

Bilan de la campagne de suivi des Espèces Exotiques Envahissantes marines dans le cadre du Réseau Alien Grand Ouest de 2020 à 2023

Pierre Sauleau,^{1*} Patrick Giraudeau² et Bruno Lebascle²

¹ Laboratoire de Biotechnologie et Chimie Marines, Université Bretagne Sud, EMR CNRS 6076, IUEM, 56100 Lorient, France

² Commission Environnement et Biologie Subaquatiques, CIBPL-FFESSM, 39 Rue de la Villeneuve, Centre d'Affaires la Découverte Bâtiment 1, 56100 Lorient

Résumé

Le Réseau Alien Grand Ouest est un programme de Recherche participative dédié au suivi des espèces exotiques marines et plus particulièrement aux espèces exotiques envahissantes. Il est issu d'une co-réflexion entre les chercheurs de l'Université de Bretagne Sud et les plongeurs de la Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-Marins. Pour les scientifiques, il s'inscrit dans la Loi de programmation de la recherche pour les années 2021 à 2030 et dans la stratégie nationale relative aux espèces exotiques envahissantes. Pour les plongeurs, il répond aux engagements de leur fédération en contribuant à la connaissance et la protection du milieu subaquatique. Cette étude présente le bilan de 3 années de suivis réalisées par les citoyens le long du littoral breton et ligérien en plongée, apnée, randonnée subaquatique ou lors de sortie sur l'estran. Toutes les données ont été extraites à partir du Carnet de Relevé d'Observations des Milieux Subaquatiques (CROMIS). A ce jour, plus de 11 000 observations de plus de 800 espèces subaquatiques ont été enregistrées sur près de 300 sites de plongée répartis le long des 3 000 km environ de littoral breton et ligérien. Les premiers résultats indiquent qu'un quart des sites de plongée héberge au moins une espèce exotique.

Mots clés : espèce non indigène ; espèce exotique envahissante ; alien ; espèce invasive ; recherches participatives ; sciences citoyennes ; CROMIS ; FFESSM ; Bretagne ; Pays de la Loire

* Email : pierre.sauleau@univ-ubs.fr

Introduction

Les Espèces Exotiques Envahissantes (EEE) représentent une grave menace pour la biodiversité, les services écosystémiques associés, l'économie mais également la santé humaine (IPBES, 2019 et 2023). En France métropolitaine, près de 350 espèces exotiques ou espèces non indigènes marines ont été rapportées parmi lesquelles 10 % sont considérées comme envahissantes (Massé et al., 2023). Rien que sur la façade Nord Atlantique - Manche Ouest, ce serait plus d'une centaine d'espèces exotiques qui menacerait les écosystèmes marins (Blanchard et al., 2010 ; Baffreau et al., 2018 ; Pezy et al., 2021 ; Massé et al., 2023). Les activités anthropiques via le trafic maritime et l'aquaculture sont les principales voies d'introduction des espèces exotiques. Aujourd'hui, dans un contexte de changements globaux, on s'attend à une modification de l'aire de répartition et de l'abondance de ces espèces (UICN, 2022). Dans le cadre des Stratégies Nationale et Régionale relatives aux EEE, il apparaît urgent de mettre à jour, renforcer et poursuivre l'acquisition de connaissances afin de proposer à terme des solutions de gestion de ces espèces exotiques marines ; mesures quasi-inexistantes à l'heure actuelle dans le milieu marin.

La surveillance des espèces exotiques est particulièrement propice au développement de programmes de Recherches participatives. L'impact de ces espèces sur les écosystèmes permet en effet de toucher plus facilement un large public déjà sensibilisé par l'effondrement de la biodiversité. Dans la continuité des réseaux Alien Corse, Alien Occitanie ou Alien Normandie, le Réseau Alien Grand Ouest (RAGO) est un programme de Recherches participatives inauguré le 09 octobre 2021 dans les locaux de l'Université de Bretagne Sud (UBS), à Vannes. Ce réseau est issu d'une véritable co-construction entre les milieux scientifiques et citoyen entre, d'une part, l'UBS et, d'autre part, la Commission Régionale Environnement et Biologie Subaquatique (CREBS) du Comité Interrégionale Bretagne Pays de la Loire (CIBPL) de la Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-Marins (FFESSM). De par son appartenance aux Recherches participatives tel que définies par la Région Bretagne (Sciences citoyennes, 2020), le RAGO ne se résume pas à une simple collecte de données par les citoyens selon un protocole imposé par les scientifiques. Il s'agit véritablement d'un programme coconstruit et partagé entre scientifiques et citoyens, de l'élaboration de l'hypothèse de recherche et de la problématique citoyenne à la valorisation des résultats en passant par la conception des protocoles de suivi. Il répond ainsi au principe du partage des connaissances avec et pour les citoyens, autour de la problématique des espèces invasives.

Ce réseau émane d'une réflexion commune entre scientifiques de l'UBS et plongeurs naturalistes de la CREBS. Pour les citoyens, il s'agit de répondre à une préoccupation majeure : quels sont les impacts de ces espèces exotiques sur les habitats marins ? S'agit-il de proliférations ponctuelles, cycliques ? Quelles peuvent-être les solutions pour y remédier ? Pour les scientifiques de l'UBS, l'hypothèse de recherche est que certaines espèces indigènes seraient potentiellement capables de résister face à la prolifération de ces espèces envahissantes en biosynthétisant des substances allélochimiques. Pour répondre à cette hypothèse scientifique et satisfaire les interrogations des citoyens, le programme RAGO a pour objectifs de :

- cartographier les espèces exotiques sur le littoral breton et ligérien afin de réactualiser leur répartition et suivre leur éventuelle expansion
- mesurer l'impact des espèces exotiques sur les habitats marins afin de répondre partiellement aux indicateurs D2C2 et D2C3 de la Directive Cadre sur le Milieu Marin (DCSMM)
- identifier les espèces indigènes potentiellement capables de résister face à la progression des EEE afin de proposer des stratégies de lutte biologique fondées sur la Nature. Ce travail de recherche scientifique fera l'objet d'un autre rapport.
- partager les connaissances entre scientifiques et citoyens
- développer une réelle « capacitation citoyenne » c'est-à-dire mobiliser les compétences des citoyens pour alerter, faire pression sur les politiques et/ou agir en prenant les mesures adéquates afin de préserver le milieu marin (Sauleau et al., 2021).

Le RAGO s'appuie notamment sur le déploiement du Carnet de Relevé d'Observations des Milieux Subaquatiques (CROMIS), un outil participatif accessible en ligne depuis juin 2020 et spécialement conçu par la FFESSM pour accompagner les plongeurs et les scientifiques dans la collecte et le partage de données d'observations naturalistes. CROMIS se présente sous la forme d'un carnet de plongée numérique où chaque plongeur, apnéiste ou randonneur subaquatique est invité à noter ses observations au cours d'une plongée sous-marine ou d'une sortie sur l'estran. Il s'adresse à tous les « observ'acteurs » qu'ils soient novices ou ayant déjà des connaissances robustes en biologie marine. Chaque observation faunistique ou floristique (près de 5 400 espèces, à ce jour) est reliée à la base de Données d'Observations pour la Reconnaissance et l'Identification de la faune et la flore Subaquatiques (DORIS), un autre outil participatif de la FFESSM. DORIS apporte un complément d'information quant à la biologie de l'espèce, sa description, son habitat, sa classification, etc. A ce jour, CROMIS comporte près de 146 000 observations naturalistes de 3 600 espèces différentes réalisées en Métropole et Outre-Mer. Ce rapport présente le premier bilan des observations naturalistes réalisées par ces « amateurs éclairés » vis-à-vis des espèces exotiques du littoral breton et ligérien recensées sur la plate-forme CROMIS entre 2020 et 2023 dans le cadre du Réseau Alien Grand Ouest.

Matériels et méthodes

Aire de l'étude.

Les observations d'espèces ou occurrences ont été réalisées le long du littoral breton et ligérien, de l'embouchure du Couesnon en baie du Mont-St-Michel jusqu'à l'entrée de la Sèvre Niortaise. Au total, il s'agit de près de 3 000 km de trait de côte auquel s'ajoutent les nombreuses îles, archipels, aber, golfe et ria qui bordent ce littoral. Les sites d'observations comprenaient des sites naturels (herbiers, champs de laminaires, champs de blocs, tombants rocheux, etc.) ou artificiels (épaves, digues, pontons, etc.).

Collecte des données

Les suivis ont été réalisés de façon opportuniste au cours de plongée loisirs. Brièvement, lors de leur plongée dite d'« exploration », les bénévoles avaient la possibilité de recenser les espèces observées, faune et flore confondues, et de noter les paramètres liés aux conditions de leur plongée : paramètres climatiques (température moyenne de l'eau en surface et au fond, courant, visibilité) et topographiques (profondeur moyenne, durée de la plongée). Toutes ces données ont été enregistrées grâce à l'outil de saisie CROMIS accessible aux licenciés de la FFESSM et autres plongeurs. La durée de plongée enregistrée dans CROMIS ne correspond pas à la durée d'observation réelle mais peut toutefois servir de référence pour calibrer l'effort d'observation. Pour résumer, CROMIS permettait de :

- géolocaliser les relevés par saisie manuelle ou par pointage sur site préexistant répertorié sur un fond cartographique
- noter la présence d'une espèce y compris une espèce exotique identifiée comme telle par un symbole mais également noter son absence
- joindre une photographie ou une capsule vidéo à chaque observation, optimisant ainsi les possibilités de validation des données par un tiers

Validation des données

Toutes les données ont fait l'objet d'un processus de validation en interne par un plongeur naturaliste de la FFESSM, bénévole, non professionnel, mais reconnu par ses pairs pour ses compétences dans la reconnaissance d'espèces. Ce vérificateur avait la possibilité d'utiliser la photographie jointe à l'observation via l'outil de saisie en ligne pour valider l'identification de l'espèce, en cohérence avec les paramètres écologiques des sites de plongée (type de milieu, relief, profondeur, support, etc.). En cas de détection de donnée erronée, le vérificateur avait pour consigne de communiquer à l'observateur concerné le rejet de la donnée et, lorsque cela était possible, d'indiquer la détermination correcte de l'espèce.

Choix des taxons ciblés.

A ce jour, le RAGO se focalise sur 46 espèces exotiques dont une quinzaine est considérée comme envahissante (Tableau 1). Ces espèces ont été sélectionnées et répertoriées dans CROMIS, à partir des caractéristiques suivantes :

- espèces marines et/ou saumâtres uniquement ; les espèces dulcicoles n'ont pas été retenues à ce stade du programme
- espèces rapportées dans la littérature comme invasives, envahissantes, établies ou à surveiller sur la façade Atlantique et Manche (Baffreau et al., 2018 ; Blanchard et al., 2010 ; Massé et al., 2023) afin d'évaluer leurs éventuels impacts sur les habitats.
- espèces reconnaissables par le plus grand nombre d'acteurs citoyens afin de minimiser le risque de confusion taxonomique et motiver les participants quel que soit leur niveau de connaissance. Il fallait donc à la fois des espèces relativement faciles à identifier pour le novice et d'autres suscitant la curiosité de plongeurs plus aguerris. Les Phyla des Cercozoa, des Myzozoa, des Nematoda et des Platyhelminthes n'ont pas été retenus.

- espèces de préférence répertoriées sur le site DORIS de la FFESSM permettant aux plongeurs d'avoir plus d'éléments concernant l'identification des espèces observées (i.e. morphologie, répartition et confusion possible). Lorsque les espèces observées n'étaient pas référencées dans DORIS, les plongeurs avaient la possibilité de déposer leurs propres photographies sous-marines pour validation.

Traitement et analyse des données

Au 15/10/2023, la base de données CROMIS répertoriait 14 730 observations naturalistes effectuées sur l'interrégion Bretagne-Pays de la Loire. A ce jour, le RAGO ne s'intéresse qu'aux espèces marines et/ou saumâtres. Les observations réalisées dans les départements de la Mayenne et de Maine-et-Loire n'ont donc pas été retenues. Seules les observations réalisées entre avril et octobre, de 2020 à 2023 ont été traitées ; 2020 étant l'année de mise en ligne de l'outil numérique CROMIS. La période comprise entre avril et octobre correspond à la période d'activité de la majorité des plongeurs. Toutes les observations réalisées au-delà de 35 m n'ont pas été retenues de façon à s'assurer d'un minimum de 10 minutes d'observation au fond tout en restant dans la courbe de sécurité des plongées. Les données de type « engins de pêche » du programme Fish&Click, enregistrées dans la base CROMIS, ont été exclues. Toutes les observations réalisées dans le cadre d'une exploration ou à la suite d'exercices de formation ou d'encadrement ont été réunies sous la terminologie de plongées d'« exploration » tandis que toutes les observations réalisées à pied sur l'estran, en randonnée subaquatique ou en apnée, ont été réunies comme des sorties « estran ». Au final, 11 160 observations ont été retenues et analysées. Les statistiques descriptives ont été effectués sur R avec RStudio (2023.06.0+421).

Tableau 1. Répartition des espèces exotiques marines par département le long du littoral Bretagne - Pays de la Loire.

Phylum	Espèce	Nom commun	Département					
			22	29	35	44	56	85
Annelida	<i>Ficopomatus enigmaticus*</i>	Cascaïl	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Hydroïdes dianthus</i>	Serpule nord-américaine	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Hydroïdes elegans</i>	Hydroïde élégant	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Arthropoda	<i>Amphibalanus amphitrite</i>	Balane amphitrite	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Amphibalanus improvisus</i>	Balane imprévue	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Austrominius modestus*</i>	Balane croix de Malte	P	NA	P	NA	P	NA
	<i>Eriocheir sinensis</i>	Crabe chinois à mitaines	NA	P	NA	NA	ABS	NA
	<i>Hemigrapsus sanguineus*</i>	Grapse sanguin	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Hemigrapsus takanoi*</i>	Crabe à pinceaux de Takano	P	NA	P	NA	NA	NA
	<i>Palaemon macrodactylus</i>	Crevette à gros doigts	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Rhithropanopeus harrisi</i>	Crabe de vase américain	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
Bryozoa	<i>Bugula neritina*</i>	Bugule brune	NA	NA	P	NA	P	NA
	<i>Schizoporella unicornis</i>	Schizoporelle unicorne	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Tricellaria inopinata*</i>	Bryozoaire inopiné	NA	NA	NA	NA	P	NA

	<i>Watersipora subatra</i>	Bryzoaire orange vif et noir à points noirs	NA	P	NA	P	P	NA
Chlorophyta	<i>Codium fragile</i>	Codium fragile	P	P	NA	P	P	NA
Chordata	<i>Botrylloides diegensis</i>	Botrylle doré	P	P	P	NA	ABS	NA
	<i>Botrylloides violaceus</i>	Botrylle violet	NA	NA	P	NA	ABS	NA
	<i>Corella eumyota</i>	Ascidie cartilagineuse	P	NA	NA	NA	P	NA
	<i>Didemnum vexillum</i>	Didemnade étendard	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Molgula manhattensis</i>	Molgule de Manhattan	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Perophora japonica</i>	Pérophore japonaise	NA	NA	P	P	ABS	NA
	<i>Styela clava*</i>	Ascidie japonaise	P	P	P	P	P	NA
Cnidaria	<i>Cordylophora caspia</i>	Cordylophore de la Caspienne	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	<i>Gonionemus vertens</i>	Méduse adhésive	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Nemopsis bachei</i>	Némopsis	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
Ctenophora	<i>Mnemiopsis leidyi</i>	Mnémiopsis	NA	NA	NA	NA	P	NA
Mollusca	<i>Crepidula fornicata*</i>	Crépidule	P	P	P	P	P	P
	<i>Ensis leei*</i>	Couteau américain	NA	NA	NA	P	ABS	NA
	<i>Magallana gigas*</i>	Huitre creuse	P	P	NA	P	P	P
	<i>Mytilopsis leucophaeata</i>	Moule d'Amérique	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Ocenebrellus inornatus</i>	Bigorneau perceur japonais	NA	NA	NA	P	ABS	NA
	<i>Ruditapes philippinarum</i>	Palourde japonaise	NA	NA	NA	P	P	P
	<i>Tritia neritea*</i>	Nasse néritoïde	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
Ochrophyta	<i>Colpomenia peregrina</i>	Voleuse d'huîtres	NA	P	NA	NA	P	NA
	<i>Sargassum muticum*</i>	Sargasse japonaise	P	P	P	P	P	P
	<i>Undaria pinnatifida*</i>	Wakamé	NA	P	P	NA	ABS	P
Porifera	<i>Celtodoryx ciocalyptoides*</i>	Eponge chinoise	P	P	NA	NA	P	NA
Rhodophyta	<i>Agarophyton vermiculophyllum*</i>	Gracilaire à feuilles vermiculées	NA	NA	NA	NA	ABS	P
	<i>Asparagopsis armata</i>	Algue à crochets	NA	P	NA	NA	ABS	NA
	<i>Bonnemaisonia hamifera</i>	Plume épineuse rouge	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Caulacanthus ustulatus</i>	Caulacanthé brûlée	NA	NA	NA	NA	P	NA
	<i>Dasysiphonia japonica</i>	Hétérosiphonie du Japon	NA	NA	NA	NA	ABS	NA
	<i>Grateloupia turuturu</i>	Grateloupe du Pacifique	NA	P	NA	P	P	P
	<i>Spongoclonium caribaeum</i>	Algue rouge duveteuse	NA	NA	P	NA	ABS	NA
	<i>Womersleyella setacea</i>	Vomersleyelle sétacée	NA	NA	NA	NA	ABS	NA

P : espèce présente ; ABS : espèce absente ; NA : donnée manquante. * : Espèces Exotiques Envahissantes (d'après Massé et al., 2023).

Résultats

Après extraction de la base de données CROMIS, 11 061 observations de 823 espèces subaquatiques ont été enregistrées sur 284 sites de plongée répartis le long des 3 000 km environ de littoral breton et ligérien (Figure 1).



Figure 1. Répartition des sites d’observation en plongée et sur l’estran du littoral Bretagne - Pays de la Loire où au moins une espèce exotique marine suivie dans le cadre du RAGO a été observée (d’après CROMIS).

Ces observations ont été réalisées en plongée sous-marine, en apnée, en randonnée subaquatique ou lors de sorties sur l’estran, entre 2020 et 2023, d’avril à octobre. Parmi ces 11 061 observations, 207 d’entre elles (1,9 %) portaient sur 27 espèces exotiques observées sur 73 sites de plongées (Tableau 2).

Tableau 2. Proportion d’Espèces Non Indigène (ENI) en termes de richesse spécifique et d’occurrence, et proportion du nombre de sites présentant une ENI, par département et sur l’interrégion Bretagne – Pays de la Loire.

Dép.	Ratio richesse spécifique en ENI / richesse spécifique totale	%	Nombre d’occurrence d’ENI / nombre total d’occurrence	%	Nombre de sites avec ENI / nombre total de sites	%
22	10 / 362	2,7	31 / 2606	1,2	19 / 78	24,3
29	13 / 381	3,4	28 / 1429	2	13 / 80	16,2
35	11 / 314	3,5	22 / 1397	1,6	8 / 29	27,6
44	11 / 254	4,3	32 / 590	5,4	9 / 16	56,2
56	16 / 418	3,8	54 / 4261	1,3	21 / 66	32
85	7 / 246	2,8	40 / 778	5,1	3 / 15	20
Interrégion	27 / 823	3,3	207 / 11 061	1,9	73 / 284	25

Qualités des plongées d’observation

Près de 60 % des observations d’espèces exotiques ont été réalisées au cours d’une plongée d’exploration, c’est-à-dire lors d’une plongée en bouteille en autonomie. Les plongées ont été

réalisées sur des sites ne dépassant pas en moyenne 18 m de profondeur. Les conditions des observations en plongée étaient dans l'ensemble très favorables avec une visibilité jugée « bonne » à « moyenne » dans 80 % des cas et avec une courantologie « faible » ou « nulle » dans 81 % des cas. Au cours de ces plongées d'exploration, la température moyenne mesurée au point le plus profond de la plongée (qui n'est pas forcément le point le plus profond du site) était, entre avril et octobre, de 15,5 °C sans différence significative entre les départements (Figure 2). Le reste des observations d'espèces exotiques (40 %) a été réalisé en randonnée subaquatique, lors de sortie sur l'estran ou en apnée.

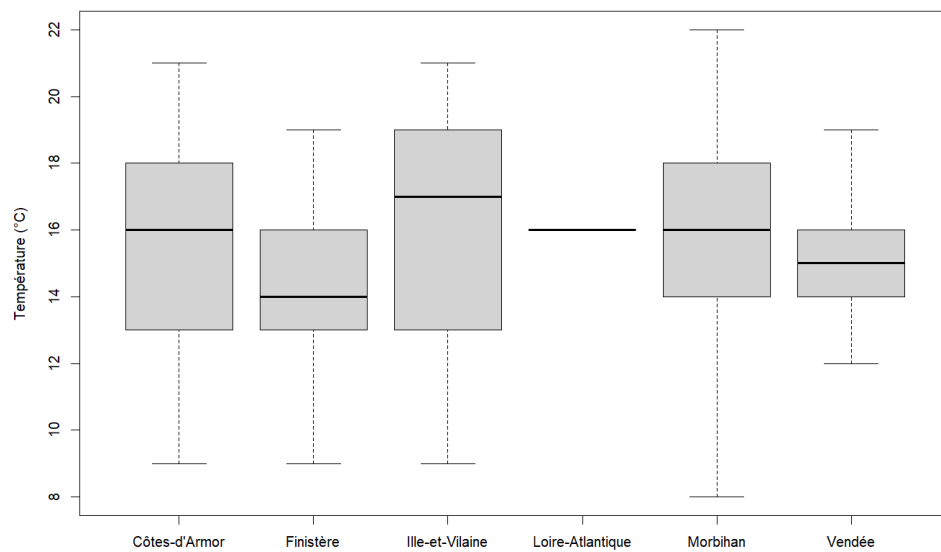


Figure 2. Température moyenne enregistrée en plongée, entre avril et octobre, par département.

Résultats de l'étude à l'échelle du Grand Ouest

Au regard de la biodiversité locale, tous Phyla confondus, les espèces exotiques représentaient 5,4 % des observations réalisées par les plongeurs dans le département de la Loire-Atlantique, 5,1 % dans le département de la Vendée, 2 % dans le département du Finistère, 1,6 % dans le département de l'Ille-et-Vilaine, 1,3 % dans le département du Morbihan et 1,2 % des observations d'espèces dans le département des Côtes d'Armor (Figure 3 et Tableau 2).

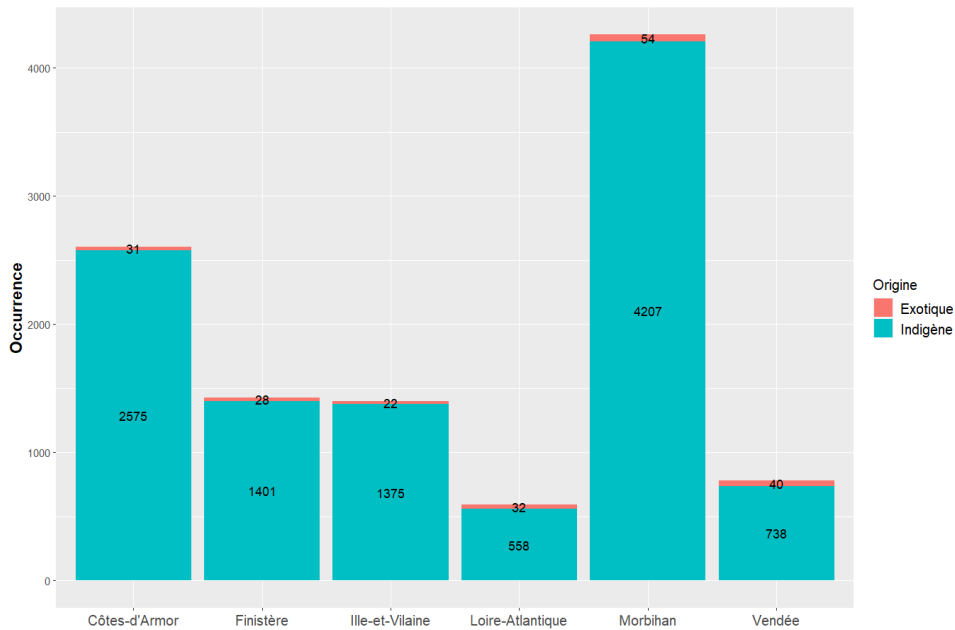


Figure 3. Occurrence des espèces subaquatiques enregistrées, par département, dans la base de données CROMIS avec (en rouge) les espèces exotiques et (en bleu) les espèces indigènes.

Les observations d'espèces exotiques portaient essentiellement sur le groupe des « végétaux » (règnes des chromistes et des plantes) rassemblant les phanérogames et les macro-algues avec 67 occurrences soit 32,3 % des observations et sur le groupe des mollusques (31,9 %) suivis par celui des tuniciers (17,9 %) (Figure 4).

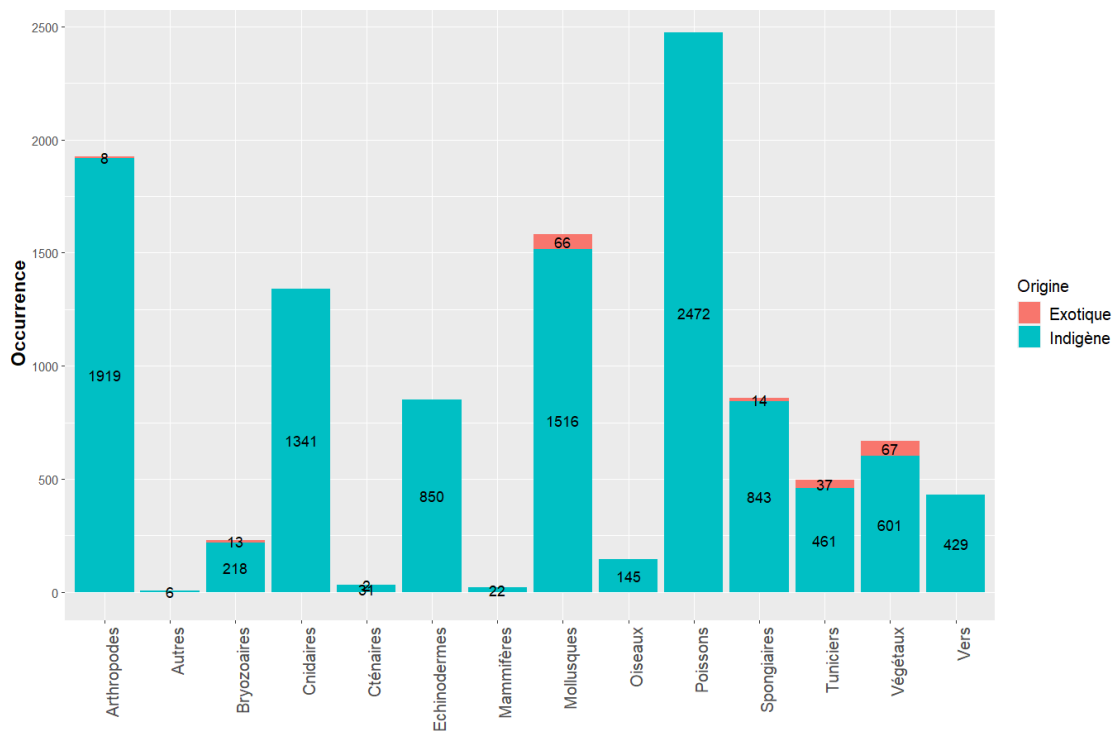


Figure 4. Occurrence des espèces exotiques (rouge) et des espèces indigènes (bleu) présentée par groupe taxonomique.

Les 4 espèces exotiques majoritairement observées à savoir l'algue brune *Sargassum muticum* dans 17,9 % des cas, l'huître creuse *Magallana gigas* dans 11,6 % des cas, l'ascidie *Styela clava* dans 10,6 % des cas suivie de *Crepidula fornicata* dans 9,7 % des cas sont toutes des EEE (Figure 5).

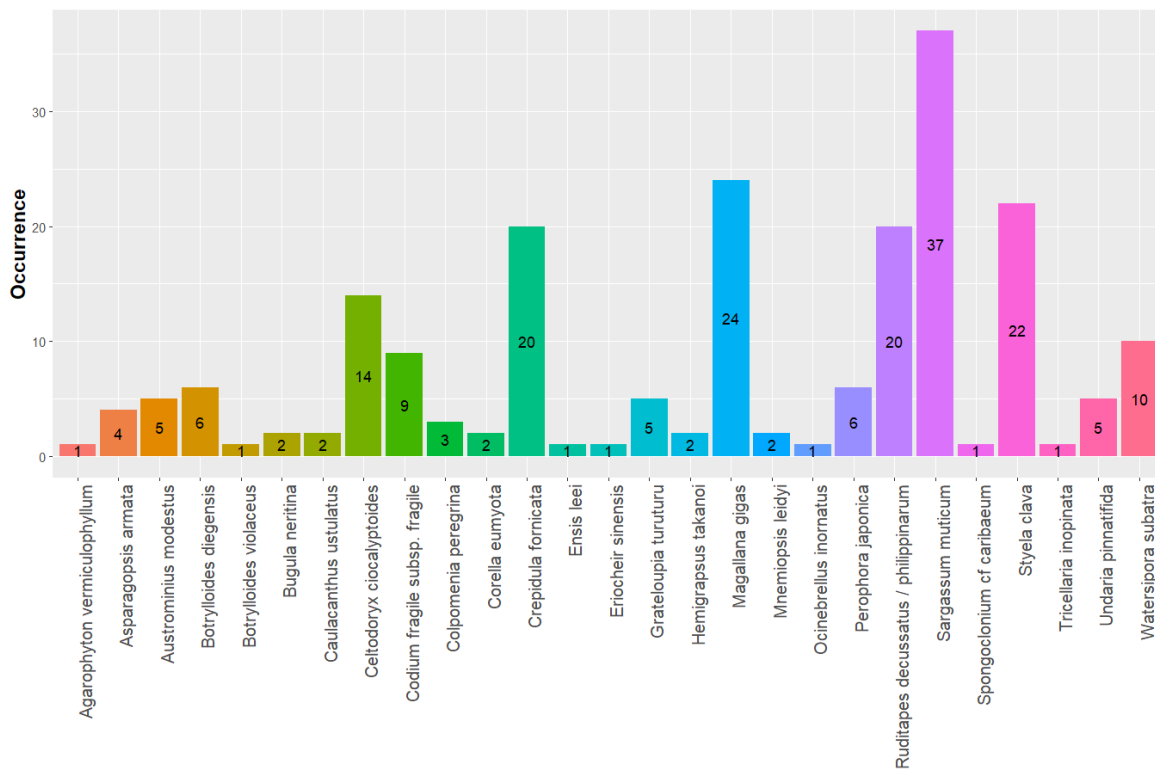


Figure 5. Occurrence des espèces exotiques marines suivies dans le cadre du projet RAGO et enregistrées dans la base de données CROMIS. Seules les espèces ayant fait l'objet d'au moins 1 observation sont présentées.

Si l'on distingue les explorations, d'une part, des sorties sur l'estran, d'autre part, la Loire-Atlantique reste le département où le plus grand nombre d'occurrence d'espèces exotiques a été enregistré au cours des plongées dites d'exploration par rapport au nombre d'occurrence d'espèces indigènes avec 5,5 % des observations. Les autres départements des Côtes-d'Armor, du Finistère, de l'Ille-et-Vilaine et du Morbihan présentaient quant à eux des pourcentages beaucoup plus faibles avec 1,2 %, 1,2 %, 1,6 % et 1 % respectivement. Aucune observation d'espèces exotiques n'a été enregistrée en plongée dans le département de la Vendée (Figure 6).

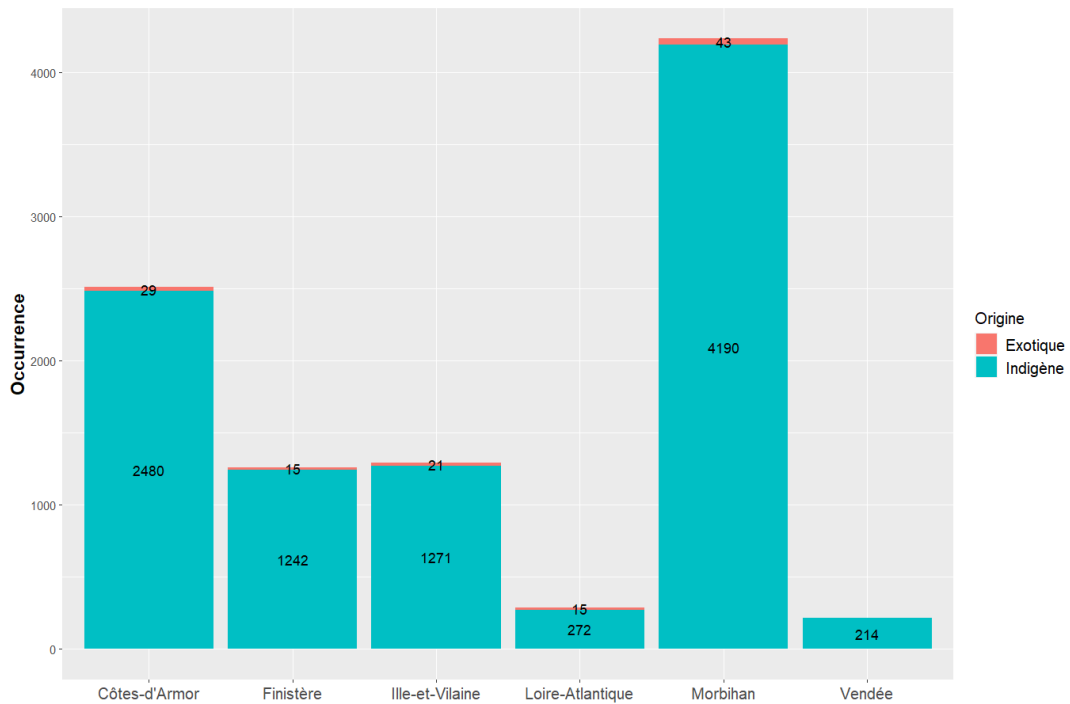


Figure 6. Occurrence des espèces exotiques marines (en rouge) suivies dans le cadre du projet RAGO, par département, et observées uniquement en plongée, entre 0 et 25 m de profondeur.

Les 5 espèces majoritairement observées en plongée sous-marine étaient *Styela clava*, *Sargassum muticum*, *Celtodoryx ciocalyptoides*, *Magallana gigas* et *Crepidula fornicata* (Figure 7), toutes envahissantes, tandis que les 5 espèces majoritairement observées sur l'estran étaient *Sargassum muticum*, *Magallana gigas* et *Ruditapes sp. exaequo*, *Crepidula fornicata* et *Grateloupia turuturu* (Figure 8).

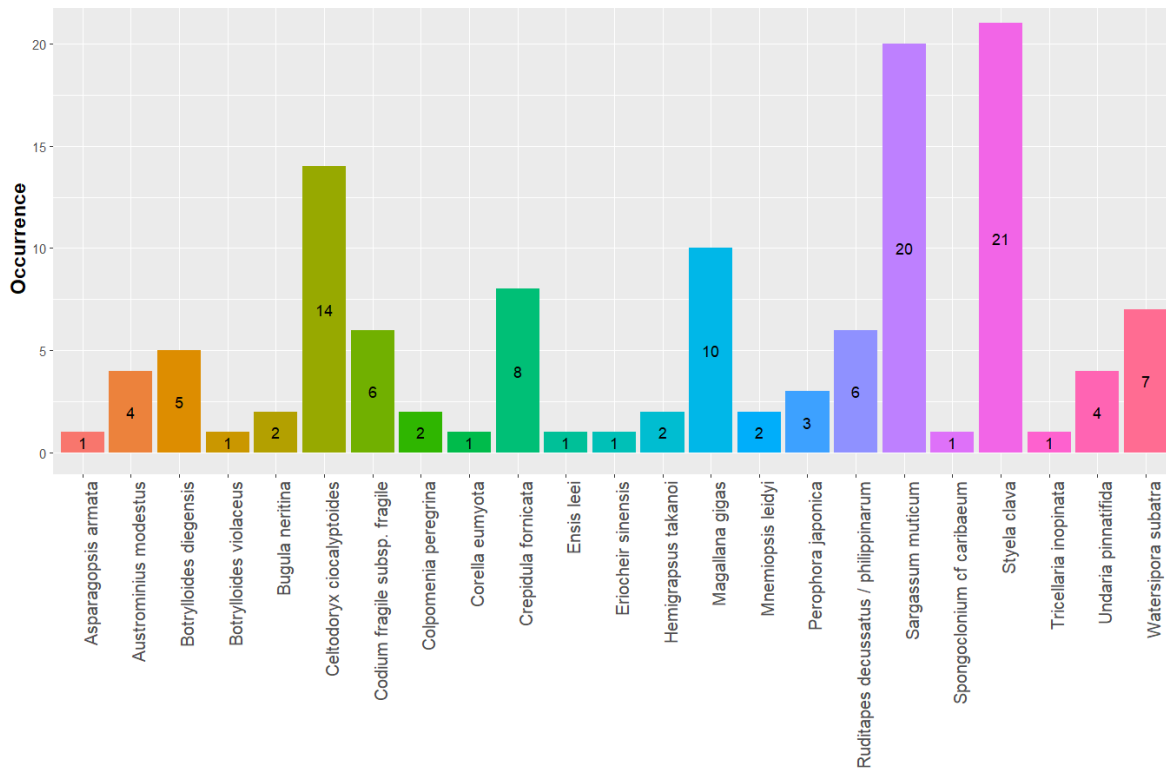


Figure 7. Occurrence des espèces exotiques marines suivies dans le cadre du projet RAGO et observées en plongée uniquement.

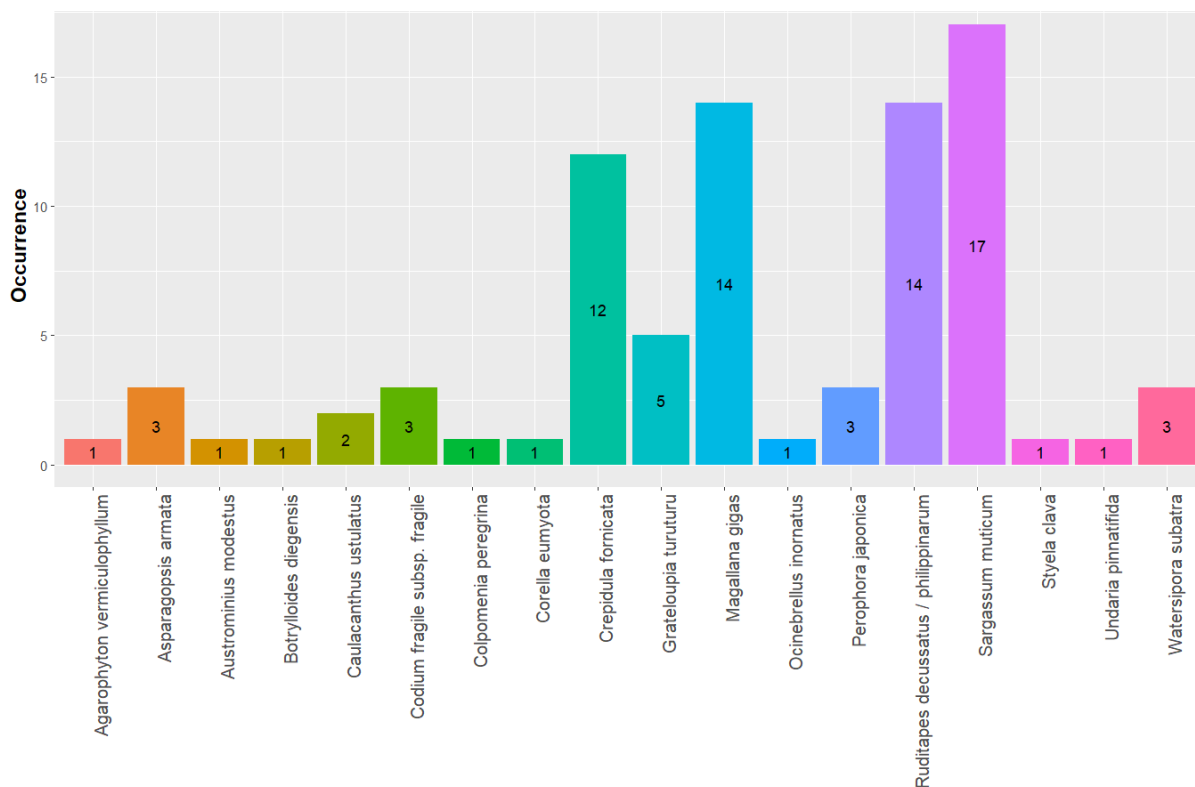


Figure 8. Occurrence des espèces exotiques marines suivies dans le cadre du projet RAGO et observées sur l'estran (en randonnée subaquatique, apnée ou lors de sorties à pied).

Le suivi opportuniste employé dans le cadre du RAGO prévoyait également de noter l'absence d'observation d'espèces exotiques c'est-à-dire des espèces qui ont été recherchées spécifiquement lors d'une plongée mais qui n'ont pas été vues. En effet, CROMIS dispose d'iconographies permettant au plongeur d'enregistrer spécifiquement ces observations d'espèces « pas vues ». Les départements où ces espèces n'ont pour l'instant pas été observées sont rapportées dans le Tableau 1. A ce jour, 99 occurrences d'espèces exotiques absentes ont été rapportées sur 10 sites (Figure 9). Toutes les observations ont été enregistrées suite à une plongée. 96 % de ces absences ont été signalées dans le Morbihan et concernaient 40 des 46 espèces suivies. 79 % de ces absences ont été notées lors de plongées thématiques sur les espèces exotiques organisées par la CREBS notamment sur l'île d'Houat, en août 2023.

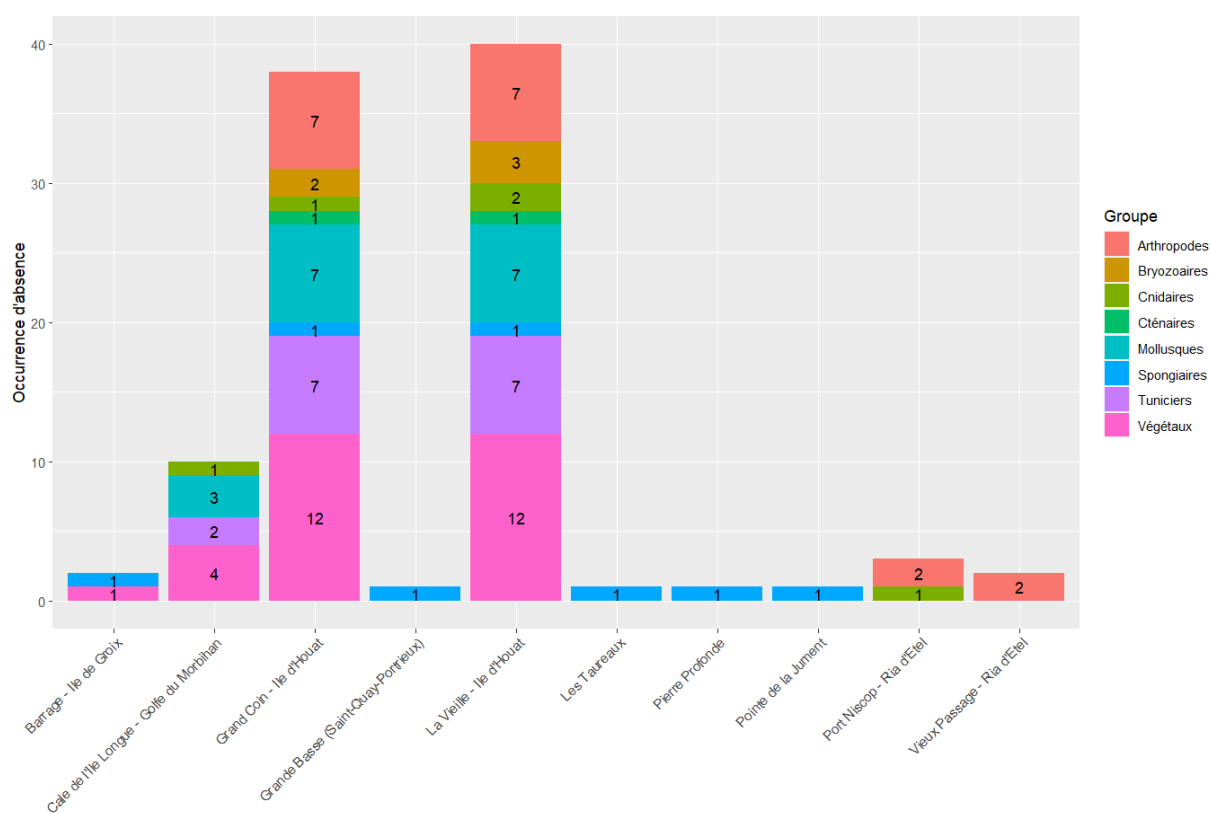


Figure 9. Occurrence d'absence d'observation d'espèces exotiques marines sur les sites de plongée

Résultats de l'étude à l'échelle départementale

Le long du littoral, 54 occurrences d'espèces exotiques sur un total de 207 observations d'espèces exotiques soit 26,1 % ont été enregistrées dans le département du Morbihan suivi de la Vendée, de la Loire-Atlantique, des Côtes d'Armor et du Finistère avec respectivement 19,3 %, 15,4 %, 15 % et 13,5 % des observations quel que soit le mode d'observation employé (plongée bouteille, randonnée subaquatique, apnée, etc.). C'est dans le département de l'Ille-

et-Vilaine que le pourcentage d'observations d'espèces exotiques a été le plus faible avec près de 10,6 %.

- Département des Côtes d'Armor (22)

Près de 80 sites de plongée dans ce département sont actuellement recensés dans CROMIS. 31 occurrences de 10 espèces exotiques ont été enregistrées sur 19 de ces sites (Figure 10). Plus d'un tiers des sites présentaient une co-occurrence d'espèces, c'est-à-dire la présence d'au moins 2 espèces exotiques. Les observations d'espèces exotiques ont été réalisées en plongée sous-marine dans 93,5 % des cas. C'est sur le site de la Grande Basse que le plus grand nombre d'espèces exotiques et d'occurrence a été enregistré (Figure 11).

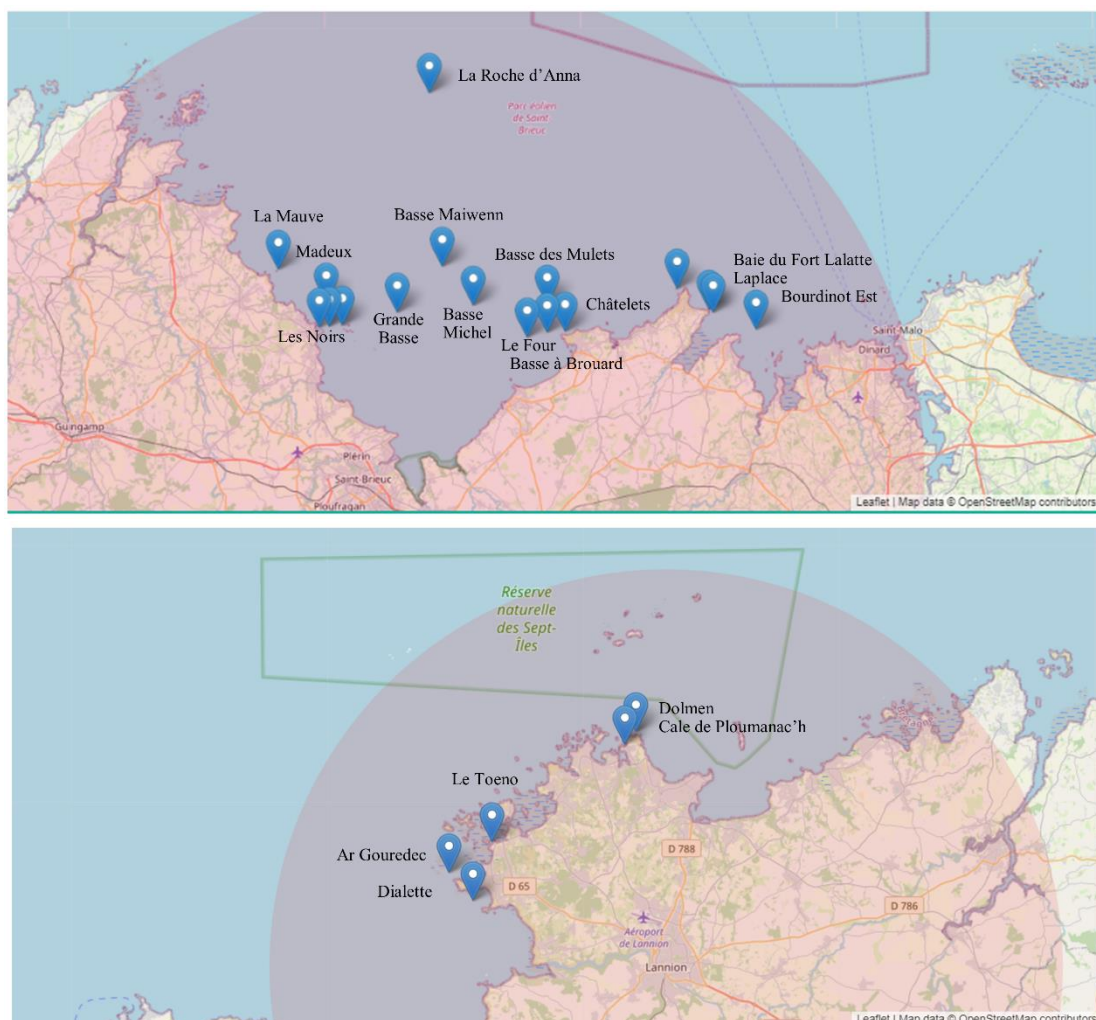


Figure 10. Sites de plongée du 22 où au moins 1 espèce exotique marine suivie dans le cadre du RAGO a été observée.

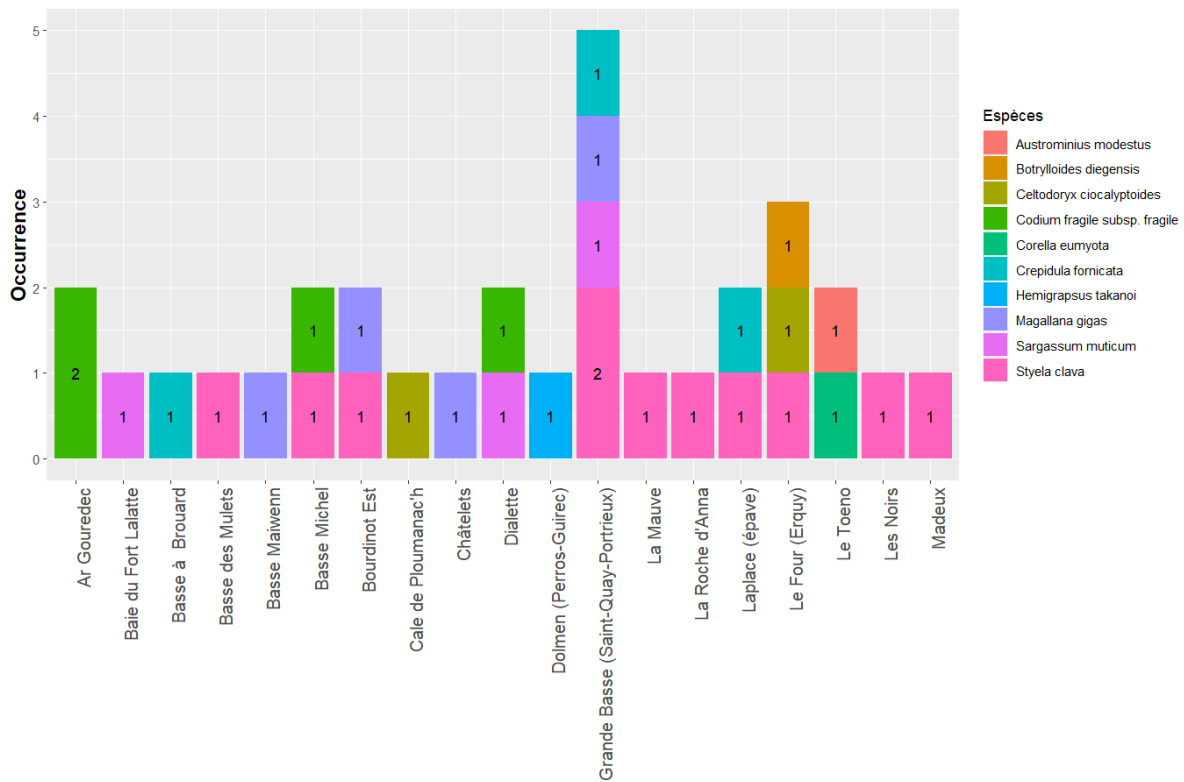


Figure 11. Occurrence et richesse spécifique des espèces exotiques observées dans le département des Côtes-d'Armor.

- Département du Finistère (29)

Près de 80 sites de plongée dans ce département sont actuellement recensés dans CROMIS. 28 occurrences de 13 espèces exotiques ont été enregistrées sur 13 de ces sites (Figure 12). Près de 50 % des sites présentaient une co-occurrence d'espèces exotiques et 53,6 % de ces observations d'espèces exotiques ont été réalisées en plongée sous-marine. C'est sur le site de Porz Doun, sur Ouessant, que le plus grand nombre d'espèces exotiques et d'occurrence a été enregistré (Figure 13).



Figure 12. Sites de plongée du 29 où au moins 1 espèce exotique suivie dans le cadre du RAGO a été observée

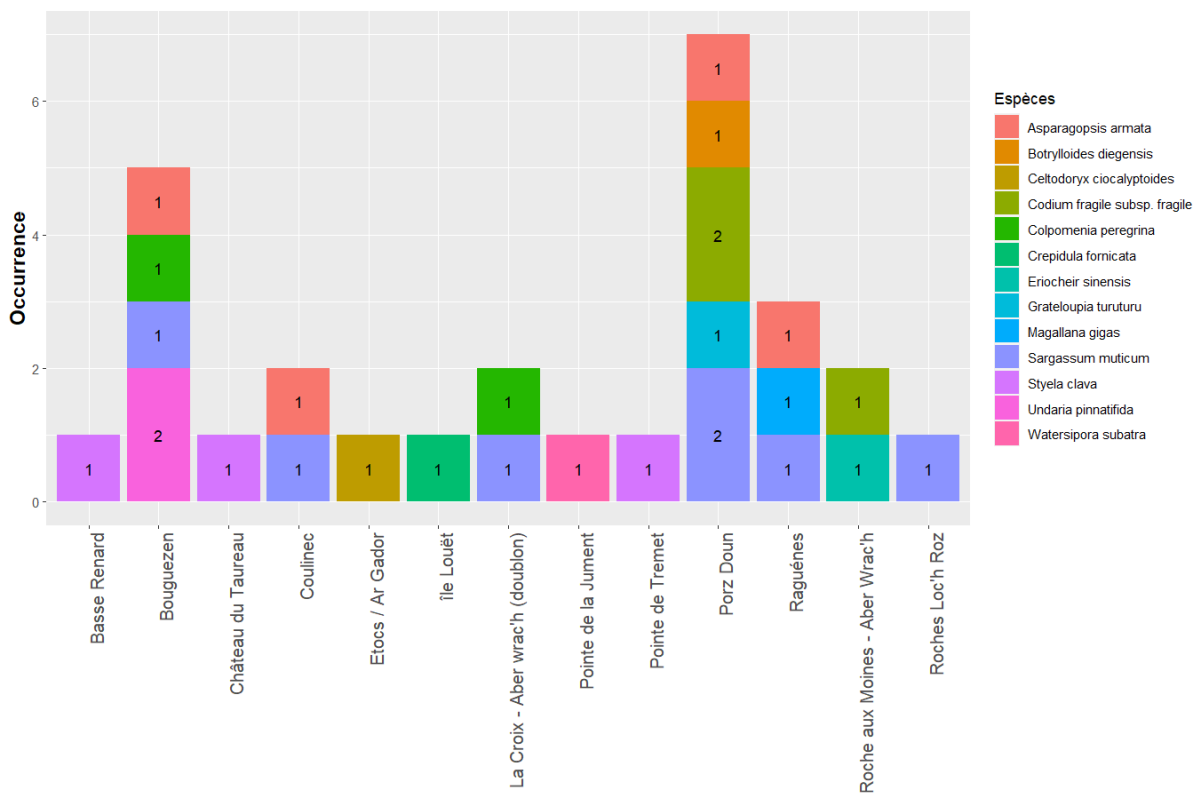


Figure 13. Occurrence et richesse spécifique des espèces exotiques marines observées dans le département du Finistère.

- Département de l'Ille-et-Vilaine (35)

A ce jour, CROMIS recense environ une trentaine de sites de plongées dans ce département. 22 occurrences de 11 espèces exotiques observées sur 8 de ces sites ont été enregistrées dans CROMIS (Figure 14). Plus de 62 % des sites présentaient une co-occurrence d'espèces exotiques (Figure 15). 95 % de ces observations ont été réalisées en plongée sous-marine notamment sur le site de la cale de Jouvente rassemblant 32 % des observations d'espèces exotiques. Les 3 espèces exotiques majoritairement observées étaient *Botrylloides diegensis* et *Perophora japonica exæquo*, suivies de *Sargassum muticum*. Une seule observation de *P. japonica* a été réalisée sur l'estran, sur le site Les Echaudières.



Figure 14. Sites de plongée du 35 où au moins 1 espèce exotique suivie dans le cadre du RAGO a été observée

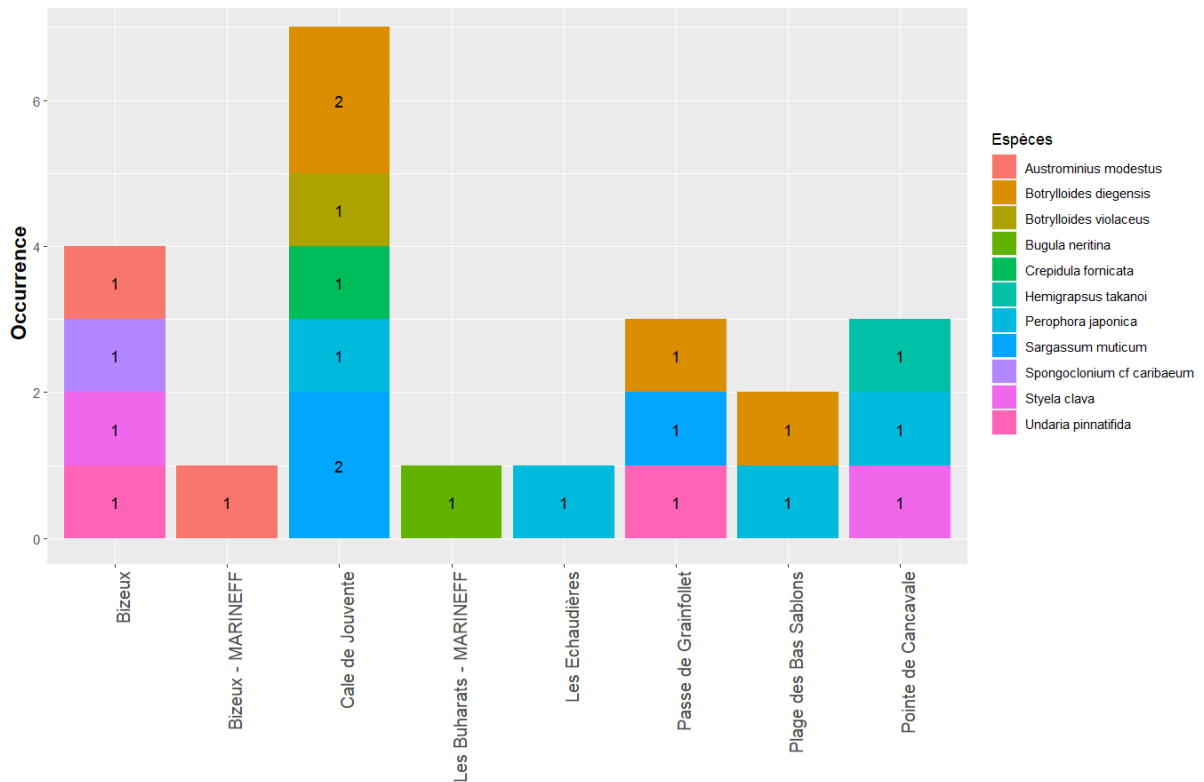


Figure 15. Occurrence et richesse spécifique des espèces exotiques observées dans le département de l'Ille-et-Vilaine.

- Département de Loire-Atlantique (44)

Sur la quinzaine de sites d'observation actuellement enregistrée dans CROMIS, 9 d'entre eux présentaient au moins une espèce exotique. 53,1 % des observations ont été réalisées sur l'éstran. A ce jour, 32 occurrences de 11 espèces exotiques ont été enregistrées (Figure 16) ; les 2 tiers de ces sites présentaient une co-occurrence d'espèces exotiques (Figure 17). C'est près de la plage de la Prée, à la Plaine-sur-Mer, que le plus grand nombre d'espèces exotiques a été observé. C'est aussi sur ce même site que leur nombre d'occurrences était le plus élevé (Figure 17).

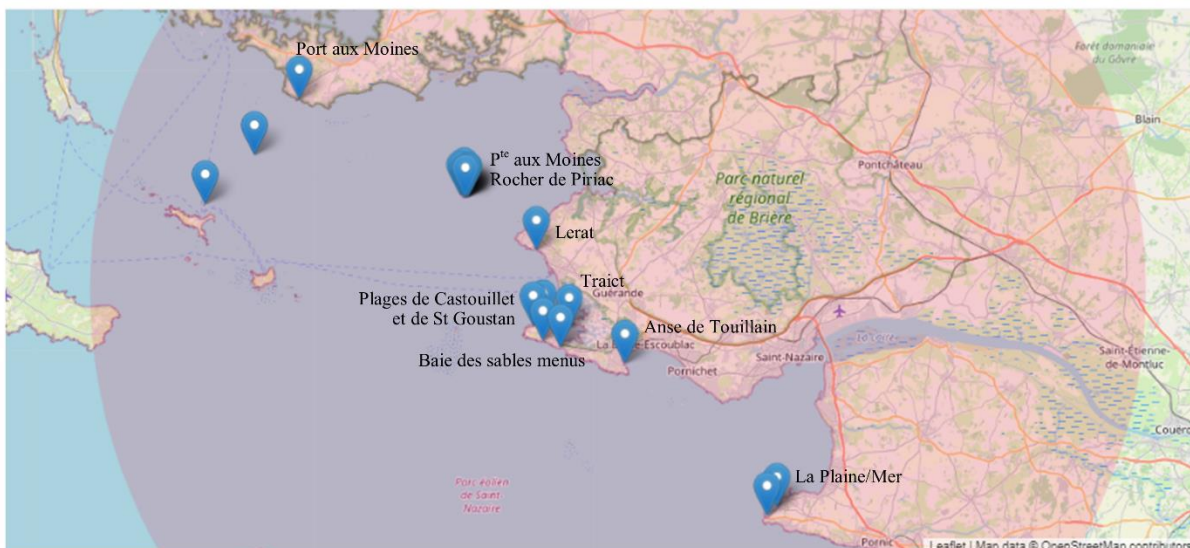


Figure 16. Sites de plongée du 44 où au moins 1 espèce exotique suivie dans le cadre du RAGO a été observée

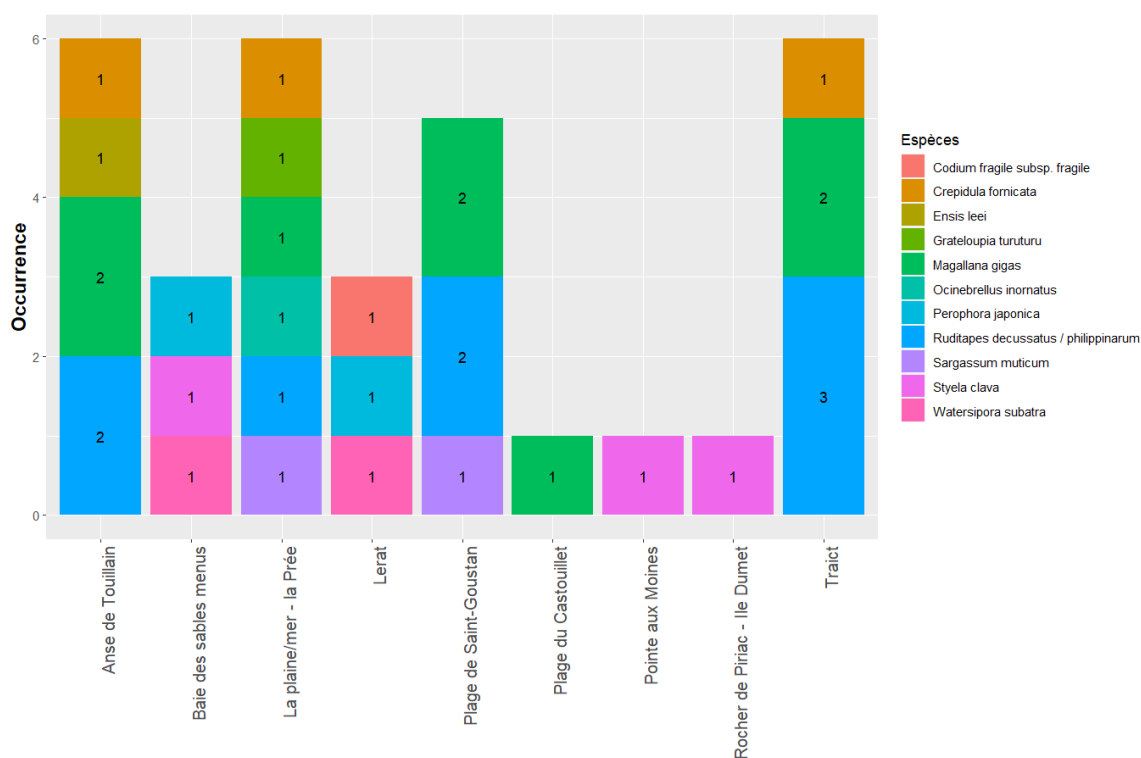


Figure 17. Occurrence et richesse spécifique des espèces exotiques marines observées dans le département de Loire-Atlantique.

- Département du Morbihan (56)

C'est dans le département du Morbihan que la richesse spécifique et le nombre d'occurrence d'espèces exotiques ont été les plus importants sur la période 2020-2023 avec 54 observations de 16 espèces sur 21 sites (Figure 18). Au total, le département enregistre plus d'une soixantaine de sites de plongée actuellement référencés dans CROMIS. 79,6 % de ces observations d'espèces exotiques ont été réalisées en plongée sous-marine notamment sur le site des Gorets, dans le Golfe du Morbihan, avec 10 occurrences de 8 espèces différentes (Figure 19).

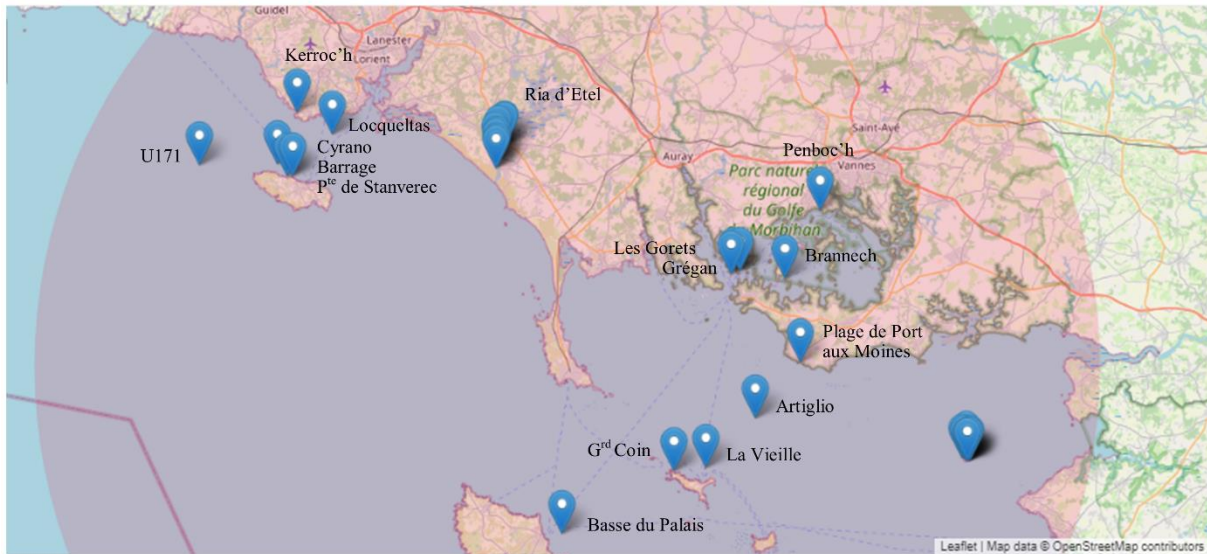


Figure 18. Sites de plongée du 56 où au moins 1 espèce exotique suivie dans le cadre du RAGO a été observée

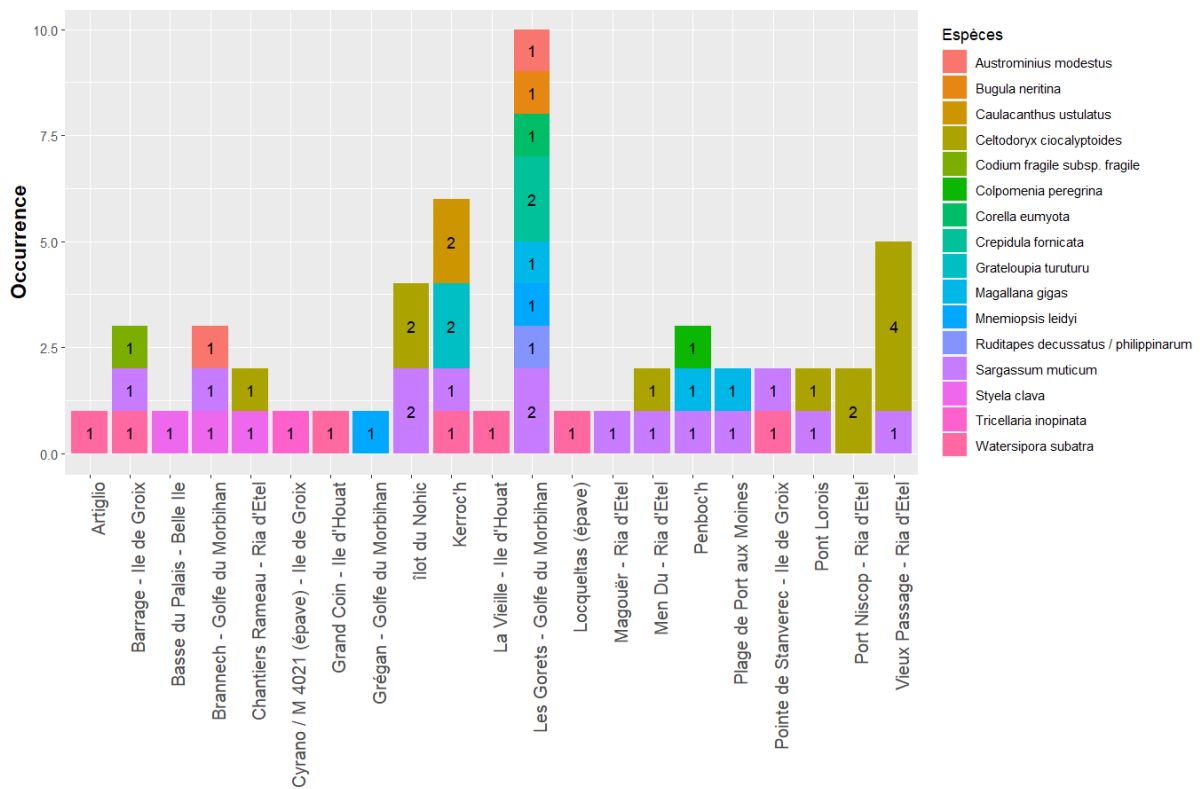


Figure 19. Occurrence et richesse spécifique des espèces exotiques observées dans le département du Morbihan.

- Département de la Vendée (85)

La totalité des observations d'espèces exotiques a été réalisée sur l'estran avec 40 occurrences de 7 espèces sur 3 sites (Figure 20) sur une quinzaine au total, en particulier sur le site de Barbâtre, au sud de l'île de Noirmoutier (Figure 21). Les 3 sites présentaient une co-occurrence d'espèces exotiques.



Figure 20. Sites de plongée du 85 où au moins 1 espèce exotique suivie dans le cadre du RAGO a été observée

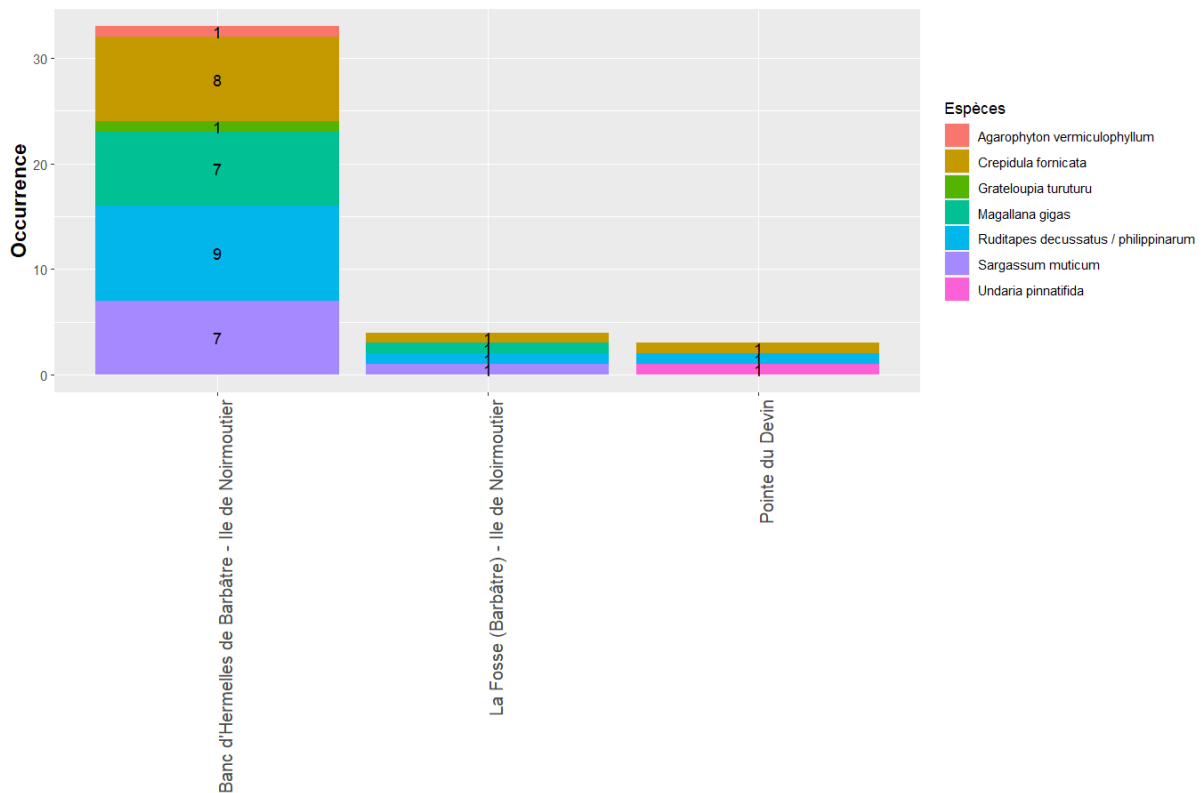


Figure 21. Occurrence et richesse spécifique des espèces exotiques marines observées dans le département de la Vendée.

Discussion

La plupart des programmes de Sciences citoyennes reposent sur la collecte massive de données d'observations par des citoyens bénévoles en réponse à un questionnement scientifique et/ou citoyen. Longtemps et souvent critiquées pour le manque de robustesse des protocoles opportunistes utilisés, les Sciences citoyennes puisent toute leur force dans le nombre important d'observations réalisées sur une échelle spatiale et temporelle tout aussi vaste. La multiplication et démocratisation des outils numériques (téléphone portable, internet, etc.) permettent à présent de valider un plus grand nombre de données soit par les scientifiques, soit par les citoyens eux-mêmes qui acquièrent ainsi un degré d'expertise grandissant au fur et à mesure qu'ils s'impliquent et s'appliquent dans ces suivis. Aujourd'hui, les programmes dédiés à la mer et au littoral représentent environ 34 % des programmes de Sciences participatives recensés sur l'Observatoire Participatifs des Espèces et de la Nature (OPEN). L'essor relativement récent de ces programmes de recherche est probablement dû à la pertinence des premières publications scientifiques dans le domaine (Serrano et al., 2022 ; Thibault et al., 2022). Les programmes faisant intervenir des plongeurs subaquatiques sont, par contre, beaucoup plus rares.

Parmi ces Sciences citoyennes marines, le Réseau Alien Gand Ouest (RAGO) est un tout récent programme dit de Recherches participatives. Inauguré fin 2021, après une année de pandémie, il ne bénéficie que de deux saisons estivales de suivi et, pour l'instant, souffre

encore d'une faible notoriété auprès des plongeurs de la FFESSM. La jeune base de données CROMIS associée au RAGO a elle-même été mise en ligne tout récemment, en 2020, et est encore en développement. Toutefois, les résultats préliminaires présentés dans ce rapport peuvent déjà dresser un état de santé du milieu marin. D'après notre étude, entre 16 et 56 % des sites de plongées sont, suivant les départements, concernés par la présence d'au moins une espèce exotique. Entre 75 et 100 % de ces sites présentent une espèce exotique envahissante susceptible d'impacter les habitats marins. La présence de *Sargassum muticum* et de *Crepidula fornicata* sur les 6 départements du littoral Grand Ouest illustre le risque d'homogénéisation biotique lié aux EEE. Enfin, parmi ces 73 sites concernés par la présence d'espèces exotiques, 53 % d'entre eux font l'objet de co-occurrence d'espèces.

Toutes les observations ont majoritairement été réalisées entre avril et octobre, période de l'année où l'activité de plongée de loisirs est la plus intense. Cette période correspond à la période recommandée pour le suivi des ENI dans le cadre du descripteur D2 de la DCSMM (Massé, Pers. Comm.). Cet état des lieux devrait donc pouvoir servir de référence dans les années à venir pour suivre les variations dans l'aire de distribution des ENI. Les observations réalisées le reste de l'année ne doivent pas pour autant être oubliées. En effet, en plus de compléter le jeu de données d'observations faune flore, les sorties thématiques organisées sur l'estran par les bénévoles permettent de maintenir une certaine dynamique et continuité auprès de la communauté des plongeurs naturalistes de la FFESSM.

Ce RAGO ne couvre pas l'intégralité du littoral breton et ligérien. En effet, du Mont-St-Michel jusqu'à St Coulomb (35), de Carantec jusqu'à Plouguerneau (29) puis de Fromentine (85) jusqu'aux Pertuis bretons, il n'y a pas eu, au 15/10/2023, de données d'observations, toutes espèces confondues, rapportées dans CROMIS. Ceci s'explique simplement par la présence d'habitats (vasières et prés salés, rivages sableux) inadaptés à la plongée ou à la randonnée subaquatique et donc à la collecte de données d'observation d'espèces subaquatiques. Par ailleurs, l'absence de clubs de plongée associatifs ou de Structures Commerciales Agréées (SCA) de St Pol-de-Léon jusqu'à Plouguerneau, dans le Finistère Nord, est probablement également à l'origine de l'absence de données d'observations en milieu subaquatique autour de cette zone. Enfin, tous les sites de plongées occasionnellement explorés par les plongeurs ne sont pas encore enregistrés dans CROMIS.

Seules les données collectées dans l'espace 0 à 35 m de profondeur ont été utilisées dans cette étude qui ne recouvre donc pas l'intégralité des étages subtidiaux. En effet, la majorité des plongeurs sont soit autonomes jusqu'à 20 m (PA20) et donc limités à 20 m dans le cadre des plongées FFESSM, soit se limitent eux-mêmes aux alentours des 20 m pour profiter pleinement des plongées sur le thème de la biologie subaquatique et rester plus longtemps. D'autre part, la plongée loisirs à l'air est interdite au-delà de 60 m. Se pose la question de l'étage exploré par les plongeurs côté Manche où le marnage peut atteindre 12 m. CROMIS ne précise pas explicitement la correction à apporter en fonction de l'heure et du coefficient de marée. Le long des Côtes de Granit Rose et d'Emeraude, une plongée à 6 m de « profondeur » peut avoir été réalisée soit dans le médiolittoral lors de PM soit dans l'infralittoral lors de BM.

Sur un peu plus d'une centaine d'espèces exotiques invasives ou établies répertoriées dans la littérature le long du littoral Bretagne – Pays de la Loire, 46 espèces exotiques marines ont fait l'objet d'un premier suivi dans le cadre du RAGO. Sur cette quarantaine, seule une vingtaine a fait l'objet d'au moins une observation par les participants depuis la mise en ligne de la base de données CROMIS. Parmi les espèces exotiques rapportés par les plongeurs, 4 EEE (i.e. *Sargassum muticum*, *Magallana gigas*, *Styela clava*, *Crepidula fornicata*) et l'espèce exotique *Ruditapes philippinarum* présentent près de 60 % des observations d'ENI à elles seules. Le nombre relativement élevé d'occurrence est probablement à mettre en relation avec la distribution géographique étendue de ces espèces, à leur accessibilité en plongée, peu profonde, ou sur l'estran, mais aussi au fait qu'elles soient facilement identifiables grâce à leurs caractéristiques morphologiques évidentes pour la plupart des plongeurs. L'espèce introduite *Ruditapes philippinarum* pouvant être facilement confondue avec l'espèce européenne *R. decussatus*, il est possible que le nombre d'occurrence soit surestimé pour cette espèce.

Certaines espèces invasives ont été signalées pour la première fois sur le littoral. Par exemple, l'éponge chinoise *Celtodoryx ciocalyptoides* a été observée pour la première fois dans les Côtes d'Armor sur le site du Four et de la cale de Ploumanac'h. Dans le Finistère, c'est sur le site de Porz Doun, à Ouessant, qu'a pu être observé pour la première fois le *Botrylloides diegensis*. L'observation d'*Hemigrapsus takanoi* à la pointe de la Cancavale n'avait jamais été rapportée jusqu'à présent en Ille-et-Vilaine. Pour la première fois en Loire-Atlantique, l'espèce *Codium fragile* a été observée près de la plage de Lérat ; *Ocinebrellus inornatus* sur le site de la Plaine-sur-Mer et *Ensis leei* dans l'Anse de Touillain. *Tricellaria inopinata* et *Caulacanthus ustulatus* ont été observés dans le département du Morbihan respectivement sur l'épave du Cyrano (Groix) et sur le site de Kerroc'h (Ploemeur). Enfin, pour la première fois en Vendée, *Agarophyton vemiculophyllum* a été observée sur le site de Barbâtre. Toutefois, n'ayant été observées qu'une seule fois, la présence de toutes ces espèces est pour l'instant considérée comme « douteuse » (OpenObs).

Quant aux espèces exotiques qui n'auraient pas été observées et/ou rapportées dans CROMIS, comme par exemple, *P. macrodactylus*, la nécessité d'un niveau plus élevé de compétence de la part des observateurs pour identifier ces espèces pourrait expliquer le manque d'observation ; ce qui ne traduit pas l'absence de l'espèce. Le protocole RAGO a donc inclus le critère « absence » d'observation comme étant une donnée à enregistrer dans la base CROMIS ce que peu de programme participatif propose. Il est en effet plus difficile et déroutant pour le citoyen d'accepter que l'absence d'une observation constitue en soi un résultat. Pourtant, dans le cadre d'un suivi de l'aire de répartition d'une EEE, cette information est capitale pour, d'une part, estimer les variations dans l'aire de répartition et, d'autre part, pour signaler son apparition dans un site jusqu'à présent préservé, avant de mettre en œuvre d'éventuelles mesures de gestion. A ce stade, peu d'espèces exotiques notées absentes ont été rapportées dans CROMIS : 99 notifications sur 11 160 observations soit moins de 1 % des observations ce qui suggère que noter l'absence d'observation d'une espèce n'est pas encore systématique chez le plongeur.

De façon surprenante, aucun individu de wakamé, *Undaria pinnatifida*, n'a été observé en plongée dans le Morbihan. Par ailleurs, aucune donnée sur sa présence ou son absence n'a été rapportée dans les départements des Côtes d'Armor et de Loire-Atlantique et seuls 4 sites du Finistère et d'Ille-et-Vilaine ont fait l'objet d'une observation. Cette algue est pourtant largement connue dans la littérature comme étant présente et envahissante sur tout le littoral breton. Cette faible occurrence pourrait s'expliquer par sa présence dans des habitats peu fréquentés par les plongeurs. L'algue *U. pinnatifida* privilégie en effet plutôt le milieu portuaire où la plongée est réglementée. Une autre explication pourrait être sa faible abondance sur les sites de plongée, passant ainsi inaperçue ou, à l'inverse, être tellement commune que les plongeurs en oublieraient de la noter comme présente. A ce stade, le RAGO n'a pas encore déployé de protocole visant à mesurer l'abondance ou le taux de recouvrement d'une espèce exotique. Le manque de données concernant certaines espèces pourrait également refléter un manque d'intérêt de la part de la communauté de plongeurs loisirs vis-à-vis de certains groupes taxonomiques ou de certaines espèces. Par exemple, l'EEE en partie marine *Eriocheir sinensis* est jugée préoccupante à l'échelle européenne et n'a pourtant fait l'objet que d'une seule observation enregistrée dans CROMIS sur le site de la Roche aux Moines (Aber Wrac'h). Elle a pourtant été signalée à plusieurs reprises le long de la Loire entre 1954 et 1994, dans le Finistère nord en 1991, puis dans le Finistère sud, à la sortie de l'Aven, en 1994 (d'après OpenObs). Ce décalage entre les priorités des scientifiques et celles des citoyens renforce la nécessité de mettre en place des stages de formation sur la reconnaissance d'espèces exotiques et sur les enjeux liés aux invasions.

A ce stade, le RAGO ne s'intéresse qu'à 46 espèces exotiques marines alors qu'il existe encore plus d'une soixantaine considérée comme établies (Massé et al., 2023). Certaines de ces espèces potentiellement envahissantes ont d'ores et déjà fait l'objet d'observations sur le littoral breton et enregistrées dans CROMIS. Citons par exemple, les bryozoaires *Bugulina simplex* et *B. stolonifera* ou les tuniciers *Aplidium glabrum*, *Ciona robusta*, *Diplosoma listerianum* et *Styela plicata*. Le RAGO pourrait donc voir sa liste d'espèces à rechercher prochainement élargie. A court terme, les espèces exotiques feront également l'objet de suivis cette fois protocolés, toujours dans le cadre du réseau Alien Grand Ouest, afin de déterminer leur abondance ou leur taux de recouvrement dans ou à proximité d'Aires Marines Protégées et des futures Zones de Protection Forte.

Conclusion

Parmi les espèces exotiques marines présentes sur le littoral breton et ligérien, certaines présentent un caractère invasif avéré. D'autres, établies, sont à surveiller car présentent potentiellement un caractère envahissant. A ce jour, plus de 200 observations d'espèces non-indigènes ont été réalisées sur la façade Nord Atlantique – Manche Ouest et répertoriées dans l'outil de sciences participatives CROMIS. Une trentaine d'espèces exotiques semble être a priori reconnaissable par la communauté de plongeurs loisirs avec un risque limité de confusion, suffisamment fréquente pour susciter l'engouement des participants sur le long terme, et suffisamment impactante sur la biodiversité pour justifier leur suivi. Environ 25 % des sites de plongée seraient concernés par la présence d'au moins une espèce exotique. La

diffusion progressive du réseau Alien Grand Ouest dans les différents clubs de plongée et les structures agréées devrait permettre à la fois d'affiner les résultats sur la répartition des espèces exotiques sur le littoral et de mesurer l'impact des recherches participatives sur la mobilisation des citoyens. Enfin, les travaux de recherche menés en parallèle sur les propriétés de défense d'espèces indigènes vis-à-vis de ces espèces exotiques permettront également de convaincre la communauté de plongeurs de poursuivre les efforts d'observation avant de proposer des mesures de gestion fondée sur la Nature.

Remerciements

Ce travail a bénéficié du soutien financier de la région Bretagne dans le cadre de l'appel à projet « Recherche et Société » 2022. Les auteurs tiennent à remercier tous les licenciés de la FFESSM qui ont participé aux suivis ainsi que Cécile Massé (PatriNat) et Michèle Lebascle pour la relecture du manuscrit. Ce travail est dédié à la mémoire de Bernard Margerie, vice-président du CIBPL.

Bibliographie

Blanchard M., Gouletquer P., Hamon D., Le Mao P., Nézan E., Gentil F., Simon N., Viard F., Ar Gall E., Grall J. et al. 2010. Les espèces marines invasives en Bretagne. Observatoire de la biodiversité et du patrimoine naturel en Bretagne, Ed. GIP Bretagne environnement, 44 p. <https://bretagne-environnement.fr/especes-marines-invasives-bretagne>

Baffreau A., Pezy J.-P., Rusig A.-M., Mussio I., Dauvin J.-C., 2018. Les espèces marines animales et végétales introduites en Normandie. Imprimerie Moderne de Bayeux. 350 p. <https://especes-exotiques-envahissantes.fr/wp-content/uploads/2020/09/regenibook.pdf>

CIBPL, Comité Interrégional Bretagne Pays de la Loire. <https://www.cibpl.fr/>

CROMIS, Carnet de Relevé d'Observations des Milieux Subaquatiques. <https://biologie.ffessm.fr/cromis>

DCSMM, Directive Cadre Stratégie pour le Milieu Marin. <https://dcsmm.milieumarinfrance.fr/>

DORIS, Données d'Observations pour la Reconnaissance et l'Identification de la faune et la flore Subaquatiques, <https://doris.ffessm.fr/>

FFESSM, Fédération Française d'Etudes et de Sports Sous-Marins. <https://ffessm.fr/>

IPBES, Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2019. Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. S. Díaz, J. Settele, E. S. Brondízio E.S., H. T. Ngo, M. Guèze, J. Agard, A. Arneth, P. Balvanera, K. A. Brauman, S. H. M. Butchart, K. M. A. Chan, L. A. Garibaldi, K. Ichii, J. Liu, S. M. Subramanian, G. F. Midgley, P. Miloslavich, Z. Molnár, D. Obura, A. Pfaff, S.

Polasky, A. Purvis, J. Razzaque, B. Reyers, R. Roy Chowdhury, Y. J. Shin, I. J. Visseren-Hamakers, K. J. Willis, and C. N. Zayas (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. 56 p.

IPBES, Intergovernmental science-policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, 2023. Thematic Assessment Report on Invasive Alien Species and their Control of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Roy, H. E., Pauchard, A., Stoett, P., and Renard Truong, T. (eds.). IPBES secretariat, Bonn, Germany. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7430682>

Massé C., Viard F., Humbert S., Antajan E., Auby I., Bachelet G., Bernard G., Bouchet V., Burel T., Dauvin J.-C. et al. 2023. An overview of marine non-indigenous species found in three contrasting biogeographic metropolitan French regions: insights on distribution, origins and pathways of introduction. *Diversity-basel* 15, 161. <https://doi.org/10.3390/d15020161>

OPEN, Observatoires Participatifs des Espèces et de la Nature. <https://www.open-sciences-participatives.org/home/>

OpenObs, le Portail français d'accès aux données d'observation sur les espèces. <https://openobs.mnhn.fr/> consulté le 17/12/2023.

Pezy J.-P., Baffreau A., Raoux A., Rusig A.-M., Mussio I., Dauvin J.C., 2021. Non-indigenous species in marine and brackish waters along the Normandy coast. *BioInvasions Records* 10, 755–774.

Sauleau P., Poisson P., Ruault R., 2021. Les sciences participatives dédiées à la mer et au littoral breton : état des lieux, recommandations et perspectives pour les universités ISblue. [Rapport de recherche] IUEM Institut Universitaire Européen de la Mer. hal-03226706

Sciences citoyennes, 2020. <https://sciencescitoyennes.org/rechercheparticipative/>

Serranito B., Diméglio T., Ysnel F., Lizé A., Feunteun E., 2022. Small- and large-scale processes including anthropogenic pressures as drivers of gastropod communities in the NE Atlantic coast: A citizen science based approach. *The Science of the Total Environment* 816, 151600. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.151600

Thibault M., Alonso Aller E., Poisson P., Kerbiriou C., Le Viol I., 2022. Reading the heterogeneity and spatial structuring of benthic habitats in macrophyte wracks. *Ecological Indicators* 142, 109279. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109279>

UICN Comité français et OFB, 2022. Espèces exotiques envahissantes et changements climatiques : quels impacts et conséquences pour la gestion ? https://uicn.fr/wp-content/uploads/2022/01/201120_noteprojet_eclairagescientifique_eee-cc-1.pdf