurs bien définis par rapport aux rejets du bassin versant, qu'ils soient naturels ou anthropiques. Ces contrôles s'appuient sur les notions de « champs » définis au niveau du bassin (figure 3, Witkowski et al. 2017) :

- le champ proche : quelques centaines de mètres de la côte, zone directement influencée par un apport ;
- le champ moyen : zone de dilution des divers apports d'un secteur ;
- le champ lointain : zone du large ou hors de l'influence directe des apports d'un secteur.

Cette approche est une bonne méthode pour définir la stratégie spatiale d'un dispositif de surveillance de la contamination chimique mais, pour ce qui concerne la surveillance biologique, reste très dépendante de la capacité de déplacement des organismes.

Cette stratégie spatiale a démontré sa pertinence comme outil de gestion et de rapportage.

Les futures campagnes de surveillance devront continuer à s'appuyer sur les stations les plus pertinentes des réseaux de mesures existants, tout en déployant si nécessaire de nouveaux points de mesure ; une sélection faite en fonction des apports liés aux contaminations industrielles et urbaines littorales majeures et aux zones de trafic maritime intense (cf. recommandation CE) en

fonction des groupes d'organismes ciblés (pélagiques ou sessiles). Compte tenu des résultats des campagnes passées, il est recommandé d'alléger l'effort de surveillance dédié au champ moyen en termes de fréquence temporelle et d'augmenter celui de la surveillance directe des pressions dans le champ proche. Ce report de surveillance ne devra néanmoins pas remettre en cause les obligations réglementaires liées à l'application des différentes directives, mais devra permettre d'affiner le diagnostic tout en dégageant des marges de manœuvre pour accompagner l'évaluation des effets de la contamination sur le fonctionnement des écosystèmes marins.

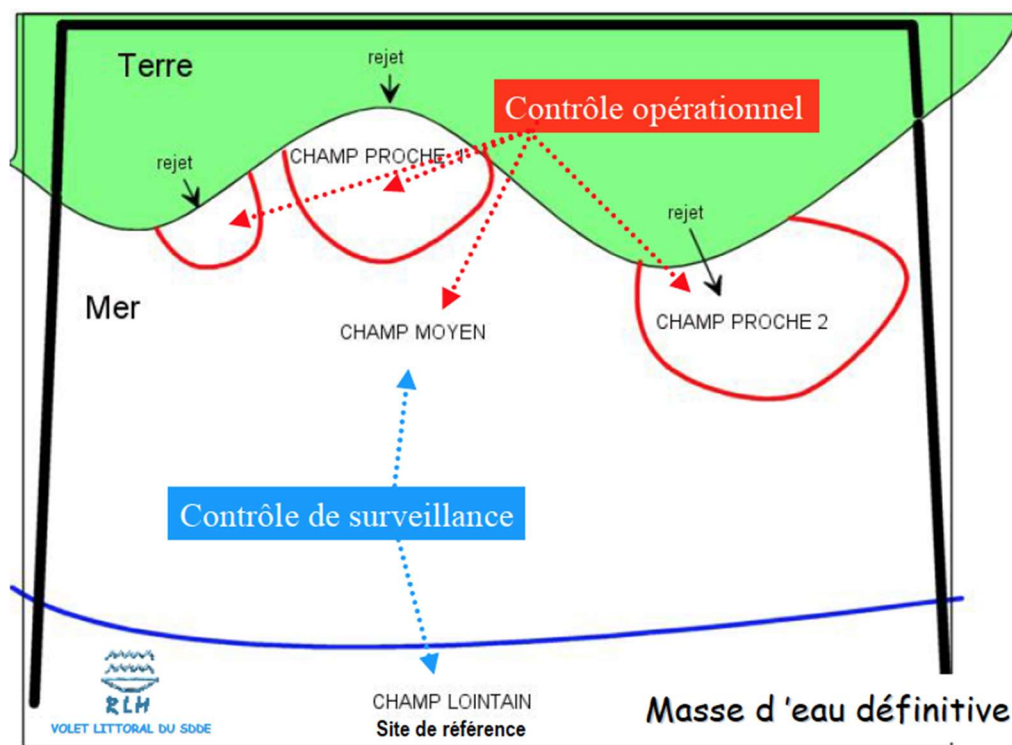


Figure 3. Détermination des points de contrôles dans les différents champs (Witkowski et al. 2017).

Enfin, l'un des biais de l'approche temporelle des méthodes de surveillance consiste à avoir une fréquence d'acquisition de données qui ne serait pas adaptée aux fluctuations propres de l'indicateur. Cela pose avant tout la question de la pertinence de la méthode retenue ; celle-ci doit pouvoir évoluer sans remettre en cause la pertinence du réseau, tout en préservant la valeur des séries acquises précédemment. La stratégie temporelle proposée jusque-ici de campagnes de prélèvements tous les trois ans semble également appropriée, aussi bien en termes de dynamique de contamination du milieu et des organismes marins (*i.e.* temps d'accumulation des contaminants et d'apparition des effets) que de mise en œuvre et d'opérabilité du suivi (*i.e.* séquence de prélèvements, analyses chimiques et traitement des données). Certaines adaptations peuvent cependant être envisagées comme le découpage régional des campagnes et leur réalisation sur des cycles de 3 ans comme pour les réseaux TEMPO et RECOR sous MO de l'AERMC.

### 3.3 Propositions d'évolution des réseaux de surveillance actuels

Même s'ils ont prouvé leur efficacité et leur robustesse, quelques évolutions pour les réseaux actuellement opérés en Méditerranée sont proposées.

#### Réseaux de surveillance dans le milieu :

Les réseaux d'analyse chimique du milieu (ROCCH SED surtout, et REPOM dans une moindre mesure) font référence au regard de leur ancienneté, de leur emprise spatiale et de la qualité de leurs données. Cependant ils se limitent aujourd'hui au seul compartiment sédimentaire et leur stratégie spatiale n'est pas toujours cohérente avec celle des autres réseaux de surveillance de la contamination chimique en Méditerranée, notamment avec la stratégie décrite au paragraphe 3.2. Des biais analytiques (*i.e.* LD et LQ non respectées) et une faible qualité des données ont également été soulignées lors de plusieurs évaluations récentes du REPOM (Copil REPOM 2018 et 2019, DCSMM 2018). Les échantillons du ROCCHSED sont conservés dans une banque d'échantillons et sont disponibles pour des analyses ultérieures.

#### Propositions d'évolution

- ⇒ Rapprocher les stratégies spatiales des réseaux ROCCH Sed et RINBIO en Méditerranée ;
- ⇒ Définir des stations dans le champ proche permettant de suivre des pressions identifiées et des stations dans le champ moyen permettant de renseigner sur l'état global des masses d'eau ;
- ⇒ Définir un protocole standardisé (incluant les LD et LQ) pour le REPOM ;
- ⇒ Faire évoluer la liste des contaminants suivis et la limiter aux seules substances les plus pertinentes dans cette matrice. Cette évolution doit se faire au regard des listes de chaque réseau de surveillance et prendre en compte les contaminants d'intérêt émergent.

#### Réseaux de surveillance dans le biote :

Bioindicateur « bivalves » : les réseaux actuels (RINBIO et ROCCH MV) sont robustes, pérennes et le stockage de leurs échantillons au sein d'une mytilothèque laisse l'opportunité de faire des analyses ultérieures. L'efficacité de leurs stratégies spatiales est totalement dépendante de la méthodologie appliquée. L'utilisation de populations naturelles de coquillages contraint l'échantillonnage du ROCCH MV à une faible étendue spatiale du littoral méditerranéen (*i.e.* zones sans échantillons), limitée à la zone la plus côtière, alors que la répartition spatiale du RINBIO est plus optimisée par rapport aux spécificités du territoire grâce à la méthode des transplants. En revanche, alors que le biomonitoring passif ne nécessite qu'une logistique légère à moyenne (*i.e.* surtout de l'échantillonnage à pied), le biomonitoring actif est quant à lui plus lourd à mettre en place (*i.e.* échantillonnage avec bateau et plongeurs, deux campagnes de prélèvements pour pose/relève). Par ailleurs, les bivalves transplantés ont besoin d'un certain temps pour atteindre un état d'équilibre avec le milieu. En fonction des organismes, des contaminants considérés (organiques ou métaux) et des milieux, on retrouve dans la littérature un temps estimé compris entre 20 et 129 jours. Pour le réseau RINBIO, ce temps a été estimé à trois mois. Or, cette estimation a été réalisée à l'origine du réseau RINBIO à la fin des années 90

(Casas et al. 2008). Depuis cette période, de nombreuses nouvelles molécules sont apparues dans les listes de surveillance et une réévaluation du temps nécessaire à l'atteinte de l'équilibre pour ces nouvelles substances mais aussi pour les contaminants émergents doit être conduite. Enfin, les deux réseaux RINBIO et ROCCH MV, opérés par l'Ifremer, se basent sur la mesure de contaminants dans des mollusques bivalves et tendent à répondre à des objectifs proches. Une meilleure articulation entre ces deux réseaux semble nécessaire afin d'éviter les redondances.

#### Propositions d'évolution

- ⇒ **Renforcer l'articulation entre les réseaux RINBIO et ROCCH MV et ne conserver qu'un réseau environnemental unique de suivi de la contamination chimique dans les moules en Méditerranée ;**
- ⇒ **Etudier les cinétiques de contamination et de décontamination pour les nouveaux contaminants et les contaminants émergents. Adapter la durée d'exposition des moules engagées en conséquence ;**
- ⇒ **Faire évoluer la liste des contaminants suivis et la limiter aux substances les plus pertinentes dans cette matrice. Cette évolution doit se faire au regard des listes de chaque réseau de surveillance et prendre en compte les contaminants d'intérêt émergent.**

*Bioindicateur « poissons »* : un réseau d'importance existe en Méditerranée (CONTAMED), se basant sur deux campagnes récentes (campagnes 2012-2013 et 2017-2018). Celui-ci a été complété par le réseau national COREPH sans que la différence entre les deux réseaux n'apparaisse clairement. Cette lisibilité doit être améliorée. Par ailleurs, pour des raisons pratiques, ces réseaux se concentrent aujourd'hui sur le Golfe du Lion et la façade Est Corse. Une évolution de la stratégie spatiale est donc nécessaire en vue d'une couverture plus large de la sous-région marine Méditerranée Occidentale. Par ailleurs, il reste à stabiliser le protocole ainsi que les critères de sélection des espèces (e.g. ubiquité, forte biomasse et abondance, intérêt commercial, niveau trophique, suivi antérieur). Plusieurs pistes sont proposées pour améliorer ce protocole.

#### Propositions d'évolution

- ⇒ **Mettre en œuvre un rapprochement des réseaux CONTAMED et COREPH ;**
- ⇒ **Revoir la stratégie spatiale du réseau CONTAMED et étendre les suivis à la Région Sud-PACA et à l'ouest de la Corse ;**
- ⇒ **Redéfinir la liste des espèces suivies en fonction de leur importance en termes de biomasse et de flux trophiques ;**
- ⇒ **Cibler des espèces représentatives des deux réseaux trophiques types identifiés dans ce document ;**
- ⇒ **Intégrer les premiers maillons des réseaux trophiques dans les suivis (phytoplancton et zooplancton) ;**
- ⇒ **Faire évoluer la liste des contaminants suivis et la limiter aux seules substances les plus pertinentes dans cette matrice. Cette évolution doit se faire au regard des listes de chaque réseau de surveillance et prendre en compte les contaminants d'intérêt émergent.**

#### Bilan sur la mesure « écotox » :

La stratégie de surveillance des effets des contaminants chimiques en Méditerranée reste à construire. Le réseau REMTOX apporte une indication du potentiel toxique du milieu mais ne témoigne pas des effets physiologiques sur les organismes *in situ*. Il nécessite par ailleurs une stabilisation de son protocole de prélèvement, d'analyse et de la campagne support, ainsi qu'un travail d'interprétation des résultats. Le dispositif en cours d'élaboration SELIMED quant à lui repose sur un essai limité spatialement et temporellement (campagne 2016 concentrée sur un site atelier devant l'embouchure du Rhône), et a donc encore besoin de mûrir avant d'envisager une extension à l'échelle de l'ensemble de la Méditerranée. Pour la Méditerranée, une approche en deux étapes a été suggérée pour les suivis à large échelle basés sur les organismes encagés (moules ou poissons) :

- ✓ Etape 1 : utilisation d'un biomarqueur sensible, large spectre, peu spécifique et peu onéreux permettant une alerte précoce. La stabilité de la membrane lysosomale est proposée ;
- ✓ Etape 2 : sur les stations montrant un effet en étape 1, utilisation d'une batterie complète de tests à définir.

Il est proposé d'expérimenter cette approche.

#### Propositions d'évolution

- ⇒ **Maintenir le réseau REMTOX permettant d'évaluer le potentiel toxique des sédiments ;**
- ⇒ **Utiliser le support des campagnes RINBIO pour déployer un réseau de surveillance des effets des contaminants à deux étapes conformément aux recommandations du MedPol ;**
- ⇒ **Poursuivre les travaux de R&D en lien avec le développement d'outils écotoxicologiques adaptés. Les travaux devront prendre en compte les spécificités du contexte méditerranéen.**

## Conclusions

A travers une série de cinq réunions de travail organisées à l'initiative de l'AERMC et de l'Ifremer, des recommandations à la fois sur la surveillance de la contamination chimique en Méditerranée mais également en termes d'études à poursuivre ont été émises. Certaines de ces recommandations ont été mise en œuvre lors de la campagne de surveillance SUCHIMED (surveillance de la contamination chimique) 2021. D'autres, ne sont pas encore mûres et nécessitent d'approfondir des travaux. La recherche et la surveillance sont intimement liées et l'expérience CONTACT montre qu'il est difficile de tracer une ligne étanche entre les deux. La poursuite des réflexions entamées au cours de cette action permettra de garantir la cohérence des actions entreprises au niveau régional, en améliorer la synergie et l'articulation avec le niveau national. Pour cela, un rapprochement fort entre les opérateurs de la surveillance de la contamination chimique, les experts régionaux, les experts nationaux et la coordination nationale DCSMM D8 est à prévoir.



## Références bibliographiques

- Amiard, J. C. (2011). *Les risques chimiques environnementaux : Méthodes d'évaluation et impacts sur les organismes*. Lavoisier, 782 pp.
- Andral Bruno, Didier Claisse et Peggy Sargian (2012). Caractéristiques et état écologique : Méditerranée occidentale. ÉTAT PHYSIQUE ET CHIMIQUE, Caractéristiques chimiques, Substances chimiques problématiques. Rapport Scientifique pour l'évaluation initiale au titre de la Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin, 9 p.
- Andral Bruno, Fiandrino Annie, Roque D'Orbcastel Emmanuelle, Pairaud Ivane, Galgani Francois, Gonzalez Jean-Louis, Bouchoucha Marc (2012). Partenariat Ifremer – Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse : Recherche – Surveillance – Expertise. 15 années au service de la Méditerranée. RST.ODE/LER-PAC/12-20. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00116/22711/>
- Andral Bruno, Cresson Pierre, Bouchoucha Marc, Fabri Marie-Claire, Marco-Miralles Françoise, Chavanon Fabienne, De Vogue Benoist, Baldi Yoann (2014). "Contamination chimique de la chaîne trophique en Méditerranée programme RETROMED ". Synthèse du volet cartographique CONTAMED. Ifremer, RST.ODE/LER-PAC/14-24, 40 pp.
- Basilico L., Staub Pierre-François et Perceval Olivier (2013). La contamination chimique des milieux aquatiques Outils et méthodes pour le diagnostic et l'action. Synthèse du séminaire Surveiller, évaluer et réduire les contaminations chimiques des milieux aquatiques des 17 et 18 juin 2013, Les Rencontres de l'ONEMA, 39 p.
- Bouchoucha Marc, Tomasino Corinne, Brach-Papa Christophe (2018). Rapport de synthèse de la campagne d'évaluation de la qualité chimique de sédiments (ROCCHSED) 2016 en Méditerranée. Ifremer, RST.ODE/UL/LER-PAC/18-07, 39 pp.
- Burgeot, 1994. Surveillance des effets biologiques par la mesure de l'activité enzymatique EROD. Surveillance du milieu marin. Travaux du RNO. Edition 1994, p.9-24.
- Burger, J. (2006). Bioindicators: a review of their use in the environmental literature 1970–2005. *Environmental Bioindicators*, 1(2), 136-144.
- Casas et al., 2008, Relation between metal concentration in water and metal content of marine mussels (*Mytilus galloprovincialis*): Impact of physiology, *Environmental Toxicology and Chemistry*, Vol. 27, No. 7, pp. 1543–1552
- Cossa, D. (1989). A review of the use of *Mytilus* spp. as quantitative indicators. *Oceanologica acta*, 12(4), 417-432.
- Cresson Pierre, Marco-Miralles Françoise, Chavanon Fabienne, De Vogue Benoist, Baldi Yoann, Bouchoucha Marc (2014). Position trophique et niveaux de contamination (mercure, PCB et PBDE) dans le merlu (*Merluccius merluccius*) dans le golfe du Lion et en Corse. RST.ODE/LER-PAC/14-18, 67 pp.
- CETMEF (2010). Bilan national du REPOM sur 10 ans de suivi, 90 p.
- Farrington, J.W., Tripp, B.W., Tanabe, S., Subramanian, A., Sericano, J.L., Wade, T.L., and Knap, A.H. (2016). Edward D. Goldberg's proposal of "the mussel watch": reflections after 40 years. *Marine pollution bulletin*, 110(1), 501-510.
- Galgani Francois, Baldi Yoann (2010). Evaluation de la toxicité globale des sédiments du littoral du Languedoc Roussillon, du Var et des Alpes Maritimes par un bio essai : Développement larvaire de l'huître creuse *Crassostrea gigas* en présence d'élutriats de sédiments. EST.DOP/LER-PAC. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00028/13930/>
- Goldberg, E.D. (1975). The mussel watch: a first step in global marine monitoring. *Mar. Pollut. Bull.*, 6, 111-114.

- Gonzalez Jean-Louis, Munaron Dominique, Andral Bruno, Sargian Peggy, Tomasino Corinne, Guyomarch J., Van Ganse S. (2011). Campagne DCE 2009 : Utilisation des échantillonneurs passifs (DGT, POCIS, SBSE) pour l'évaluation au titre de la DCE de l'état chimique des eaux côtières méditerranéennes. RST.ODE/LER-PAC/11-04
- Ifremer (1994). RNO. Surveillance du Milieu Marin. Travaux du Réseau National d'Observation de la qualité du milieu marin. Edition 1994. <https://archimer.ifremer.fr/doc/00314/42553/>
- Joanny Michel (1997). Surveillance de l'environnement littoral et côtier. Ifremer - Quae.
- Martínez-Gómez, C., Campillo, J. A., León, V., Fernández, B., and Benedicto, J. (2007). Biomonitoring strategy to assess the effects of chemical pollution along the Iberian Mediterranean Coast: Present state and future development. *ICES. CM I*, 11.
- Mauffret Aourel, Chiffolleau Jean-Francois, Burgeot Thierry, Wessel Nathalie, Brun Melanie (2018). Evaluation du descripteur 8 « Contaminants dans le milieu » en France Métropolitaine. Rapport Scientifique pour l'évaluation 2018 au titre de la DCSMM.
- Mauffret A, O. Bajt, J. Bellas, O. Chalkiadaki, M. Dassenakis, L. Giannoudi, E. Giubilato, I. Hatzianestis, A. Marcomini, T. Paramana, C. Tsangaris, J. Tronczynski, C. Zeri, 2019. Report on the approaches implemented in the Mediterranean countries for GES descriptor 8 - Proposition of a road map for a better harmonization, 72 pp.
- Mauffret Aourel, Wessel Nathalie, Bouchoucha Marc (2019). Sélimed 2019 : Campagne d'étude dédiée aux effets biologiques de la contamination chimique dans le Golfe du Lion. Cahier des charges technique. Rapport interne Ifremer, 19 pp.
- Mille Tiphaine, Mauffret Aourel, Baudrier Jerome, Wessel Nathalie, Bouchoucha Marc (2018). Etude de la contamination chimique chez quatre espèces de poisson en Méditerranée. Rapport final des actions 2017-2018 du dispositif de suivi CONTAMED. Ifremer, RST.ODE/UL/LER-PAC/18-04, 62 pp.
- Plan d'Action pour le Milieu Marin 2016-2021
- Perez T., SARTORETTO S., SOLTAN D., CAPO S., FOURT M., DUTRIEUX E., VACELET J., HARMELIN J.G., REBOUILLON P. (2000). Etude bibliographique sur les bioindicateurs de l'état du milieu marin. *Système d'évaluation de la Qualité des Milieux littoraux – Volet biologique*. Rapport Agences de l'Eau, 4 fascicules, 642 pp.
- Plan Bleu (2007). Énergies Renouvelables, Utilisation Rationnelle de l'Énergie et Aide au Développement en Méditerranée. 72 p.
- Poisson E., Cédric Fisson, Claude Amiard-Triquet, Thierry Burgeot, Jérôme Couteau, Gaël Dur, Fabrice Durand, Joëlle Forget-Leray, Julie Letendre, Sami Souissi, Benoit Xuereb (2011). Effets de la contamination chimique. Des organismes en danger ? Fascicules Seine-Aval, 70 p.
- Rainbow, P. S. (1995). Biomonitoring of heavy metal availability in the marine environment. *Marine pollution bulletin*, 31(4-12), 183-192.
- Ramade, F. (1977). *Ecotoxicologie*. Paris: Masson, 205 p.
- REMPEC, 1994. An overview of maritime transport in the Mediterranean. Meeting of Focal Points of the Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea. Malta, 4–8 October, report pp. 1–21.
- Rodriguez y Baena, A.M., Thébault, H., (2007). CIESM Mediterranean Mussel Watch Program Phase II; towards an Increased Awareness of Marine Environmental and Seafood Quality. Marine Sciences and Public Health. Some Major Issues-Geneva 27–30 September 2006. CIESM Workshop Monographs No. 31, pp. 87–89 ([http://www.ciesm.org/marine/programs/RyB\\_and\\_Thbault\\_2007.pdf](http://www.ciesm.org/marine/programs/RyB_and_Thbault_2007.pdf)).
- Roose P., Albaigés J., Bebianno M.J., Camphuysen C., Cronin M., de Leeuw J., Gabrielsen G., Hutchinson T., Hylland K., Jansson B., Jenssen B.M., Schulz-Bull D., Szefer P., Webster L., Bakke T., Janssen C. (2011). Chemical Pollution in Europe's Seas: Programmes, Practices and Priorities

- for Research, Marine Board Position Paper 16. Calewaert, J.B. and McDonough N. (Eds.). Marine Board-ESF, Ostend, Belgium, 208 pp.
- The MerMex Group, et al. "Marine ecosystems' responses to climatic and anthropogenic forcings in the Mediterranean." *Progress in Oceanography* 91.2 (2011): 97-166.
- Tripp, B.W., Farrington, J.W., Goldberg, E.D., Sericano, J., 1992. International mussel watch: the initial implementation phase. *Mar. Pollut. Bull.* 24, 371–373.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement / Plan d'action pour la Méditerranée (PNUE/PAM) (2009). ETAT DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT EN MEDITERRANEE. Plan Bleu. B.P. 18019 Athènes, Grèce, 208p.
- Programme des Nations Unies pour l'environnement / Plan d'action pour la Méditerranée (PNUE/PAM) (2012). Etat de l'environnement marin et côtier de la Méditerranée. PNUE/PAM - Convention de Barcelone, Athènes, 100 p.
- Vasseur, P., & Cossu-Leguille, C. (2003). Biomarkers and community indices as complementary tools for environmental safety. *Environment International*, 28(8), 711-717.
- Wernersson A-S, et al. (2015). The European technical report on aquatic effect-based monitoring tools under the water framework directive. *Environmental Sciences Europe*, 27(1), 7.
- Wessel N. (2019). ANALYSE CRITIQUE DES PDS DCSMM 1ER CYCLE AU REGARD DU BEE REVISE, DES RESULTATS DE L'EVALUATION DCSMM 2018, ET DE L'EVALUATION COMMUNAUTAIRE 2017. Programme thématique « Contaminants ». ODE/VIGIES/DCSMM/2019.
- Witkowski F., Andral B., Tomasino Corinne (2017). Campagne RINBIO 2015. Surveillance des niveaux de contamination chimique pour biomonitoring actif. Ifremer, RST.ODE/UL/LER-PAC/17-06, 70 pp.
- Zhou, Q., Zhang, J., Fu, J., Shi, J., & Jiang, G. (2008). Biomonitoring: an appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem. *Analytica chimica acta*, 606(2), 135-150.

## Annexes

Annexe 1. Détails des contaminants analysés dans le cadre des réseaux de surveillance ROCCH, REPOM, RINBIO, CONTAMED et CETAMED.

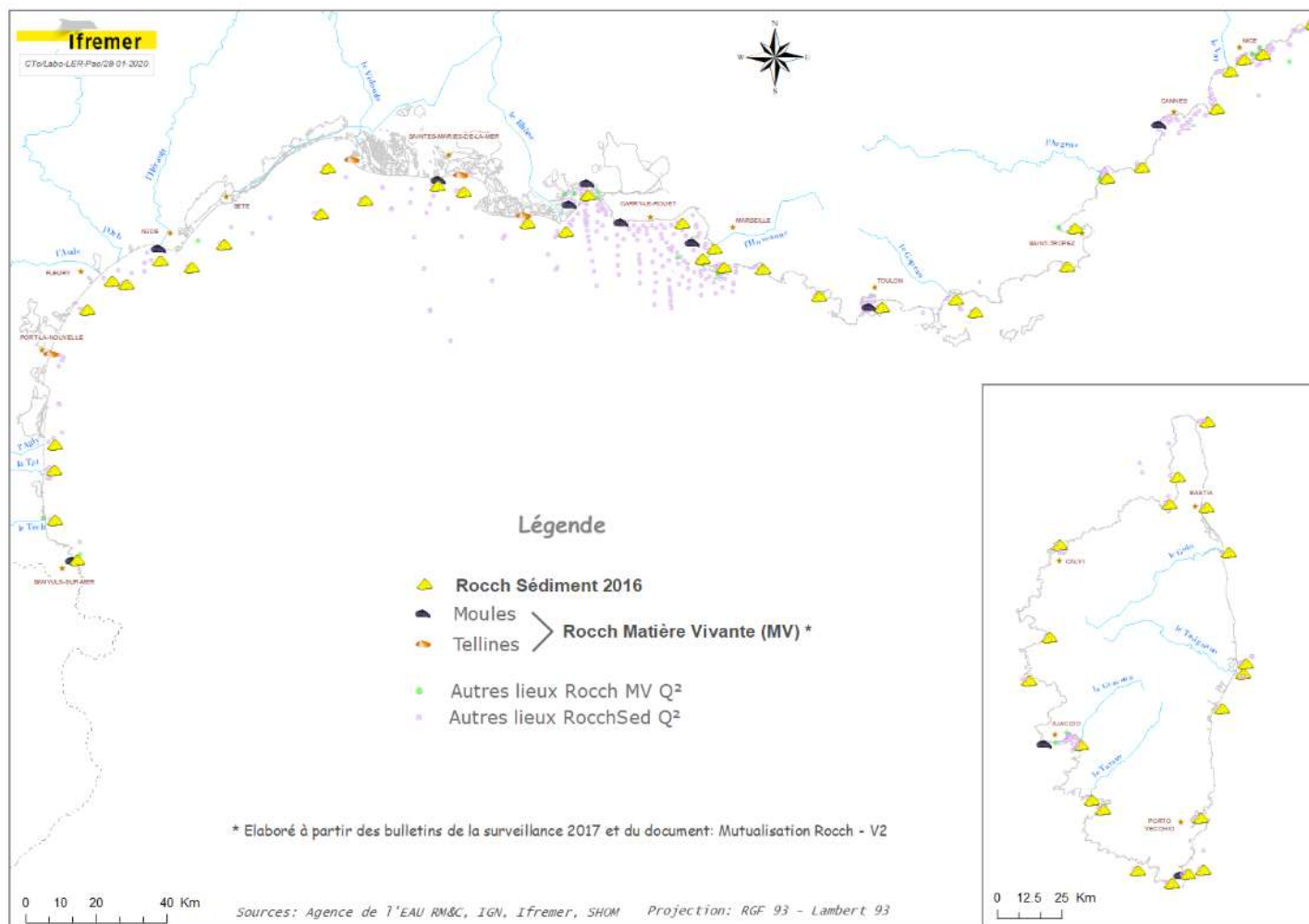
	<b>ROCCH</b>	<b>REPOM</b>	<b>RINBIO</b>	<b>CONTAMED</b>	<b>CETAMED</b>
<b>ETMs</b>	3 réglementés Cd, Hg, Pb ; 5 non réglementés Ag, Cr, Cu, Ni et Zn.	3 réglementés Cd, Hg, Pb 5 non réglementés As, Cr, Cu, Ni, Se et Zn.	3 réglementés Cd, Hg, Pb ; 5 non réglementés As, Cr, Cu, Ni et Zn.	15 ETMs (Al, As, Fe, Cd, Co, Cr, Cu, Mn Ni, Pb, Se, Ti, V, Zn) + Hg pour rouget	3 réglementés Cd, Hg, Pb ; 14 non réglementés Ag, Al, As, Cd, Cr, Co, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Se, Sn, V, Zn.
<b>HAPs</b>	Naphtalène, Fluorène, Phénanthrène, Anthracène, Acénaphthène, Acénaphtylène, Fluoranthène, Pyrène, Benzo(a)anthracène, benzo(a)pyrène, Chrysène, Benzo(a)pyrène, Dibenzo(a,h)anthracène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo(g,h,i)pérylène, Indéno(1,2,3-cd)pyrène	Acénaphthène, Anthracène, Benzo(a)anthracène, Benzo(a)pyrène, Benzo(ah)anthracène, Benzo(b)fluoranthène, Benzo(ghi)perylène, Benzo(k)fluoranthène, Chrysène, Dibenzo(ah)anthracène, Fluoranthène, Fluorène, Indéno(123cd)pyrène, Naphtalène, Phénanthrène, Pyrène	Benzo (b)fluoranthène, Benzo(k)fluoranthène, Benzo (a)pyrène, Benzo (ghi)pérylène, Indéno (1,2,3-cd) pyrène, Fluoranthène	29 polluants organiques (12 PCB dioxin-like ; PCB (CB28, CB 52, CB 101, CB 118, CB 138, CB 153, CB 180).).	Naphtalène Acénaphtylène Acénaphthène Fluorène Phénanthrène Anthracène Fluoranthène Pyrène Benzo(a)anthracène  Chrysène Benzo(b)fluoranthène  Benzo(k)fluoranthène  Benzo(a)pyrène Dibenzo(ah)anthracène Indéno(123cd)pyrène Benzo(ghi)perylène
<b>Organochlorés</b>	DDT, DDD, DDE,	TBT	DDT, DDD, DDE		DDT, DDD, DDE

	<p>PCB_congénères 28, 52, 101, 105, 118, 138, 153, 180</p> <p>8 pesticides : <math>\gamma</math>HCH (Lindane), <math>\alpha</math>HCH,</p>	<p>PCB congénères 28, 52, 101, 118, 138, 153, 180</p>	<p><i>HCH</i>, <math>\gamma</math>HCH (Lindane), <math>\alpha</math> <i>HCH</i></p> <p>PCB congeners CB28, CB31, CB35, CB52, CB101, CB118, CB138, CB153, CB180</p>		<p>15 pesticides : Lindane, Diazinon, Heptachlor, Aldrine, heptachlor-epoxide A et B, Dieldrine, Transchlordane, Isodrine, Endosulfan I et II, Endrine ;</p> <p>31 PCB_congénères CB20, CB31, CB28, CB18, CB44, CB52, CB95, CB92, CB101, CB60, CB87, CB151, CB136, CB149, CB118, CB105, CB153, CB141, CB138, CB187, CB183, CB128, CB174, CB177, CB156, CB180, CB170, CB201, CB196, CB195, CB194,</p>
<p><b><u>PBDE</u></b> <b><u>HBCDD</u></b> <b><u>PFC</u></b></p>	<p>10 ou 12 PBDE 3 HBCDD + organo-stanniques + autres molécules de la DCE.</p>			<p>PCDD : 2.3.7.8 - TCDD 1.2.3.7.8 - PeCDD 1.2.3.4.7.8 - HxCDD 1.2.3.6.7.8 - HxCDD 1.2.3.7.8.9 - HxCDD</p>	

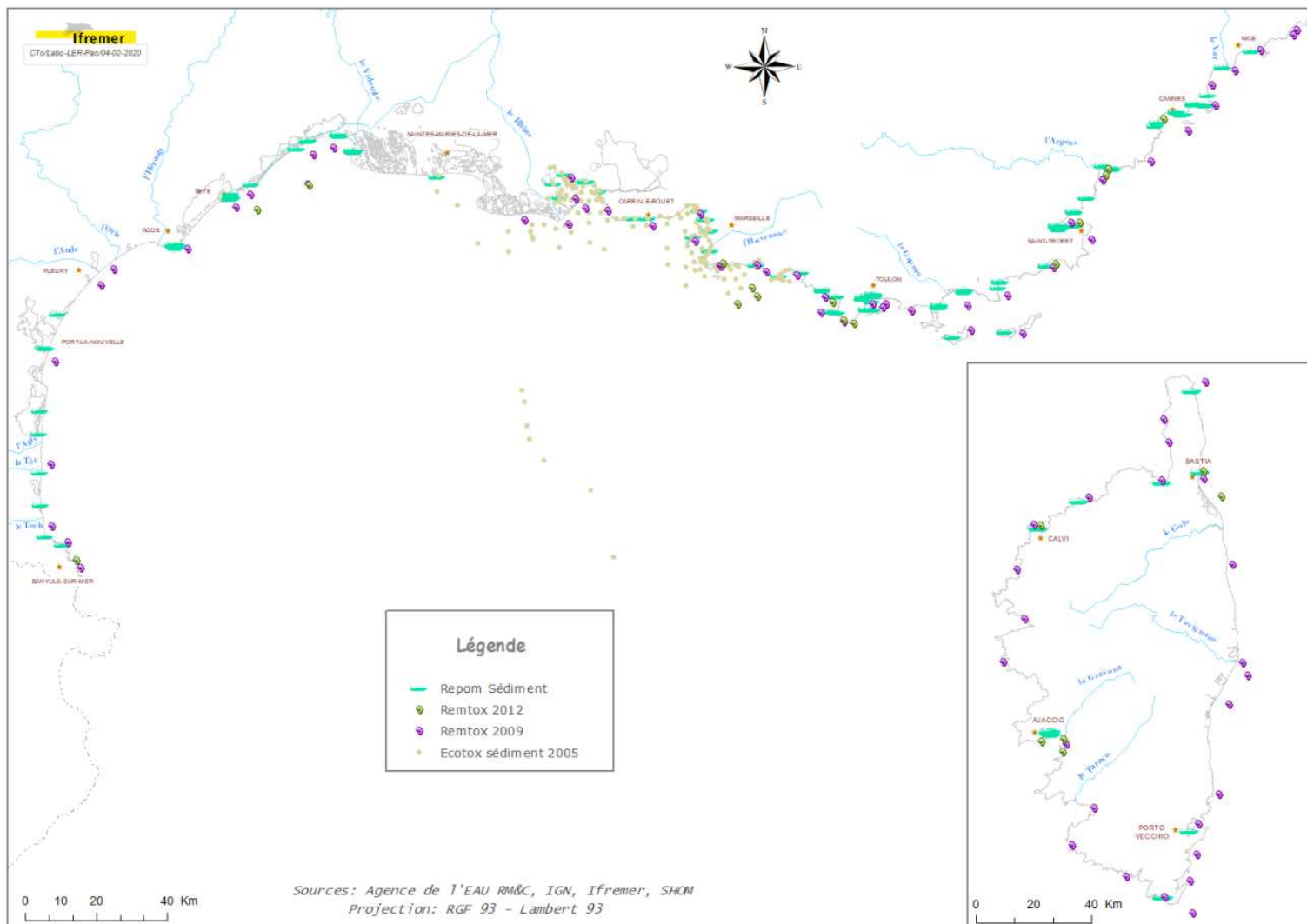
				1.2.3.4.6.7.8- HpCDD OCDD PCDF : 2.3.7.8 - TCDF 1.2.3.7.8 - PeCDF 2.3.4.7.8 - PeCDF 1.2.3.4.7.8 - HxCDF 1.2.3.6.7.8 - HxCDF 1.2.3.7.8.9 - HxCDF 2.3.4.6.7.8 - HxCDF 1.2.3.4.6.7.8 - HpCDF 1.2.3.4.7.8.9 - HpCDF OCDF	
--	--	--	--	---	--

Annexe 2. Cartographie des sites d'échantillonnage par réseau.

Annexe 2.a. Sites d'échantillonnage du ROCCH SED / ROCCH MV.

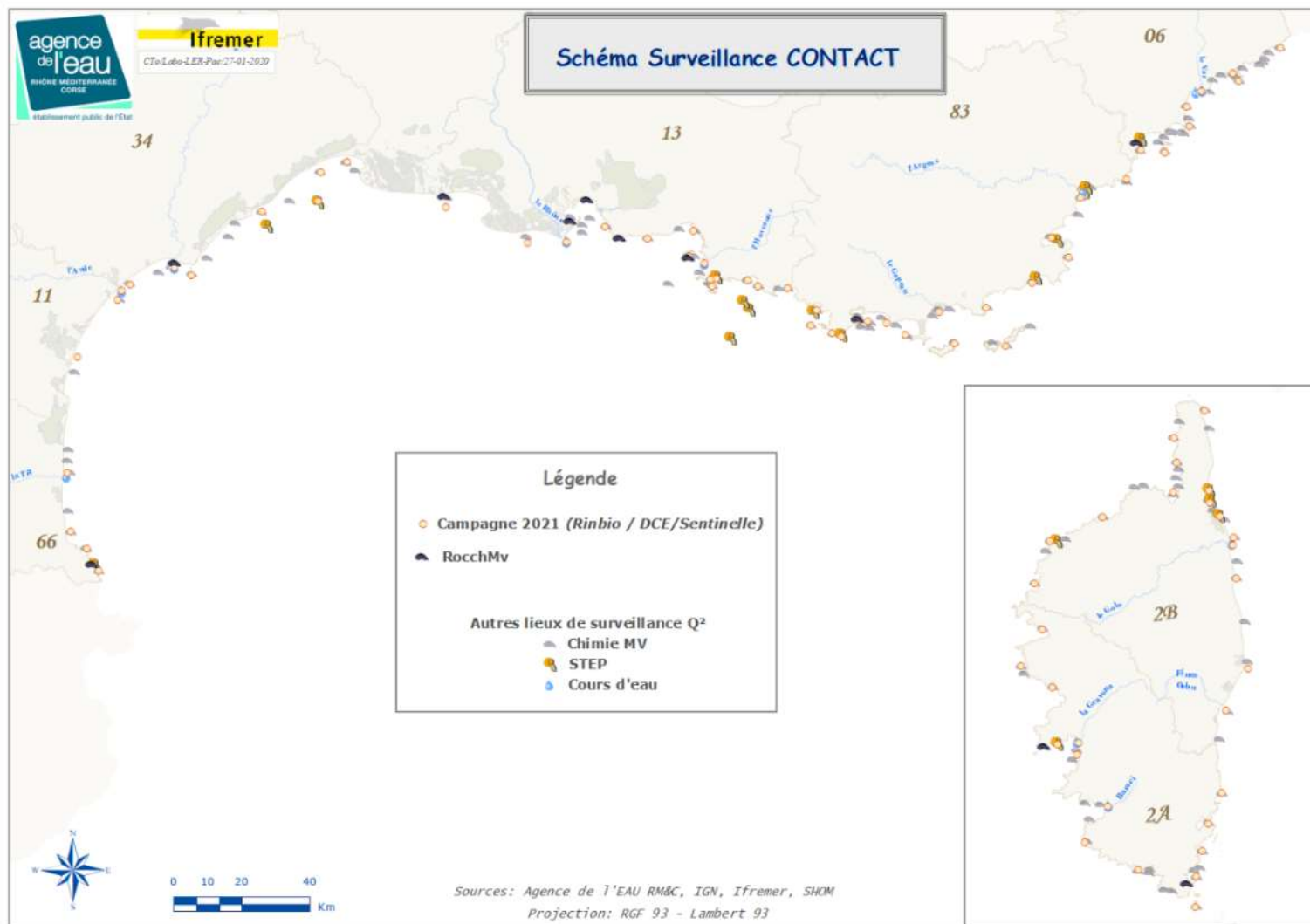


Annexe 2.b. Sites d'échantillonnage du REPOM et du REMTOX.

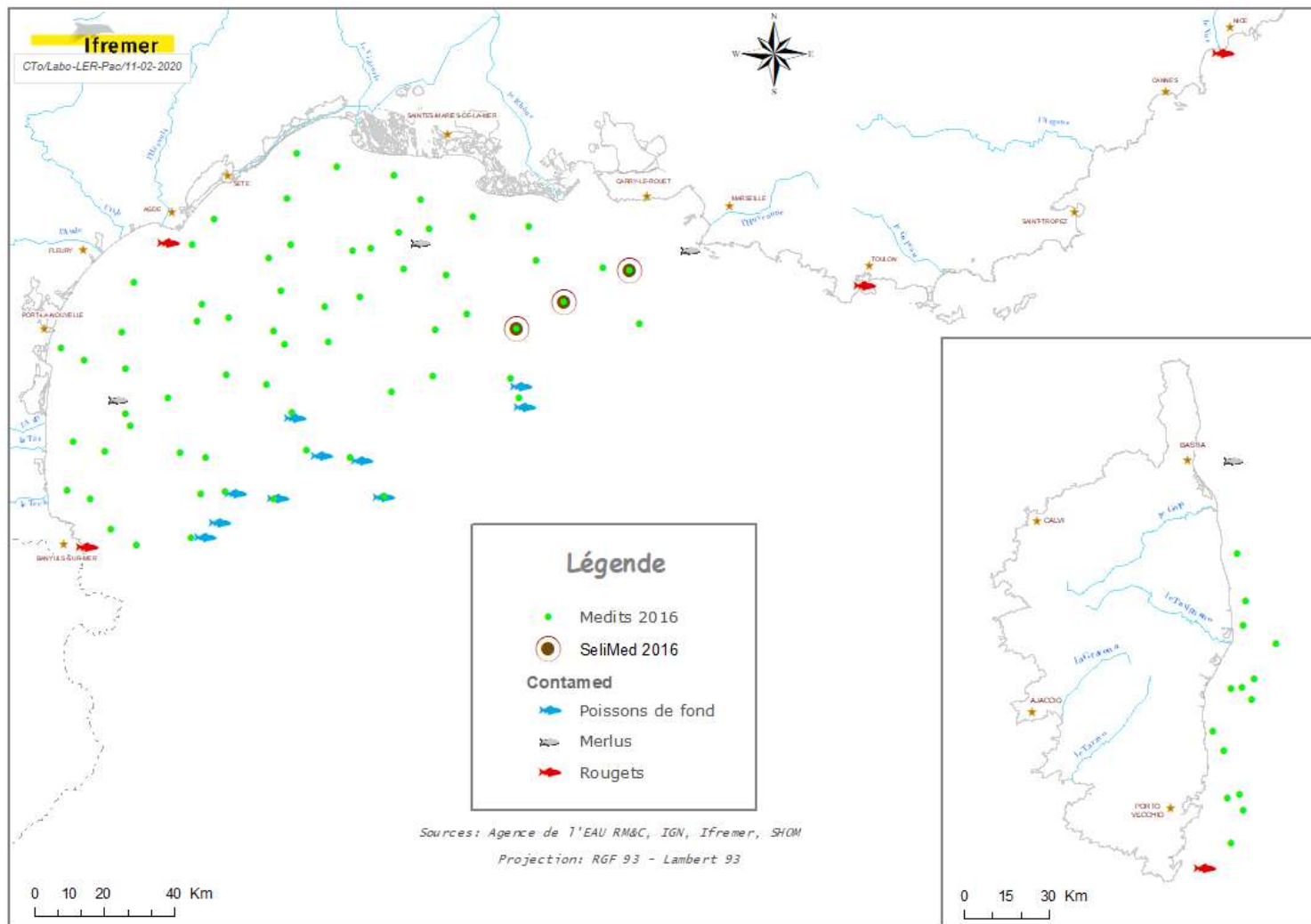




Annexe 2.c. Sites d'échantillonnage du RINBIO.



Annexe 2.d. Sites d'échantillonnage de CONTAMED et de SELIMED.



*Annexe 3 : liste des potentiels biomarqueurs pour une utilisation en routine des analyses écotoxicologiques.*

**Table 3 Biomarkers used in the integrated monitoring approach proposed by ICES and the Regional Seas Conventions**

<b>Biomarker</b>	<b>Description</b>	<b>Responds to</b>
EROD activity	Biotransformation enzyme induced by planar hydrocarbon	PCBs, PAHs and dioxin-like compounds
Acetylcholinesterase (AChE) activity	Enzyme implicated in nervous transmission	Organophosphates, carbamates and similar molecules
Vitellogenin (VTG) in male fish	A precursor of egg yolk, normally synthesized by female fish	estrogenic endocrine disrupting compounds
Metallothionein (MT)	Metal scavenger implicated in protection against oxidative stress	Heavy metals and inducer of oxidative stress
Amino-levulinic acid deshydratase (ALAD)	Enzyme implicated in amino-acid metabolism	Lead exposure
Lysosomal stability	General health, lysosomes play a key role in liver injury caused by various xenobiotics	Several classes of pollutants, including PAH, inducer of oxidative stress, metals and organochlorines
DNA adducts	Alteration of DNA structure able to disturb DNA function	Genotoxic compounds including PAHs and other synthetic organic compounds
Imposex biomarkers (e.g. VDSI) in molluscs	Imposition of male sex characteristics on female molluscs	TBT
PAH bile metabolites	PAH metabolites in bile/urine represent the final stage of the biotransformation process	Indirect indicator of PAH exposure
Liver histopathology	General indication about liver damage but can be diagnostic depending on the type of lesion	PAHs
Macroscopic liver neoplasms	Visible fish liver tumours	Cancer inducing substances; PAHs
Externally visible fish diseases	Overall organism health External investigations of fish, significant changes indicate chronic stress	Several classes of pollutants and pathogens
Intersex in fish	Presence of ovarian tissue in male fish gonads compromising reproductive capacity	estrogenic endocrine disrupting compounds
Micronucleus	Damage to genetic material of organisms; could affect their health and potentially also their offspring.	Substances causing chromosomal aberrations (clastogens)
Amphipod/fish embryo alterations	Embryo malformations (viviparous organisms)	Overall organism health; strong correlation observed between malformed embryos and concentrations of metals and organic compounds
Stress proteins	Early stage effects, including oxidative stress	Responds to many types of stress factors
Benthic diatom malformations	Malformations; overall organism health	Significant response to metals and several pesticides, but less to other priority substances
Comet assay	Sensitive tool to detect genetic damage	Substances causing DNA strand breaks
Mussel histopathology (gametogenesis)	Histological studies of, e.g. digestive gland and tube	Many groups of substances, including PAHs, PCBs and heavy metals
Stress on stress	Survival in air	Many groups of substances, including crude oil, copper ions and PCBs
Scope for Growth	Measures alterations in the energy available for growth and reproduction.	Many groups of substances, including di(2-ethylhexyl)phthalate (DEHP), aromatics, pentachlorophenol (PCP), copper, TBT and dichlorvos