CENTRE D'ÉTUDE & DE VALORISATION DES ALGUES PRÉFET
DE LA RÉGION
BRETAGNE
Liberté
Égalité
Fraternité

ALGAE TECHNOLOGY & INNOVATION CENTRE

> Identification des zones de dépôts d'algues à risque en Bretagne (IZAR)

Sylvain BALLU Chef de projet Surveillance Marée verte Clément DANIEL Technicien supérieur environnement Loïc CELLIER Technicien géomatique Sophie RICHIER Responsable de Pôle Ecologie et Environnement

**Rapport final 2021** 

Version du 23 avril 2021

CEVA





#### Table des matières

P	réamb	ule	3
R	ésumé		5
1	Con	ntexte et objectifs	10
2	Cad	Irage méthodologique	12
	2.1	Un objectif de cartographie de la dangerosité de certains secteurs	12
	2.2 dépôt	Des mesures de H₂S visant à mieux caractériser le potentiel d'émissions des différents types ts putréfiants	
	2.3	Modalités et attendus des mesures de terrain réalisées en 2019	14
	2.4	Limites d'utilisation des données	15
3	Car	actérisation des zones putréfiantes	. 16
	3.1	Localisation des mesures réalisées	16
	3.2	Caractéristiques des différents types de dépôts putréfiants	17
	3.3	Superficies observées par type de dépôts	24
	3.4	Résultats détaillés des mesures de concentration en hydrogène sulfuré effectuées	26
4	Les	différents types de cartes réalisées	27
	4.1 2018)	Taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (20	
	4.2	Cartes de localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes (2016 à 2019)	28
	4.3 2008-	Carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (période estivale) sur la péri 2019	
5	Suit	tes à donner	32
G	lossair	re - Définitions	33
Δ	NNFXF	FS	35

Annexe 1 : Liste des figures et tableaux

Annexe 2 : Tableau des effets sanitaires chez l'Homme pour des expositions aiguës à l'H2S en fonction de la concentration du gaz et de la durée d'exposition

Annexe 3: Cartes détaillant par secteur le taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (2010-2018), la localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes (période 2016 à 2019), l'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (période estivale, 2008 à 2019, soit 9 inventaires)

Annexe 4: Fiches des relevés réalisés sur les dépôts en putréfaction (22 fiches en pleine page et « prévisualisation » de l'intégralité des relevés 2019)

Annexe 5 : Test méthodologique de détection automatique des dépôts putréfiant par traitement d'images

Annexe 6 : Banques de données exploitées et méthodes déployées pour la cartographie





#### **Préambule**

Depuis 2002, le Centre d'Étude et de Valorisation des Algues (CEVA) étudie le phénomène d'échouages d'algues vertes, à la demande et avec le financement des acteurs publics, dans le cadre de plusieurs réseaux de suivi. Ce suivi régulier vise à mieux apprécier l'évolution du phénomène, en lien avec les caractéristiques environnementales et à mieux caractériser les secteurs les plus touchés. Répondant à de fortes attentes sociétales sur ce sujet, les données recueillies permettent de communiquer aux acteurs publics, élus et collectivités, usagers et grand public, des informations objectives, actualisées, claires et complètes sur le phénomène des algues vertes, en particulier à travers le site internet www.algues-vertes.com et le site du CEVA www.ceva-algues.com.

Du fait de sa connaissance fine du phénomène en lien avec les années de suivi, le CEVA a été chargé de réaliser une étude des dépôts d'algues épais, entrés potentiellement en putréfaction et pouvant présenter un risque sanitaire. Les présents résultats des travaux du programme IZAR (Identification des zones de dépôts d'algues à risque en Bretagne) font suite à une première étude conduite sur le littoral breton en 2010, qui avait permis une première caractérisation des secteurs les plus touchés par le phénomène d'échouages d'algues et présentant des zones en état de putréfaction.

Le programme IZAR conduit en 2019 et 2020 à la demande des services de l'État, a permis de réaliser une analyse actualisée et plus approfondie de ces phénomènes de putréfaction, à partir de survols aériens et de relevés terrains, ceci afin de :

- mieux caractériser le potentiel d'émission d'hydrogène sulfuré (H₂S) des différents types de dépôts putréfiants ;
- mettre à jour la cartographie des localisations, sur le littoral breton, des échouages d'algues vertes et des dépôts en putréfaction, catégorisés en quatre types.

La présente étude du programme IZAR conduit notamment à la production de cartographies de fréquence de présence interannuelle des algues vertes (majoritairement fraîches) et d'occurrence des dépôts putréfiants sur la période 2008-2019, permettant de visualiser les sites où les dépôts ont historiquement été les plus fréquents. Elle ne prétend néanmoins pas prévoir les évolutions à venir sur les sites. Le CEVA conduira des mesures complémentaires à court terme pour affiner les résultats et améliorer encore les connaissances déjà acquises.





## Résumé

#### Contexte

**Les algues vertes font partie de l'écosystème marin breton.** En Bretagne, les marées vertes sont principalement liées à la prolifération d'algues vertes du genre *Ulva*.

Ces algues présentes sur les côtes bretonnes ne représentent aucun danger pour la santé lorsqu'elles sont en mer ou déposées depuis peu, en faible épaisseur, sur la plage. Depuis 2010, les algues vertes sont ramassées systématiquement sur les plages dans le cadre du plan gouvernemental de lutte contre la prolifération des algues vertes (PLAV). En revanche, en cas d'accumulation importante ou lorsque les algues ne peuvent pas être ramassées pour cause d'impossibilité technique, leur décomposition produit en quelques jours des gaz toxiques (l'hydrogène sulfuré, ou H<sub>2</sub>S) dans des « dépôts putréfiants », créant un danger potentiel pour l'homme et pour les animaux. Brasser ces dépôts d'algues en décomposition représente alors un risque pour la santé.

Une première étude réalisée par le CEVA (Centre d'Etude et de Valorisation des Algues) en 2010 a permis de préciser l'ampleur du phénomène et établir une typologie de ces dépôts.

### **Objectifs**

La présente étude a été réalisée sur la période 2019-2020 dans le cadre du programme IZAR (Identification des zones de dépôts d'algues à risque en Bretagne). Elle s'intègre dans une démarche plus globale de suivi des échouages d'algues vertes réalisée par le CEVA depuis 2002.

L'étude IZAR vise à mettre à jour et améliorer les connaissances relatives :

- au potentiel d'émissions à forte teneur en H₂S (hydrogène sulfuré ou sulfure d'hydrogène) des quatre types de dépôts putréfiants potentiellement dangereux (pré-identifiés par le CEVA en 2010), à partir de relevés terrains standardisés et réalisés en 2019;
- à la localisation des zones d'échouages d'algues vertes, en procédant à une analyse interannuelle des dépôts d'algues vertes sur la période 2010-2018, ces zones de dépôts d'algues vertes récurrents étant les plus susceptibles d'engendrer des secteurs de putréfaction ;
- à la localisation et à l'analyse de l'occurrence des zones de dépôts putréfiants, à partir de la photointerprétation de photographies aériennes réalisées sur les périodes 2008-2010 et 2016-2019, pour des dates a priori les plus concernées par ces putréfactions, valorisées par la production de jeux de cartes sur 16 planches délimitées du littoral.

Pour ce faire, les travaux réalisés lors de l'étude ont porté sur :

- la caractérisation des zones putréfiantes, notamment en mesurant les émissions potentielles de H<sub>2</sub>S;
- la localisation des échouages d'ulves et des dépôts putréfiants.



# Caractérisation des émissions potentielles de sulfure d'hydrogène H<sub>2</sub>S

En 2010, afin de rendre compte des situations distinctes repérées sur le littoral, les dépôts putréfiants ont été classés par le CEVA en quatre types, selon leurs caractéristiques :

- 1/ dépôts putréfiés et "encroûtés" d'algues vertes ;
- 2/ échouages d'algues vertes ou sédiments en putréfaction ;
- 3/ plaques d'algues et sédiments en putréfaction sur vasières ;
- 4/ autres cas (algues rouges ou brunes, sédiments nus en putréfaction, etc.).

[NB : Ces dépôts putréfiants doivent être distingués des dépôts d'algues fraîches, de loin les plus fréquents, non putréfiés et donc non émetteurs de gaz toxiques, sans danger d'intoxication.]

Sur chaque dépôt étudié, un protocole spécifique a été mis en place afin de mesurer les émanations d'hydrogène sulfuré dans trois conditions différentes :

- 1 mesure à proximité du dépôt dans l'air « ambiant », à 1,50 m de hauteur ;
- 2 mesure en « semi-confinement », à 10 cm du sol;
- 3 mesure identique à la mesure 2, avec brassage des dépôts.

Ce protocole vise notamment à reproduire une situation particulièrement défavorable qui pourrait être celle d'un animal ou d'un humain qui, par imprudence ou méconnaissance, se trouverait dans une zone fortement putréfiante, respirant à proximité immédiate d'un amas préalablement remué, un jour sans vent.

#### Principaux résultats de l'étude :

- Les valeurs de concentrations mesurées dans les sites de dépôts putréfiants identifiés sont très variables et dépendent de différents facteurs (état de putréfaction du dépôt, conditions météorologiques, autres conditions locales).
- Les quatre types de dépôts ne sont pas caractérisés par des différences significatives de dégagement potentiel d'H<sub>2</sub>S.
- En général, les teneurs à hauteur d'homme restent à des niveaux peu élevés, inférieurs à 5 ppm (parties par million), ce qui ne représente pas de danger (pas de toxicité aiguë).
- En cas de perturbation d'amas putréfiants, les teneurs, au niveau du dépôt, peuvent atteindre des niveaux élevés à très élevés, jusqu'à plusieurs centaines de ppm, potentiellement à l'origine d'intoxications aiguës en cas d'inhalation à ces concentrations.
- Certaines concentrations de H₂S ont atteint jusqu'à 500 ppm. Les valeurs maximales n'ont cependant pas été recherchées afin de ne pas mettre en danger les opérateurs réalisant ces mesures.

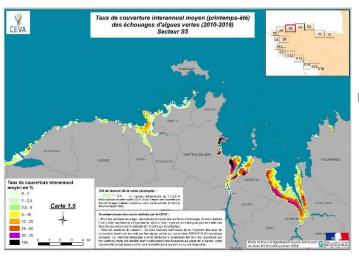


# Une localisation des échouages d'ulves et des dépôts putréfiants sur 16 jeux de cartes

Trois survols aériens par an, réalisés sur l'ensemble des côtes bretonnes depuis 2007, ont permis la localisation des secteurs les plus fréquemment touchés par les dépôts d'algues vertes à partir d'une synthèse interannuelle des dépôts d'ulves constatés sur la période 2010-2018.

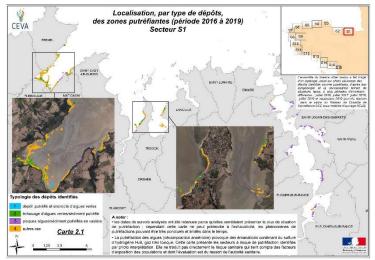
#### Principaux résultats de l'étude :

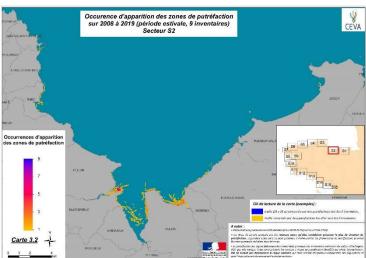
Des jeux de trois cartes thématiques, relevant de 16 secteurs différents des côtes bretonnes, répertorient les zones identifiées.



Exemple de carte représentant le taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes de 2010 à 2018

## Exemple de carte localisant les zones putréfiantes par type de dépôt





Exemple de carte représentant l'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (période estivale) sur la période 2008-2019



Sur la période d'observation d'une dizaine d'années, les superficies des zones putréfiantes sont restées relativement stables (en moyenne 200 hectares chaque année), représentant 0,3 % de la surface totale de l'estran du littoral breton (estimée à 82 000 ha).

L'étude IZAR a permis de localiser les dépôts putréfiants sur le littoral breton sur la période 2016 à 2019. Une analyse de l'occurrence de présence de ces secteurs de putréfaction sur le littoral permet de situer les principaux sites potentiellement dangereux. La date de chaque inventaire annuel a été choisie pour rechercher la situation maximale en matière de couverture de dépôts putréfiants (période estivale).

Les dépôts putréfiants observés couvrent majoritairement les vasières (plus de 54 % des surfaces observées sur 2016-2019, correspondant au type 3 identifié). Plus d'un quart de la surface des dépôts putréfiants observés est constitué de dépôts majoritairement bruns ou rouges en putréfaction ou sédiments nus (type 4 délimité par le CEVA). Les dépôts de type 1 (dépôts putréfiés et "encroûtés" d'algues vertes) ne représentent qu'une faible proportion (moins de 2%) des sites identifiés sur la période 2016-2019.

## Limites de l'étude et points de vigilance pour la lecture et l'interprétation des résultats

L'emplacement des dépôts putréfiants est fortement évolutif, à la fois dans l'espace et dans le temps. Les phénomènes de putréfaction sont rapides, environ 48 heures suffisent en conditions optimales pour qu'ils se développent.

L'identification par le CEVA des secteurs concernés par des putréfactions ne peut prétendre être totalement exhaustive. L'analyse étant conduite sur des photos aériennes, elle peut ignorer des zones de très faible extension, de l'ordre du mètre carré, qui ont déjà pu être décrites lors de parcours terrain avec des concentrations élevées. L'attention du photographe est avant tout ciblée sur les échouages d'algues vertes (mission première du CEVA). Enfin, quelques secteurs (îles, zones interdites de survol) ne sont pas survolés (ou le sont de loin).

Les mesures et caractérisations de l'étude ont été effectuées en conditions estivales, potentiellement maximisantes, et ne représentent ainsi pas une situation moyenne pour un secteur donné. De plus, les observations (mesures de H<sub>2</sub>S, analyse des survols aériens) ont été réalisées à un instant donné, dans certaines conditions météorologiques (températures, conditions d'ensoleillement et de vent) dont dépendent fortement la prolifération d'ulves et leur putréfaction.

L'approche est par ailleurs probabiliste. Elle permet d'identifier les zones les plus souvent touchées par le passé, sans permettre d'être en mesure de prédire l'évolution de ces sites ou l'emplacement des futurs échouages (conditions courantologiques annuelles particulières, modifications topographiques...).

L'étude ne permet pas de garantir que d'autres secteurs ne sont pas touchés ou ne le seront pas à l'avenir. La perception de la situation des putréfactions a permis de repérer les secteurs potentiellement les plus sensibles à ces phénomènes, compte-tenu des modifications possibles de morphologie des baies, des déplacements de masse d'algues en fonction de courant ou vent inhabituels. L'intégralité des zones potentiellement sujettes aux dépôts putréfiants à moyen et long termes ne peut donc, par définition, être identifiée de façon absolue, mais les zones de dépôt les plus probables ont pu être identifiées par l'analyse de nombreuses années.



## Une étude de référence à la disposition des acteurs publics

L'étude IZAR a permis d'établir des cartographies des espaces de l'estran les plus régulièrement concernés par les échouages d'algues vertes et la présence de dépôts putréfiants potentiellement dangereux. A ce titre, et en tenant compte des réserves et limites inhérentes à toute étude, ces cartographies fournissent des informations mobilisables par tous les acteurs publics ayant en charge la gestion des espaces côtiers bretons.

Les résultats de la présente étude s'adressent aux élus mais également au grand public, dans un souci de mise à disposition facilitée d'une information transparente et actualisée, intégrant les dernières avancées scientifiques. Cependant cette étude n'a pas pour objet de caractériser le risque sanitaire, ce qui nécessiterait un croisement avec le niveau d'exposition de la population lié aux usages des sites et à leur fréquentation.

Pour prolonger cette étude et affiner ces résultats, des relevés complémentaires de terrain seront réalisés, a minima sur la période 2021-2023, afin de renforcer les connaissances sur les secteurs concernés par ces dépôts putréfiants. Les survols aériens seront en parallèle poursuivis, permettant d'assurer le suivi pluriannuel du phénomène des algues vertes et putréfactions, engagé depuis maintenant bientôt 20 ans.



### 1 Contexte et objectifs

#### Un suivi resserré des échouages d'algues vertes depuis 2002

Depuis 2002, le Centre d'Étude et de Valorisation des Algues (CEVA) suit le phénomène de marées vertes sur l'ensemble du littoral breton, afin d'acquérir une connaissance fine des lieux d'échouage d'ulves.

Pour assurer ce suivi, plusieurs survols aériens sont réalisés par an (4 de 2002 à 2006 puis 3 par an depuis 2007 dans le cadre de la Directive cadre sur l'Eau (DCE), sous maîtrise d'ouvrage de l'Ifremer de 2007 à 2016 et de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne depuis). Trente secteurs plus touchés par les échouages font depuis 2002 l'objet de suivis complémentaires avec au total 7 survols par an.

Pour compléter cette perception aérienne, le CEVA procède à des contrôles de terrain réguliers permettant de confirmer les espèces d'algues perçues lors des survols. En plus de ces observations routinières, sur certains sites, des observations complémentaires sont réalisées afin de bien mettre en parallèle l'aspect des dépôts vus d'avion avec des typologies de dépôts épais et potentiellement en putréfaction. Ces typologies ont été établies à partir de mesures de H<sub>2</sub>S réalisées *in situ* par le CEVA, dont les opérateurs sont équipés de capteurs H<sub>2</sub>S portables. Les informations recueillies sont ensuite bancarisées par le CEVA (sous forme de données numériques) permettant de cartographier les dépôts d'ulves constatés chaque année, depuis 2002, y compris des dépôts de haut de plage pouvant présenter des putréfactions. L'analyse des clichés aériens de certaines campagnes croisée avec la connaissance des échouages dont l'aspect est « putréfiant » a permis de déterminer les zones les plus susceptibles de présenter des teneurs en H<sub>2</sub>S élevées, c'est-à-dire potentiellement les plus dangereuses.

#### Une première étude des zones touchées par les dépôts putréfiants réalisée en 2010

Suite au décès d'un cheval et à la perte de connaissance de son cavalier le 28 juillet 2009 sur la plage de Saint-Michel-en-Grève, l'INERIS a été mandaté par le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer (MEEDM) afin de réaliser des mesures le 13 août 2009, sur le lieu de l'accident, à l'exutoire du Roscoat. Ces mesures ont mis en évidence des teneurs des gaz émis par les algues en putréfaction et le sédiment sous-jacent (H<sub>2</sub>S en particulier) pouvant atteindre les limites d'intoxication aiguë (mortalité en quelques dizaines de secondes) en cas d'inhalation de ces gaz à ce niveau de concentration.

Afin de mieux caractériser et inventorier ces zones « à risque », le CEVA a réalisé une première étude sur l'ensemble du littoral breton en 2010 (dans le cadre du CIMAV - Cellule d'intervention sur les marées vertes sur financement des 4 Départements bretons, de la Région Bretagne et de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne). Ce travail, basé sur l'analyse de six survols (quatre de l'ensemble du littoral, deux spécifiques aux vasières) réalisés de 2008 à 2010, a permis de produire un premier atlas des zones « potentiellement les plus dangereuses». L'analyse avait alors été menée sur les périodes (mois et années d'inventaires) définies comme les plus touchées par les échouages en état de putréfaction, l'objectif étant de cerner les secteurs les plus « sensibles ».



## Une nouvelle étude conduite en 2019-2020 pour actualiser et améliorer les connaissances sur les dépôts putréfiants

Le programme IZAR (Identification des zones de dépôt d'algues à risque en Bretagne), initié en juillet 2019 par la Mission Interdépartementale et Régionale de l'Eau (MIRE) de la préfecture de région Bretagne et sur financement inter-ministériel se propose de :

- rechercher des éléments pour mieux caractériser le potentiel d'émission en H₂S des quatre types de dépôts pré-identifiés par le CEVA en 2010 ;
- de mettre à jour la cartographie des localisations des zones d'algues vertes, en procédant à une analyse interannuelle du taux de couverture des dépôts d'algues vertes sur la période 2010-2018 ;
- de localiser les zones putréfiantes sur la période 2016-2019, en utilisant les données de survols récents des côtes ;
- et enfin, de repérer les zones à très forte occurrence de putréfaction et les zones moins fréquemment touchées sur la période 2008-2019.

#### Une amélioration des connaissances dont le caractère prédictif n'est pas absolu

Comme cela avait déjà été clairement présenté lors de l'étude de 2010, l'étude IZAR montre la grande diversité des situations constatées et leur caractère fortement évolutif dans le temps et dans l'espace. Outre les vastes zones de putréfaction identifiées (comme par exemple l'exutoire du Roscoat, en baie de Lieue de Grève, ou la plage de la Granville à Hillion, en baie de Saint-Brieuc) sur lesquelles les émanations de H<sub>2</sub>S ont été « historiquement » mises en évidence, il existe aussi des micro-zones d'accumulation, parfois de seulement quelques mètres carrés, qui peuvent présenter également des émanations concentrées et ne pas être perçues lors de survols parfois à plus de 1 000 m d'altitude. De plus, la putréfaction des algues vertes, dans les conditions « optimales » (température élevée, présence d'eau douce, mélange avec des vases, absence de vent ...) est très rapide, de l'ordre de 48 heures, rendant les situations très évolutives.

Pour ces deux raisons, il est important de souligner que l'analyse des séries de données utilisées ne permet pas de fournir un repérage exhaustif des secteurs « à risque » de présenter des émissions de H<sub>2</sub>S à de fortes concentrations, potentiellement dangereux. Les modifications de la morphologie des baies jouent également un rôle, notamment en fonction de la météorologie hivernale, plus ou moins agitée, qui remodèle les bancs de sable et les tracés des filières d'eau douce qui en dépendent. Ces évolutions peuvent induire des changements dans les zones de dépôt et leur propension à entrer en putréfaction. Aussi, l'analyse des localisations des zones de putréfaction des années antérieures n'offre-t-elle pas de garantie de pouvoir identifier toutes les zones de putréfaction des années à venir.

Pour autant, les travaux conduits dans cette étude donnent des informations les plus précises disponibles sur les espaces de l'estran les plus régulièrement concernés par les échouages d'algues et la présence de dépôts putréfiants potentiellement dangereux. A ce titre, et en tenant compte des réserves et limites inhérentes à toute étude, et qui sont précisées dans ce rapport pour ce qui concerne IZAR, les cartographies réalisées par le CEVA fournissent des informations mobilisables par tous les acteurs publics ayant en charge la gestion des espaces côtiers bretons.



## 2 Cadrage méthodologique

La réalisation de survols aériens en 2019 a permis l'identification de sites apparemment concernés par des putréfactions, d'après leur morphologie perçue en aérien. Des mesures spécifiques de la concentration en H₂S ont ensuite été réalisées sur ces secteurs pré-identifiés.

### 2.1 Un objectif de cartographie de la dangerosité de certains secteurs

L'analyse proposée dans cette étude ne concerne que le repérage, sur le littoral breton, des situations de putréfaction, en particulier d'algues, pouvant générer des émanations de gaz soufrés, dont le sulfure d'hydrogène  $H_2S$ , source de nuisance olfactive et de danger à forte concentration. La notion de risque sanitaire (comprenant l'exposition des populations) n'est pas du ressort du CEVA et n'est pas abordée dans cette étude. Cette étude ne vise pas la caractérisation du risque sanitaire, qui reposerait sur le croisement du niveau de dangerosité avec l'exposition des populations.

Pour caractériser les zones de « danger potentiel » d'intoxication aiguë par le H<sub>2</sub>S, des mesures ont été réalisées sur des dépôts qui, d'après leur **aspect sur les photos aériennes**, **pourraient présenter des putréfactions**. Il n'est pas question, ici, de caractériser finement l'émissivité de chaque dépôt (données variables suivant les conditions) mais de tenter d'établir **un lien entre l'aspect visuel d'un dépôt et les valeurs « élevées potentielles » de H<sub>2</sub>S associées à ces dépôts (plusieurs dizaines de ppm) afin de valider leur caractère de « <b>danger potentiel »**, dans le respect de conditions de mesures assurant la sécurité des opérateurs et le bon fonctionnement des capteurs (l'exposition à des valeurs élevées peut provoquer un dés-étalonnage des capteurs).

## 2.2 Des mesures de H<sub>2</sub>S visant à mieux caractériser le potentiel d'émissions des différents types de dépôts putréfiants

Les mesures de H<sub>2</sub>S ont été réalisées à la suite des survols aériens effectués en 2019 (à partir du vol de juillet, date de démarrage du projet). Immédiatement après les survols, une liste de sites à contrôler a été établie et les contrôles de terrains sur les secteurs apparemment en putréfaction ont été mis en œuvre dès le lendemain du survol et dans les quelques jours qui suivent. Cette méthode permet de s'approcher au mieux des teneurs présentes au moment du survol, même si les conditions plus spécifiques du jour de mesure (température, vent, temps d'émersion, état de « fraîcheur » du dépôt …) jouent fortement. Les relevés ont majoritairement été réalisés en conditions pouvant être qualifiées de maximisantes pour l'apparition de dépôts putréfiants et la production de gaz soufrés (en été : température plus élevée, ensoleillement maximal, conditions de vent réduites), avec les limites identifiées infra (2.4).

L'ensemble des mesures réalisées a fait l'objet de fiches de description reprenant les valeurs mesurées. Outre les dépôts ayant fait l'objet des mesures spécifiques décrites ci-dessus, le caractère « putréfiant » du dépôt a dans certains cas été déterminé en l'absence de mesures, à partir des photos aériennes, par l'expérience acquise par les opérateurs du CEVA (aspect du dépôt, odeur dégagée) et reporté dans les fiches de relevés de terrain.

Afin de mieux caractériser la présence de  $H_2S$  des dépôts en fonction de leur aspect, les opérateurs de terrain, équipés de capteurs portables à cellule électrochimique  $H_2S$  [0,1–500 ppm], ont effectué des mesures ponctuelles en utilisant un dispositif simple permettant une certaine standardisation des mesures : dispositif créant un espace semi-confiné limitant l'impact du vent et fixant la hauteur du détecteur à 10 cm par rapport au substrat (Figure 1).

Il n'a pas été question ici de chercher les valeurs maximales possibles de ces dépôts (pas de mise en danger des opérateurs ni de détérioration des cellules des capteurs). Pour autant, la détection de teneurs supérieures à quelques dizaines de ppm de H<sub>2</sub>S suffit, dans le cadre de la présente étude, à déterminer une dangerosité potentielle d'un dépôt, susceptible d'émettre, dans certaines conditions plus « défavorables », des teneurs qui pourraient aller jusqu'au seuil de toxicité aiguë.



Ce dispositif permet de caractériser un risque potentiel lié aux teneurs en H₂S des différents types de dépôts. Afin d'apprécier la diversité des niveaux de teneurs mesurables dans le milieu, trois types de mesures ont été effectués :

- 1 Mesure à proximité du dépôt dans l'air « ambiant », à 1,50 m de hauteur, permettant de caractériser l'exposition d'un promeneur passant près de ce dépôt ;
- 2 Mesure en « semi-confinement », à 10 cm du sol, permettant de caractériser l'exposition potentielle d'un animal ou d'une personne (ramasseur d'algue, enfant marchant à « 4 pattes », enfant en recherche d'un ballon atterri sur un amas en putréfaction,...);
- 3 Brassage et mesure en « semi-confinement », à 10 cm du sol, permettant de caractériser l'exposition potentielle d'un animal ou d'une personne (ramasseur d'algue, enfant marchant à « 4 pattes », enfant en recherche d'un ballon atterri sur un amas en putréfaction,...) après grattage ou brassage des dépôts.

Mesure de Type 1



Mesure de type 2





Mesure de type 3

Figure 1 : Illustration des trois mesures réalisées (air ambiant, semi-confinement avant et après brassage)



### 2.3 Modalités et attendus des mesures de terrain réalisées en 2019

Les mesures réalisées présentent des teneurs qui sont très variables et dépendent :

- de l'état de putréfaction du dépôt,
- des conditions météorologiques lors de la mesure :
  - absence de vent/vent soutenu entraînant une dilution très rapide des teneurs,
  - température de l'air et ensoleillement (effet de réchauffement du sédiment et des amas d'algues) qui vont accélérer la putréfaction,
- de la durée depuis que la marée s'est retirée : temps plus ou moins long pour que la putréfaction ait lieu et que les conditions deviennent favorables aux putréfactions (température du sédiment devenant plus élevée, saturation en eau qui baisse, taux d'oxygène qui diminue...),
- de conditions locales entraînant le maintien de la saturation en eau du milieu ou au contraire un drainage plus rapide du dépôt. Il semble qu'en cas de maintien d'une saturation en eau, le milieu, bien qu'en putréfaction, présente des teneurs de H₂S dans l'air moins élevées (probablement à la faveur de teneurs dissoutes plus élevées entraînant potentiellement des impacts environnementaux négatifs sur la faune benthique).

L'objectif de la présente étude étant le repérage des secteurs potentiellement dangereux, le protocole mis en place cherchait à reproduire des conditions de risque d'exposition à des valeurs élevées (d'après nos connaissances des teneurs et leur dynamique temporelle). Le protocole de mesure en semi-confinement (10 cm du dépôt et brassage de celui-ci) tente donc de reproduire une situation particulièrement défavorable qui pourrait être celle d'un animal ou d'une personne (ramasseur d'algue, enfant en recherche d'un ballon atterri sur un amas en putréfaction,...) qui, par imprudence ou ignorance de la dangerosité se trouverait dans un amas fortement putréfiant, respirant proche du sol préalablement remué, un jour sans vent.

Les teneurs reportées (cf. partie 3.4 et annexe 4) ont donc été relevées dans cet objectif de **déterminer les valeurs élevées correspondant à ces dépôts.** Pour autant, une partie des mesures a été réalisée dans des conditions moins optimales que souhaitées (contraintes liées aux délais courts après les survols, eux même déclenchés en fonctions des conditions de coefficient de marée, de plafond nuageux et de conditions de dépôts des algues) : des jours de température peu élevée, ou avec un vent soutenu impliquant une forte dilution (même en « semi-confinement), parfois peu de temps après l'exondation du dépôt.

De plus, les consignes données aux opérateurs n'ont jamais été de rechercher les valeurs « les plus élevées possible ». En effet, de telles préconisations pourraient engendrer des prises de risques inutiles pour les opérateurs et le fait d'exposer les cellules électrochimiques des capteurs à des valeurs élevées trop fréquemment génère potentiellement un dés-étalonnage du capteur (le capteur n'est plus en mesure de produire des données fiables). La simple détection, pour un dépôt donné, de teneurs supérieures à quelques dizaines de ppm de H<sub>2</sub>S, suffit, dans le cadre de cette étude à déterminer une dangerosité potentielle d'un tel dépôt susceptible d'émettre dans certaines conditions plus « défavorables » des teneurs qui pourraient aller jusqu'au seuil de toxicité aiguë.



#### 2.4 Limites d'utilisation des données

Les données reportées dans les cartes du présent rapport reposent sur l'analyse à certaines périodes (5 inventaires sur 4 années) de la perception, sur photo aérienne, de zones en état de putréfaction « probable ». Ces photo-interprétations s'appuient sur des mesures réalisées sur le terrain qui permettent de confirmer la bonne perception de ces dépôts. Pour une date donnée, on peut donc considérer que les secteurs les plus manifestement concernés par ces putréfactions sont bien reportés sur les cartes.

Cependant, il est important de considérer que les reports proposés ici ne peuvent être considérés comme totalement exhaustifs :

- Certains secteurs ne sont pas survolés ou survolés « de loin » (cf. rapports annuels du Réseau de Contrôle de Surveillance (RCS¹), avec quelques secteurs non suivis, notamment au niveau des îles ou des photos « plus générales » sur les zones qui ne sont pas concernées par des dépôts d'algues vertes).
- Les suivis du Ceva concernent la **surveillance des proliférations d'ulves**. Il est donc possible que des amas d'autres algues manifestement « non ulves » (algues rouges ou brunes ; sédiment en putréfaction) ne soient pas systématiquement pris en photos. Cependant, la thématique « putréfaction » étant depuis quelques années prégnante, nous pouvons considérer que les cas les plus manifestes sont bien photographiés.
- Les **putréfactions peuvent être très ponctuelles** (des zones de quelques m² voire moins peuvent dans certains cas engendrer des teneurs très élevées) et non perceptibles lors de survol entre 1 500 et 5 000 pieds.
- Les phénomènes de **putréfaction étant rapides** (environ 48 h, en conditions optimales), la perception des secteurs concernés sur une donnée annuelle (même la « pire ») ne peut garantir que d'autres secteurs n'ont pas été touchés à d'autres périodes de l'année ou ne le seront pas à l'avenir.

Enfin la perception de la situation des putréfactions pour les différentes années du passé **permet de repérer** les secteurs les plus sensibles à ces phénomènes sans pour autant garantir que d'autres secteurs ne seront pas touchés à l'avenir : notamment du fait de **modifications possibles de la morphologie des baies** (hivers qui remodèlent les bancs de sable et tracés des filières d'eau douce ...), mais aussi de **déplacements de masse** d'algues en fonction de courants ou vents inhabituels.

L'analyse des situations des années antérieures ne peut donc pas **prétendre identifier l'intégralité des zones qui seraient « sensibles » à des putréfactions dans les années à venir**.

Rapport IZAR période 2019-2020

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Rapports consultables sur le site CEVA https://www.ceva-algues.com/document/etude-et-suivi-des-marees-d-algues-vertes-en-bretagne/



## 3 Caractérisation des zones putréfiantes

#### 3.1 Localisation des mesures réalisées

Le CEVA a établi en 2010 une typologie des dépôts putréfiants pouvant être rencontrés sur le littoral breton. Les caractéristiques de chacun des quatre types ont été enrichies dans le cadre du programme IZAR.

Les dépôts putréfiants peuvent être regroupés selon les quatre types suivants :

- Type 1 : Dépôts putréfiés et « encroûtés » d'algues vertes ;
- Type 2 : Échouages d'algues vertes (en proportion importante) ou sédiment, en putréfaction ;
- Type 3 : Plaques d'algues ou sédiment, en putréfaction sur vasières ;
- Type 4 : Autres cas : sédiments nus (absence d'algues apparentes) en putréfaction ; dépôts majoritairement bruns ou rouges en putréfaction.

**A noter :** Il est essentiel de conserver à l'esprit que la très grande majorité des dépôts d'algues rencontrés par les usagers sur les côtes bretonnes sont parfaitement sans danger, car constitués d'algues fraîches, n'émettant aucun gaz dangereux. Il s'agit d'un « Type 0 », sans émissivité d' $H_2S$ , que nous décrivons à toutes fins utiles dans les pages suivantes.

Les secteurs pouvant présenter des putréfactions ont été identifiés d'après leur morphologie perçue lors des survols aériens. La Figure 2 présente les localisations des 120 sites de mesures, répartis sur la totalité du linéaire régional. Pour chaque cas, le « type de putréfaction » a été déterminé par le CEVA (aspect du dépôt se rapprochant le plus d'un des 4 types déterminés dans l'étude de 2010 et repris ici).

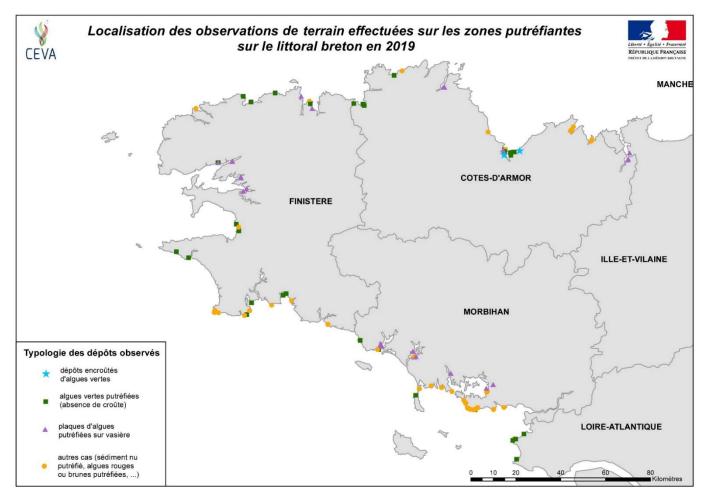


Figure 2 : Localisation des 120 observations de terrain réalisées sur les zones putréfiantes sur le littoral breton en 2019



### 3.2 Caractéristiques des différents types de dépôts putréfiants

La photo-interprétation est pertinente pour identifier les zones de putréfaction : les mesures de terrain ont permis de confirmer les émanations de H<sub>2</sub>S sur les figures de putréfaction pré-identifiées lors des survols.

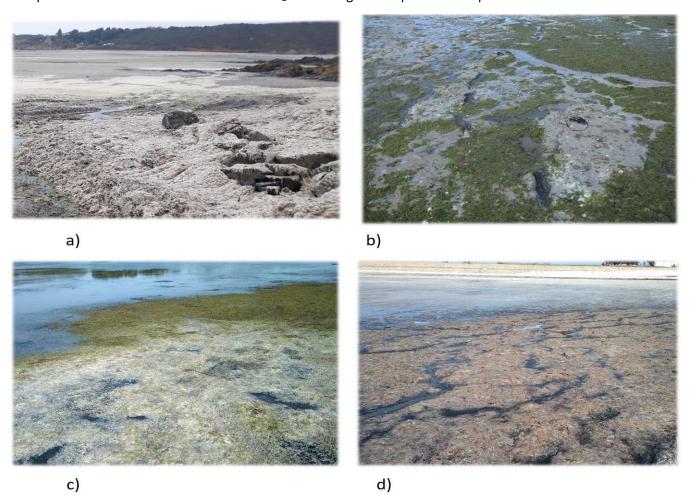


Figure 3 : Illustration de quatre types de dépôts putréfiants reportés sur le littoral breton lors des prospections de la fin d'été 2019 et printemps 2020 :

- a) dépôt de type 1 observé dans la Baie de Saint-Brieuc le 9 septembre 2019,
- b) dépôt de type 2 observé sur le fond de l'anse de Locquirec le 17 septembre 2019,
- c) dépôt de type 3 observé une vasière de la Ria d'Etel le 27 mai 2020,
- d) dépôt de type 4 observé sur Saint Gildas de Rhuys, la plage de Saint Jacques le 19 août 2019.

Chaque type de dépôt présente ses propres caractéristiques (état de putréfaction, lieu d'échouage préférentiel, potentiel d'émission, aspect visuel) présentées ci-après sous forme de « fiche descriptive». Pour autant les distinctions entre certains types sont parfois difficiles à établir, les types se recoupant en partie (par exemple, échouages d'algues vertes/sédiment en putréfaction et plaques d'algues/sédiment en putréfaction sur vasière, ...). Les éléments présentés dans les fiches ci-après sont détaillés en annexes 3 et 4. Une analyse synthétique est par ailleurs présentée dans les parties 3.3 et 3.4.



Caractéristiques	Algues vertes fraîches				
Lieux d'échouage	Vasières, baies sableuses				
Dangerosité potentielle	Nulle : aucune émanation de gaz détectée (0 ppm), y compris en brassant l sédiment				
Illustrations des dépôts d'algues fraîches non putréfiantes	Exemple de dépôt d'algues vertes fraîches sur baie sableuse ; aucune détection d'H <sub>2</sub> S, y compris en brassant les algues ou le sédiment				
	Exemple de vasière présentant un dépôt d'algues vertes fraîches				

Rapport IZAR période 2019-2020

Aucune émanation détectée, y compris en brassant le sédiment



#### • Type 1 : dépôts putréfiés et encroûtés d'algues vertes

#### Caractéristiques

Ce type de dépôt se forme par l'accumulation d'algues en haut de plage, non reprises par la marée en situation de coefficients de marée décroissants et non ramassés (ce qui, depuis 2010, n'est plus observé qu'en cas d'impossibilité technique de ramassage par les collectivités locales).

Dans le cas de dépôts d'algues vertes, la morphologie en « feuille de laitue » des Ulves est particulièrement propice à la constitution de dépôts compacts, présentant un cœur humide, protégé en surface par une croûte asséchée qui réduit les échanges gazeux. Cette typologie de dépôt augmente l'anoxie et privilégie la décomposition des ulves par fermentation anaérobie tout en empêchant la dispersion progressive des gaz produits, dont le sulfure d'hydrogène.

Ce premier type de dépôt est caractérisé par :

- une croûte blanche qui se forme en surface et des zones sombres (bleutées à noires) visibles sur les photos aériennes;
- une épaisseur généralement importante (de 10 cm à 1 m, exceptionnellement plus). Ces « andains », au bout de quelques jours (durée variable en fonction des paramètres notamment climatiques), dégagent une odeur caractéristique d'œuf pourri. Des jus noirâtres sont visibles en général en partie basse du dépôt.

#### Lieux d'échouage

Haut de plage (entre 0,1 et 3,2 % de la superficie totale moyenne des dépôts putréfiants constatée sur 2016-2019)

### Valeurs obtenues pour les mesures de H₂S réalisées

Valeurs relevées dans le cadre de cette étude :

- air ambiant : min = 0 ; max = 1.9 ppm
- semi-confinement : min = 0 ; max = 72.5 ppm
- semi-confinement et brassage : min = 0 ; max > 500 ppm

(NB: ces valeurs brutes ont été relevées dans le cadre de cette étude, et correspondent à des conditions spécifiques (vent, température...). Elles ont de plus été réalisées sans chercher forcément les valeurs extrêmes afin de ne pas mettre en danger les opérateurs).

# Illustrations des dépôts de Type 1



Exemples de dépôts épais ponctuels relevés en 2019 sur un secteur n'ayant pu faire l'objet de ramassage





## • <u>Type 2: échouages d'algues vertes (en proportion importante) ou sédiment, en</u> putréfaction

## Caractéristiques Ce type d'échouage se caractérise par : - un dépôt constitué d'au moins 1/3 d'algues vertes type ulves ; un échouage qui présente un aspect vert foncé à noir à l'intérieur, et des traces d'irisation perceptibles sur les photos aériennes : • en secteur de plage, le sable sous le dépôt, très enrichi par l'apport de matière organique, prend une couleur foncée, grise voire noire; dans les zones d'estuaire, une croûte blanche peut se former et « flotter » en surface. La présence d'eau douce serait un facteur augmentant la rapidité de la putréfaction; des odeurs nauséabondes dues aux émissions de gaz soufrés qui peuvent émaner de ce type de dépôt. Lieux d'échouage Plage, estuaire (entre 10 et 25 % de la superficie totale moyenne des dépôts putréfiants constatée sur 2016-2019) Valeurs obtenues pour Valeurs relevées dans le cadre de cette étude<sup>2</sup>: les mesures de H<sub>2</sub>S air ambiant : min = 0 ; max = 17 ppm réalisées semi-confinement : min = 0; max = 76.2 ppm - semi-confinement et brassage : min = 0 ; max > 500 ppm (NB : ces valeurs brutes ont été relevées dans le cadre de cette étude, et correspondent à des conditions spécifiques (vent, température...). Elles ont de plus été réalisées sans chercher forcément les valeurs extrêmes afin de ne pas mettre en danger les opérateurs). Illustrations des dépôts de Type 2 Exemple de dépôts algues vertes + sédiment putréfaction relevé en 2019

2 Les mesures réalisées le 13 août 2009 par l'INERIS sur ce type de dépôt ont mis en évidence la présence de différents gaz, le H<sub>2</sub>S étant le plus préoccupant avec des teneurs pour certains des prélèvements qui atteignaient 1 000 ppm en conditions d'accumulation (sous cloches). Ces concentrations extrêmement élevées en H<sub>2</sub>S, au-delà du seuil de toxicité aiguë, peuvent entraîner la mort en quelques minutes.



#### Type 3 : plaques algues et sédiment en putréfaction sur les vasières

#### Caractéristiques

Sur vasière, la biomasse d'algues vertes est peu mobile, avec des effets de colmatage plus durables du sédiment, notamment en cas de tapis continu d'algues vertes (et plus particulièrement d'ulves dont l'effet colmatant semble supérieur). Dans les cas de biomasses importantes et plus particulièrement dans les zones plus hautes de vasières restant hors d'eau plusieurs heures d'affilée voire plusieurs cycles de marées en petits coefficients de marées, des plaques d'algues peuvent entrer en putréfaction et renforcer l'anoxie du sédiment sous-jacent.

Ce type de dépôt présente les caractéristiques suivantes :

- l'échouage d'algues, majoritairement sous forme de tapis continu, est en décomposition ainsi que le sédiment sous-jacent généralement très riche en matières organiques et en situation d'anoxie;
- des traces d'irisation sont repérables par leur couleur bleutée à noire, et une nuance rosée apparaît parfois;
- les secteurs en putréfaction sont de tailles très variables, ils peuvent former des plaques très localisées (<1 m de diamètre) ou bien de très grandes zones intégralement en décomposition.

#### Lieux d'échouage

Vasières (entre 48 et 65 % de la superficie moyenne des dépôts putréfiants constatée sur 2016-2019)

#### Valeurs obtenues pour les mesures de H₂S réalisées

Valeurs relevées dans le cadre de cette étude :

- air ambiant : min = 0 ; max = 3 ppm
- semi-confinement : min = 0 ; max = 233 ppm
- semi-confinement et brassage : min = 0 ; max > 500 ppm

(NB: ces valeurs brutes ont été relevées dans le cadre de cette étude, et correspondent à des conditions spécifiques (vent, température...). Elles ont de plus été réalisées sans chercher forcément les valeurs extrêmes afin de ne pas mettre en danger les opérateurs).

## Illustrations des dépôts de Type 3





Exemple de dépôts algues vertes en putréfaction sur vasière relevé en 2019





## • Type 4: autres cas : sédiments nus (absence d'algues apparentes) en putréfaction ; dépôts majoritairement bruns ou rouges en putréfaction.

#### Caractéristiques

Certaines configurations de dépôts rencontrés sur le littoral provoquent manifestement des teneurs élevées de sulfure d'hydrogène et ne peuvent être rattachés aux 3 types précédemment décrits. Bien que ces cas ne relèvent pas de dépôts importants d'algues vertes, il nous apparaît nécessaire de mentionner ces cas.

Il s'agit du cas de sédiments nus (apparemment sans algues) mais néanmoins en putréfaction ou de dépôts majoritairement bruns ou rouges également en putréfaction. Ces cas de figures ne sont pas intégrés dans la base de données interannuelle du suivi des marées vertes (pas de digitalisation lors des suivis car il ne s'agit pas d'échouage d'ulves) et ne figurent donc pas forcément sur les cartes de dépôts interannuels.

#### Les cas de sédiments putréfiés sont caractérisés par :

- l'aspect du sédiment (sable ou vase) : de blanc-gris à noir ;
- l'absence d'échouage apparent d'algues. Des algues peuvent cependant avoir enrichi le sédiment préalablement et/ou être enfouies donc non visibles dans des cas particuliers.

Un autre cas particulier de dépôt engendrant des émissions de teneurs élevées en  $H_2S$  est constitué par des **échouages d'algues brunes et/ou rouges en putréfaction**. Ces échouages sont identifiables par :

- leur composition: l'échouage paraît très brun ou rouge. A noter qu'il est probable que des teneurs d'algues vertes, même minoritaires, accélèrent la putréfaction de ces dépôts. Les algues vertes étant a priori plus rapidement décomposées, ce sont les autres algues du dépôt qui paraissent à l'origine de la putréfaction, ce qui n'est peutêtre pas entièrement le cas;
- le sédiment sous-jacent apparaît noirci sous les dépôts; des traces d'irisation et des écoulements de jus de putréfaction sont parfois repérables au niveau des andains et des dépôts les plus importants. Ces « jus noirâtres » sont de même aspect que ceux observés sur certains échouages d'algues vertes. Ces signes ne sont néanmoins pas toujours bien visibles.

#### Lieux d'échouage

Plages, vasières (entre 14 et 33 % de la superficie totale moyenne des dépôts putréfiants constatée sur 2016-2019)

#### Valeurs obtenues pour les mesures de H₂S réalisées

Valeurs relevées dans le cadre de cette étude :

- air ambiant : min = 0 ; max = 4.1 ppm
- semi-confinement : min = 0 ; max = 214 ppm
- semi-confinement et brassage : min = 0 ; max = 345 ppm

(NB : ces valeurs brutes ont été relevées dans le cadre de cette étude, et correspondent à des conditions spécifiques (vent, température...). Elles ont de plus été réalisées sans chercher forcément les valeurs extrêmes afin de ne pas mettre en danger les opérateurs).



## Illustrations des dépôts de type 4



Exemple de vue aérienne d'un dépôt dominé par des algues rouges en putréfaction (haut estran) et de sédiment en putréfaction (bas estran)



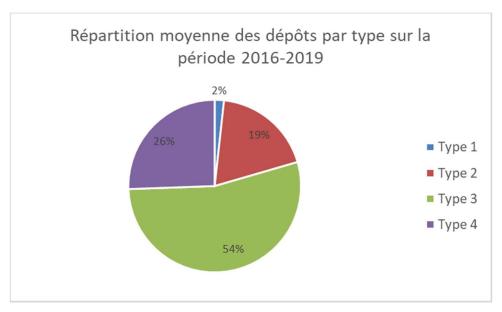


Exemple de vue de terrain d'un dépôt dominé par des algues rouges (photo du haut) en putréfaction (haut estran) et de plaques de sédiment en putréfaction (photo de gauche)



### 3.3 Superficies observées par type de dépôts

L'ensemble des polygones photo-interprétés, sur les campagnes photo de 2016 à 2019, comme en étant en putréfaction est rassemblé dans la base de données SIG CEVA. Il est donc possible sur cette base d'analyser les surfaces concernées pour chacun des 4 types de dépôts, par secteur géographique, par date ou par nature de site (vasière vs plage).



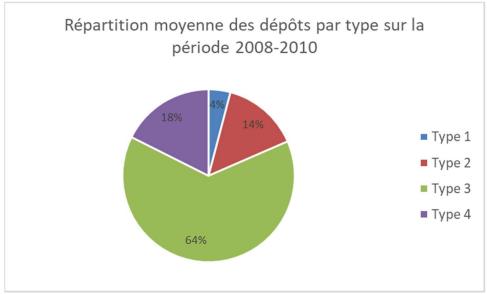


Figure 4 : Répartition des dépôts putréfiants par type sur les périodes 2008-2010 et 2016-2019

La surface totale moyenne annuelle du littoral concernée par les putréfactions est d'environ 200 ha sur la période 2016-2019 (synthèse des 4 inventaires réalisés en juillet de chaque année), contre 190 ha constatés par an sur la période 2008-2010 (il est cependant possible que cette estimation des dépôts constatés en 2008-2010 soit sous-estimée du fait de la moindre couverture photographique probable des situations de putréfaction à l'époque ; les suivis étant plus exclusivement centrés sur les mesures des surfaces de dépôts d'algues vertes). Pour rappel, chaque estimation est réalisée en prenant des inventaires qui semblent les plus concernés par ces situations de putréfaction (maximum annuel).



Pour ce qui est des putréfactions par « type », on note sur la période 2016-2019 :

- les **putréfactions de type 3** (putréfaction sur vasière) représentent le plus de **surface avec 54 % des surfaces** en moyenne,
- le **type 4** (Autres cas : sédiments nus en putréfaction ; dépôts majoritairement bruns ou rouges en putréfaction) **suit avec 26 % des surfaces** (jusqu'à 33 % en septembre 2019),
- le type 2 (échouages d'algues vertes /sédiment en putréfaction) représente 19 %,
- le **type 1** (dépôts putréfiés et « encroûtés » d'algues vertes) est modeste en superficie avec moins de 2 % (jusqu'à 3 % en juillet 2016 et juillet 2018)

Il ressort donc que les putréfactions sont le plus souvent décrites **sur vasière et avec une implication du sédiment** (type 3, une majorité des dépôts de type 4 et type 2) et que le cas le plus souvent décrit (type 1 : andains « encroûtés » emprisonnant les gaz) représente, en fait, une faible surface lors de ces dernières années 2016-2019 analysées.

Il convient d'ajouter que la **limite entre ces types de putréfaction n'est pas absolue** et est donnée à titre d'indication. En effet, un secteur ayant accumulé des amas d'algues durant plusieurs semaines (type 1 ou type 2) aura tendance à devenir de plus en plus vaseux et pourra alors être « classé » dans le type 3 voire même type 4 (plus d'algues visibles mais uniquement amas organiques de type « vases noires »).

Une analyse brute des données compilée dans la première étude 2008-2010 conduisait à des résultats assez proches en surface moyenne concernée (190 ha). Il est probable cependant que les <u>surfaces soient sousestimées</u> sur cette première période 2008-2010 notamment du fait de la moindre couverture photographique probable des situations de putréfaction à l'époque (thématique moins prégnante historiquement). On note une relative stabilité de la répartition par type de dépôt entre les deux périodes, avec cependant une part amoindrie des dépôts de type 1 entre les deux périodes (en raison, probablement du ramassage accru par les municipalités depuis 2010 et peut être de biais lié à l'échelle de digitalisation plus « grossière » et donc plus « englobante » sur les années 2008-2010 que pour la présente étude), et une augmentation de la part relative des dépôts de type 4 (autres cas).



## 3.4 Résultats détaillés des mesures de concentration en hydrogène sulfuré effectuées

Les mesures de H<sub>2</sub>S réalisées pour chacune des trois conditions (air ambiant, semi-confinement sans brassage, semi-confinement avec brassage) sont détaillées pour chacun des 120 sites en annexe 4.

Pour synthétiser les mesures réalisées sur l'ensemble des sites, le *Tableau 1* présente les fourchettes de valeurs de concentration en H<sub>2</sub>S ayant pu être observées pour chaque type de dépôts, pour chacune des trois conditions du protocole spécifique adopté. Il convient ici de préciser que les concentrations de H<sub>2</sub>S ont été mesurées dans des conditions spécifiques (vent, température, durée d'émersion,...), en veillant à ne pas mettre en danger les opérateurs et à ne pas détériorer les capteurs. En cela, elles ne sont pas exhaustives, et ne couvrent pas le spectre de la totalité des situations et mesures pouvant être rencontrées et notamment pas les valeurs « les plus élevées » qu'il est possible de rencontrer (température élevée, soleil, absence de vent, émersion de plusieurs heures, ...).

Tableau 1 : Synthèse des mesures de concentration en H<sub>2</sub>S réalisées par type de dépôt putréfiant (en ppm)

Mesure [H <sub>2</sub> S] / Type de dépôt put.	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
Air ambiant	Valeur min. : 0 Valeur max. : 1.9 Nb mesures : 5	Valeur min. : 0 Valeur max. : 17 Nb mesures : 26	Valeur min. : 0 Valeur max. : 3 Nb mesures : 35	Valeur min. : 0 Valeur max. : 4.1 Nb mesures : 49
Semi-confinement, sans brassage	Valeur min. : 0 Valeur max. : 72.5 Nb mesures : 6	Valeur min. : 0  Valeur max. : 76.2  Nb mesures : 24	Valeur min. : 0  Valeur max. : 232.8  Nb mesures : 32	Valeur min. : 0  Valeur max. : 214  Nb mesures : 46
Semi-confinement, après brassage	Valeur min. : 0 Valeur max. : > 500 Nb mesures : 6	Valeur min. : 0  Valeur max. : > 500  Nb mesures : 24	Valeur min. : 0  Valeur max . : > 500  Nb mesures : 32	Valeur min. : 0  Valeur max. : 345.1  Nb mesures : 44

En général, les teneurs à « l'air ambiant », à hauteur d'homme, restent à des niveaux peu élevés et inférieurs à 5 ppm, quel que soit le type de dépôt putréfiant observé.

Mais en cas de « perturbation » des putréfactions et de conditions particulières (température plus élevée, absence de vent...), des teneurs peuvent être plus élevées et à l'origine d'intoxications aiguës. Le lien entre teneur de H<sub>2</sub>S (en ppm) et toxicité associée est présenté en annexe 2.

Dans quelques cas, les teneurs ont été relativement faibles malgré une perception de putréfaction, ce qui est souvent le cas de milieux saturés en eau dans lesquels le H<sub>2</sub>S pourrait être maintenu sous forme majoritairement soluble expliquant des teneurs dans l'air plus limitées, ce qui n'exclut pas des émanations plus importantes lorsque ces dépôts sont moins saturés (moment de la journée, du cycle de la marée vives eaux mortes eaux, en cas de brassage plus profond, ou autre paramètre). Ces zones semblent donc, malgré des niveaux probablement moins élevés, pertinentes à identifier comme « potentiellement dangereuses ».



## 4 Les différents types de cartes réalisées

La banque de données utilisée ainsi que la méthodologie employée pour la réalisation des différentes cartographies sont détaillées en annexe 6.

Différents types de cartographies et fiches ont été produites, chacune par série de 16 secteurs (3 jeux de cartes par secteur en annexe 3) :

- cartographies de synthèse des taux de couverture interannuels des dépôts d'algues vertes, établies à partir des survols aériens réalisés sur la période 2010-2018 (printemps, été), permettant de caractériser les secteurs les plus sujets à la présence d'algues vertes;
- cartographies de localisation des différents types de dépôts putréfiants observés sur la période 2016-2019 ;
- cartographies d'occurrence d'apparition des zones putréfiantes, réalisées à partir des survols effectués sur les périodes 2008-2010 et 2016-2019 (9 inventaires, réalisés en période estivale).

# 4.1 Taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (2010-2018)

Chacune des 16 cartes sectorielles générées dans le cadre de cette étude (annexe 3) représente le taux de couverture interannuel moyen, par maille de 75 x 75m, des échouages d'algues vertes sur le période 2010-2018 (Figure 5, ci-dessous sur le secteur 5 correspondant au nord Finistère). Comme présenté dans la partie méthodologie, la majeure partie des dépôts représentés sont des dépôts d'algues fraîches, repris à chaque marée et déposés sur la zone de balancement des marées. Ces cartes permettent de repérer les secteurs fréquemment concernés par les dépôts d'algues vertes, une partie de ces secteurs, notamment en haut d'estran, étant susceptible de présenter des putréfactions.

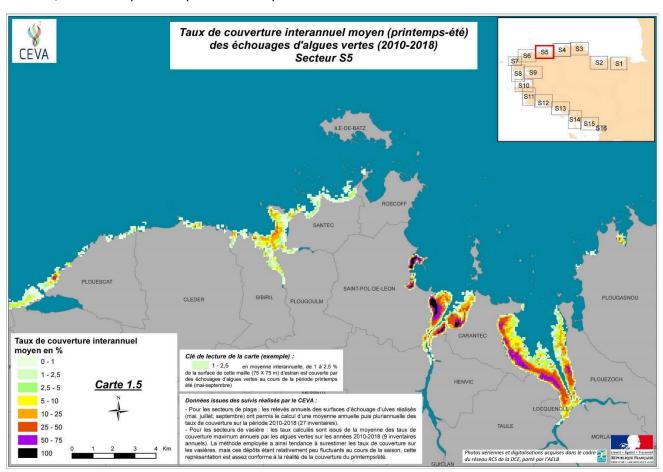


Figure 5 : Carte sectorielle illustrant un taux de couverture interannuel moyen des échouages d'algues vertes sur le secteur S5 (Finistère nord du Diben à Keremma) pour les années 2010 à 2018 (mai, juillet et septembre pour les sites de « plage » et maximum annuel pour les vasières).



# 4.2 Cartes de localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes (2016 à 2019)

Chaque putréfaction photo interprétée fait l'objet de digitalisation sous SIG avec description : de la date à laquelle elle est observée, la typologie (base typologie décrite en 2010), le site auquel il se réfère et le département. La Figure 6 présente un exemple de carte sectorielle (toutes les cartes sont en annexe 3) et la Figure 7, l'agrégation au niveau régional des observations locales.

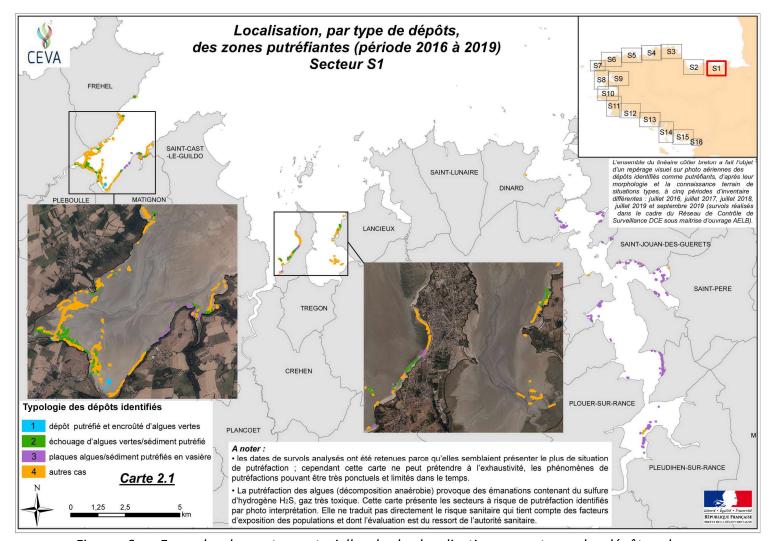


Figure 6 : Exemple de carte sectorielle de la localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes entre 2016 et 2019 : secteur S1 (Est des Côtes d'Armor et Rance).



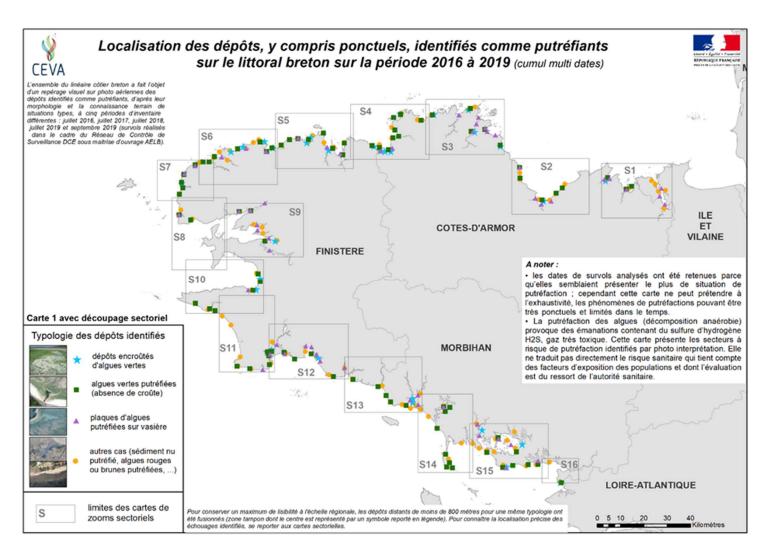


Figure 7 : Carte régionale de la localisation des zones putréfiantes sur le littoral breton entre 2016 et 2019 (cumul des sites de localisation). Les encarts S1 à S16 correspondent aux cartes sectorielles générées et disponibles en annexe 3.



# 4.3 Carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (période estivale) sur la période 2008-2019

La Figure 8 présente une des cartes sectorielles de l'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (nombre de fois où la zone de putréfaction est observée dans la maille sur les 9 inventaires), et la Figure 9 un zoom de détail de la partie centrale de cette carte. L'annexe 3 propose les 16 cartes sectorielles de la situation des putréfactions relevées sur 2008-2010 et 2016-2019.

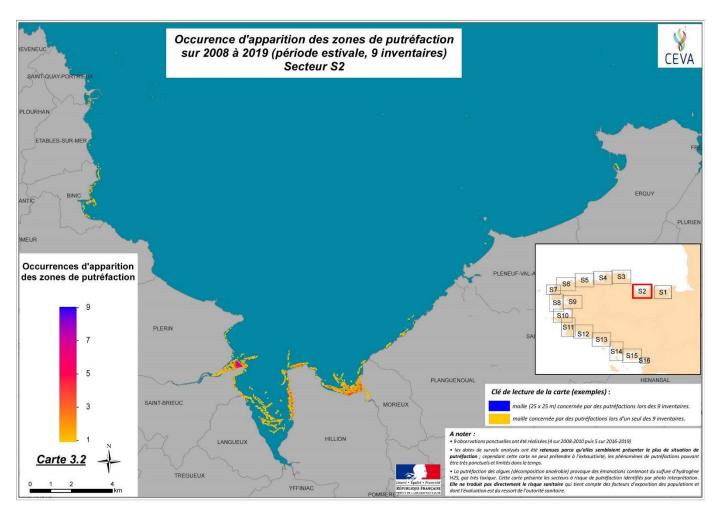


Figure 8 : Exemple de carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction établie à partir de données d'inventaires de la période 2008 à 2019 : secteur S2 du centre des côtes d'Armor (Erquy à Saint Quay Portrieux).



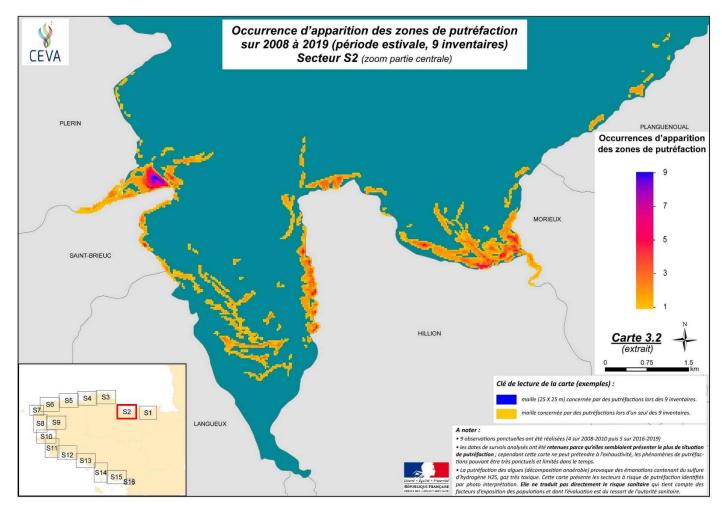


Figure 9 : Exemple de carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction établie à partir de données d'inventaires de la période 2008 à 2019 : détail du secteur S2 (fond de baie de Saint Brieuc).



#### 5 Suites à donner

La présente étude permet de mettre à jour et de compléter les observations de l'étude de 2010 (années 2008-2010). Les relevés de terrain ont été standardisés (dispositif de semi-confinement pour atténuer l'impact du vent, hauteur de mesure constante) et ont permis de conforter les photo-interprétations des figures de putréfaction suite aux campagnes aériennes de juillet à octobre 2019. Ces relevés permettent aussi la constitution d'une base de données des cas-types rencontrés. Ces informations permettront de sensibiliser les acteurs locaux à ces situations potentiellement dangereuses en offrant des illustrations de figures de putréfaction et teneurs en H<sub>2</sub>S associées.

L'essentiel de l'étude a consisté en l'analyse des situations de putréfactions de 5 campagnes aériennes de 2016 à 2019. Tous les dépôts en putréfaction y ont été tracés et la base de données qui en est issue a ensuite été utilisée pour réaliser la cartographie de ces situations sur le littoral breton. Le croisement de la base réalisée lors de l'étude 2010 avec la base de la présente étude propose une perception sur 9 inventaires de l'occurrence des situations de putréfaction. Ces cartes, sans pouvoir prétendre à l'exhaustivité, permettent de sensibiliser les acteurs locaux (collectivités, usagers, riverains, services de l'Etat, ...) à ces secteurs potentiellement dangereux en raison de l'occurrence de présence de dépôts putréfiants.

Enfin, pour prolonger cette étude et en affiner les résultats, il est envisagé, sur les prochaines années, de réaliser quelques compléments de mesures de terrain et d'analyser, pour chaque année, les secteurs concernés par des figures de putréfaction sur une date d'inventaire annuelle. Cela permettra d'avoir en 2022 une perception plus exhaustive de la situation des putréfactions sur le littoral breton.



#### Glossaire - Définitions

Algues vertes<sup>3</sup>: Les algues vertes font partie de l'écosystème marin breton. Elles sont communément appelées «laitues de mer » pour leur aspect de grosse salade et parce qu'elles sont comestibles. Mesurant habituellement quelques centimètres, elles peuvent atteindre un mètre dans des milieux peu agités, comme les vasières ou les zones infralittorales, dans lesquels elles sont moins fragmentées. Durant le printemps, les algues vertes tirent avantage de leur thalle en forme de feuille ou de tube, qui leur facilitent les échanges avec le milieu ambiant (captation de l'énergie lumineuse et absorption de sels nutritifs, avec un métabolisme plus élevé que les algues brunes et rouges et donc une croissance plus rapide). Les algues vertes sont sujettes à la fragmentation et à la dispersion dès qu'elles ne sont plus fixées au fond. Tant qu'elles sont bien vivantes, les algues vertes ne sont pas toxiques ni pour l'homme, ni pour la faune. [Le terme « algues vertes » est un terme générique utilisé pour désigner les chlorophycées du genre Ulva (en lame) et Enteromorpha (en lanières ou filaments), aujourd'hui rassemblées dans l'unique genre Ulva]

Algues brunes : Ces algues représentent une partie importante des algues dites « d'habitat » sur les côtes bretonnes (« goémons ») et peuvent s'arracher des rochers au gré des tempêtes. Dans certaines baies, des algues brunes filamenteuses prolifèrent « à la place » des ulves qui s'y développaient quelques années auparavant dans un contexte de niveau trophique plus élevé. [Les algues brunes sont des phéophycées dont la couleur brune est liée à la présence d'un pigment photosynthétique particulier, la fucoxanthine ; les algues filamenteuses présentes certaines années sont par exemple des ectocarpales Pylaeilla littoralis en baie de la Fresnaye et de Saint-Brieuc, Ectocarpus sp. en baie de Douarnenez.]

Algues rouges: Ce sont des algues qui ont une couleur rouge liée à la présence de caroténoïdes et d'un pigment photosynthétique spécifique. [Les algues rouges sont des rhodophycées, de couleur rouge du fait d'un pigment photosynthétique spécifique, la phycobiliprotéine. Les dépôts d'algues rouges sur plage sont plus particulièrement liés à la présence de l'algue Solieria chordalis.]

Anaérobie: Caractérise un milieu privé d'oxygène et peut désigner des organismes qui vivent sans oxygène.

Anoxie⁴: Défaut d'oxygénation d'une cellule, d'un tissu ou, en écologie, d'un milieu. Les risques d'anoxie sont notamment attachés aux proliférations algales massives, susceptibles de consommer l'ensemble de l'oxygène disponible dans le milieu et de nuire aux autres espèces présentes.

**CEVA**: Centre d'Etude et de Valorisation des Algues.

**Dépôt putréfiant**: Dépôt de matières organiques d'origine végétale (algues vertes, algues rouges, algues brunes goémon, etc.) et de taille diverse en état de putréfaction (processus de décomposition sous l'action de ferments microbiens en milieu anaérobie) avec production de gaz toxique (dont du H<sub>2</sub>S). La pré-existence de soufre dans le milieu est favorable à la production d'H<sub>2</sub>S: la production en H<sub>2</sub>S est accrue sur les estrans (abondance de soufre dans le milieu marin) par rapport aux milieux terrestres, plus pauvres en soufre et moins hydratés.

**Estran** : Zone de balancement des marées (partie du littoral située entre les limites extrêmes des plus hautes et des plus basses marées).

**Eutrophisatio**n<sup>1</sup> : Phénomène d'enrichissement des milieux aquatiques en éléments nutritifs, notamment en azote et/ou phosphore, provoquant un développement accéléré d'algues et/ou de végétaux d'espèces

- 3 Éléments de définition provenant de : Ménesguen A., 2018. Les marées vertes, 40 clés pour comprendre. Editions Quae.
- 4 Élément de définition provenant de : Levain A., 2014. Vivre avec l'algue verte : Médiations, épreuves et signes. MNHN, Paris.



supérieures perturbant l'équilibre des organismes présents dans l'eau et dégradant sa qualité.

H₂S: Le « sulfure d'hydrogène », « sulfure de dihydrogène » ou « hydrogène sulfuré », est un gaz incolore et toxique, dégageant une forte odeur généralement décrite comme celle de l'œuf pourri. Ce gaz se dégage des algues en décomposition, processus qui s'engage lorsque les algues restent entassées quelques jours, soit exondées en dépôts épais sur les hauts d'estran, soit ensevelies par les apports de sédiments dans les vasières d'estuaires. L'exposition à des fortes doses d'hydrogène sulfuré peut susciter des intoxications aiguës présentant des risques létaux (œdème pulmonaire) ou à des lésions oculaires et respiratoires.

Ineris: Institut national de l'environnement industriel et des risques

Marée verte : Le terme de « marée verte » est usuellement le nom donné en France à une accumulation d'algues vertes, apportées par la mer montante, suivie de leur échouement sur l'estran, en référence aux « marées noires ». La définition de ce terme usuel n'est cependant pas totalement consolidée, la notion de « marée verte » revêtant d'autres composantes, notamment sociologiques, dont le contour reste à définir.

**ppm ou ppmv** : Partie par million (ou partie par million volume). Unité de mesure de la concentration en H<sub>2</sub>S (voir l'annexe 2 établissant le lien entre teneur et danger).

**Risque**: Croisement d'un aléa ou niveau de dangerosité (ici: la présence ou non de dépôts putréfiants) avec un enjeu (par exemple: exposition ou non d'êtres humains, d'animaux, et fréquentation associée).

**Ulves**: Espèces d'algues du genre *Ulva*. Elles sont inféodées aux étages les plus hauts des écosystèmes marins et affectionnent les milieux riches en azote. Aussi sont elles fréquemment représentées dans les zones estuariennes. Plusieurs espèces d'ulves sont présentes en Bretagne. Certaines d'entre elles parviennent à se reproduire par bouturage et à vivre en eaux libres, sans substrat. Cet ensemble de caractéristiques est à l'origine de leur tendance à la prolifération dans les eaux côtières<sup>5</sup>.

Vasière : Étendue côtière couverte de matériaux sédimentés fins non sableux.

<sup>5</sup> Élément de définition provenant de : Levain A., 2014. Vivre avec l'algue verte : Médiations, épreuves et signes. MNHN, Paris.



## **ANNEXES**

## Annexe 1:

Liste des figures et tableaux

## Annexe 2:

Tableau des effets sanitaires chez l'Homme pour des expositions aiguës à l'H2S en fonction de la concentration du gaz et de la durée d'exposition (quelques minutes à plusieurs heures)

## Annexe 3:

Cartes détaillant par secteur :

- le taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (2010-2018)
  - la localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes (période 2016 à 2019)
- l'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (période estivale) sur la période 2008 à 2019 (9 inventaires)

#### Annexe 4:

Fiches des relevés réalisés sur les dépôts en putréfaction (22 fiches en pleine page et « prévisualisation » de l'intégralité des relevés 2019)

### Annexe 5:

Test méthodologique de détection automatique des dépôts putréfiant par traitement d'images

### Annexe 6:

Banques de données exploitées et méthodes déployées pour la cartographie

## Annexe 1:

Liste des figures et tableaux

## Liste des figures

Figure 1 : Illustration des trois mesures réalisées (air ambiant, semi-confinement avant et après brassage) 13
Figure 2 : Localisation des 120 observations de terrain réalisées sur les zones putréfiantes sur le littoral breton en
2019
Figure 3 : Illustration de quatre types de dépôts putréfiants reportés sur le littoral breton lors des prospections de
la fin d'été 2019 et printemps 2020 :
Figure 4: Répartition des dépôts putréfiants par type sur les périodes 2008-2010 et 2016-201924
Figure 5 : Carte sectorielle illustrant un taux de couverture interannuel moyen des échouages d'algues vertes sur
le secteur S5 (Finistère nord du Diben à Keremma) pour les années 2010 à 2018 (mai, juillet et septembre pour les
sites de « plage » et maximum annuel pour les vasières)
Figure 6 : exemple de carte sectorielle de la localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes entre 2016 et
2019 : secteur S1 (Est des Côtes d'Armor et Rance)
Figure 7 : Carte régionale de la localisation des zones putréfiantes sur le littoral breton entre 2016 et 2019 (cumul
des sites de localisation). Les encarts S1 à S16 correspondent aux cartes sectorielles générées et disponibles en annexe 3
Figure 8 : Exemple de carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction établie à partir de données
d'inventaires de la période 2008 à 2019 : secteur S2 du centre des côtes d'Armor (Erquy à Saint Quay Portrieux).
Figure 9 : Exemple de carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction établie à partir de données
d'inventaires de la période 2008 à 2019 : détail du secteur S2 (fond de baie de Saint Brieuc)

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des mesures de concentration en H<sub>2</sub>S réalisées par type de dépôt putréfiant (en ppm) ...... 26

## Annexe 2:

Tableau des effets sanitaires chez l'Homme pour des expositions aiguës à l'H2S en fonction de la concentration du gaz et de la durée d'exposition (quelques minutes à plusieurs heures)

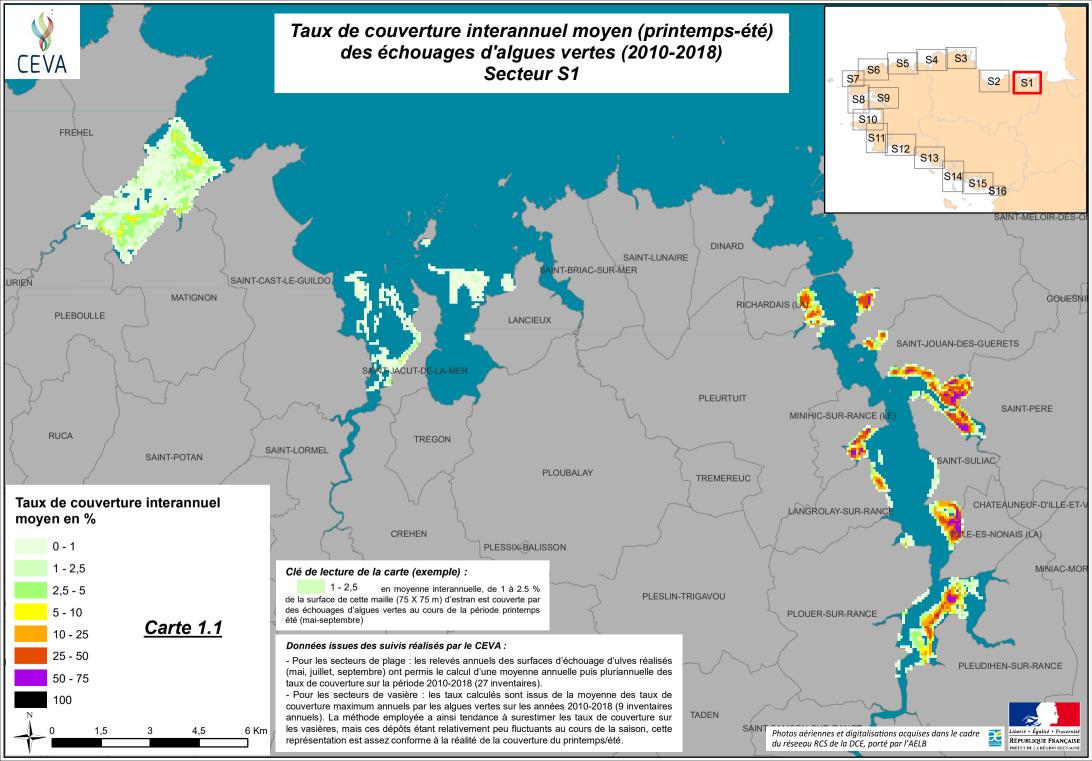
CONCENTRATION D'EXPOSITION	DUREE D'EXPOSITION	EFFETS OBSERVES
0,7 à 14 mg.m <sup>-3</sup> (0,5 à 10 ppm)	quelques minutes à plusieurs heures	augmentation de la consommation en oxygène, augmentation du taux de lactate dans le sang, variations transitoires d'activités enzymatiques sanguines et musculaires, céphalées
70 à 280 mg.m <sup>-3</sup> (50 à 200 ppm) (concentrations modérées)	expositions courtes (<1h)	irritation des muqueuses oculaires et respiratoires : photophobie, conjonctivite, rhinite, enrouement, toux, douleur thoracique
	expositions prolongées (plusieurs heures)	possible lésion cornéenne (kératite) et risque d'altération durable de la vision
dès 280 mg.m <sup>-3</sup> (200 ppm)	> 10 minutes	symptômes neurologiques : céphalées, vertiges, nystagmus, désorientation, troubles de la coordination, nausées, vomissements, asthénie intense
dès 350 mg.m <sup>-3</sup> (250 ppm)		œdème pulmonaire lésionnel de survenue retardée (dans 4 à 16 % des cas)
dès 700 mg.m <sup>-3</sup> (500 ppm)	plusieurs minutes d'exposition	<ul> <li>signes neurologiques constants avec possibilité de coma</li> <li>troubles cardiovasculaires : hypotension, tachycardie, troubles du rythme cardiaque, ischémie du myocarde</li> </ul>
dès 1 400 mg.m <sup>-3</sup> (1000 ppm)	quelques secondes	formes suraiguës avec perte de connaissance immédiate, brutale : « coup de plomb des vidangeurs » ou « knock-down » avec arrêt cardiaque ; des séquelles sont possibles

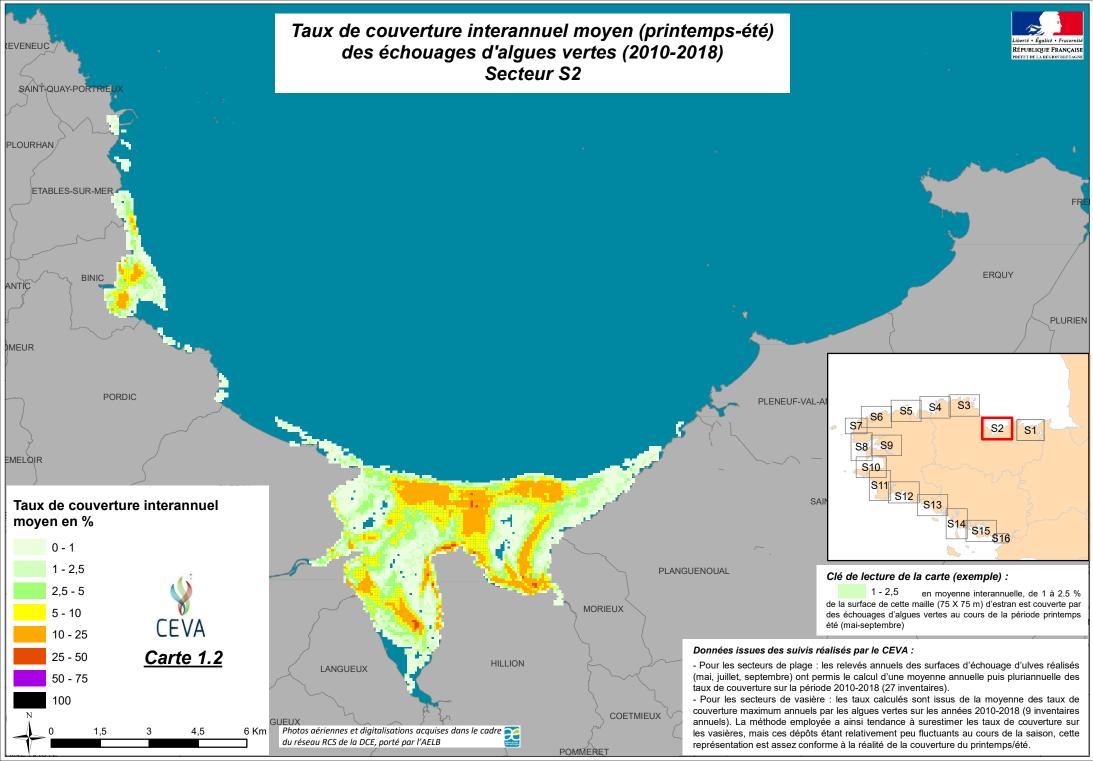
Tableau extrait du rapport d'expertise de l'ANSES de décembre 2016 (saisine 2015-SA-0225) dont les éléments présentés sont issus du profil toxicologique rédigé par l'ATSDR (ATSDR 2014) et du rapport d'expertise collective de l'Anses sur les « algues vertes » (Anses 2011)

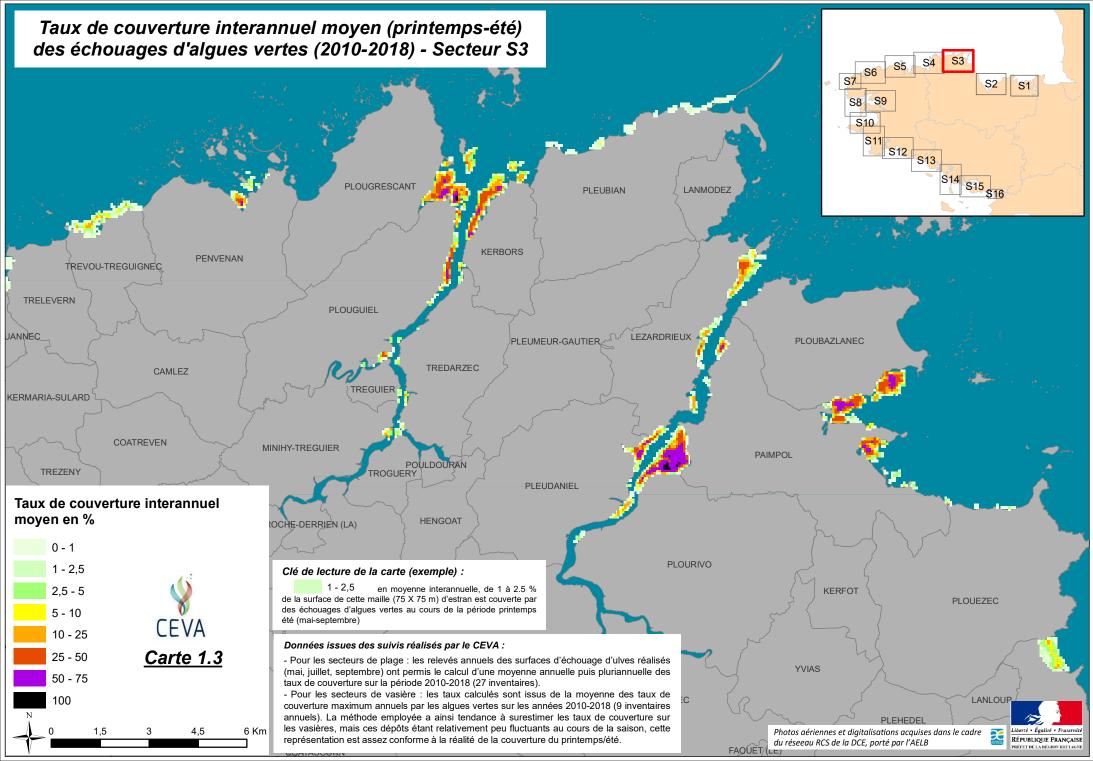
## Annexe 3:

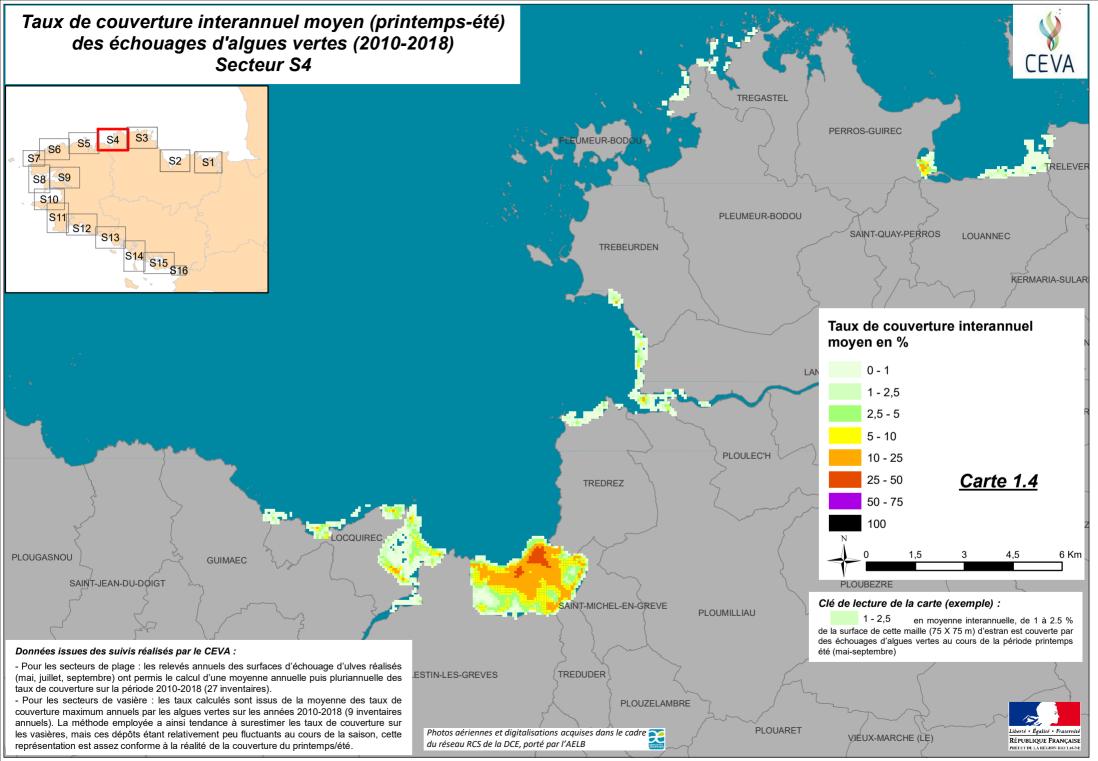
## Cartes détaillant par secteur :

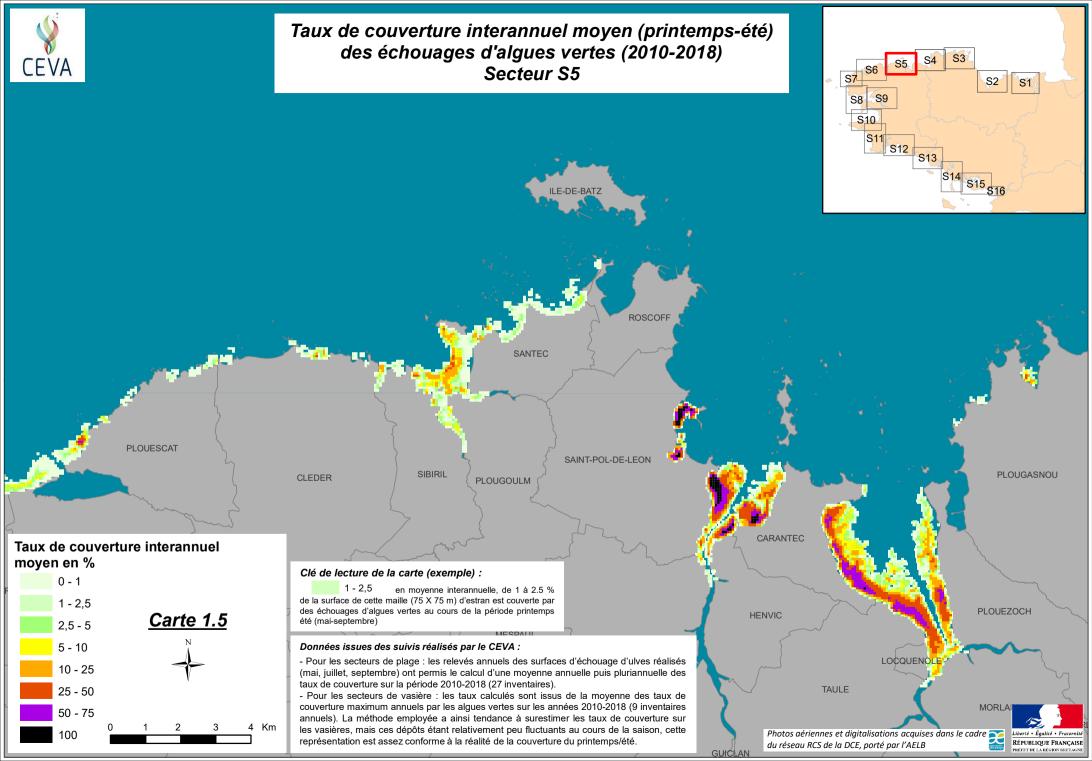
- le taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (2010-2018)
  - la localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes (période 2016 à 2019)
- l'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (période estivale) sur la période 2008 à 2019 (9 inventaires)

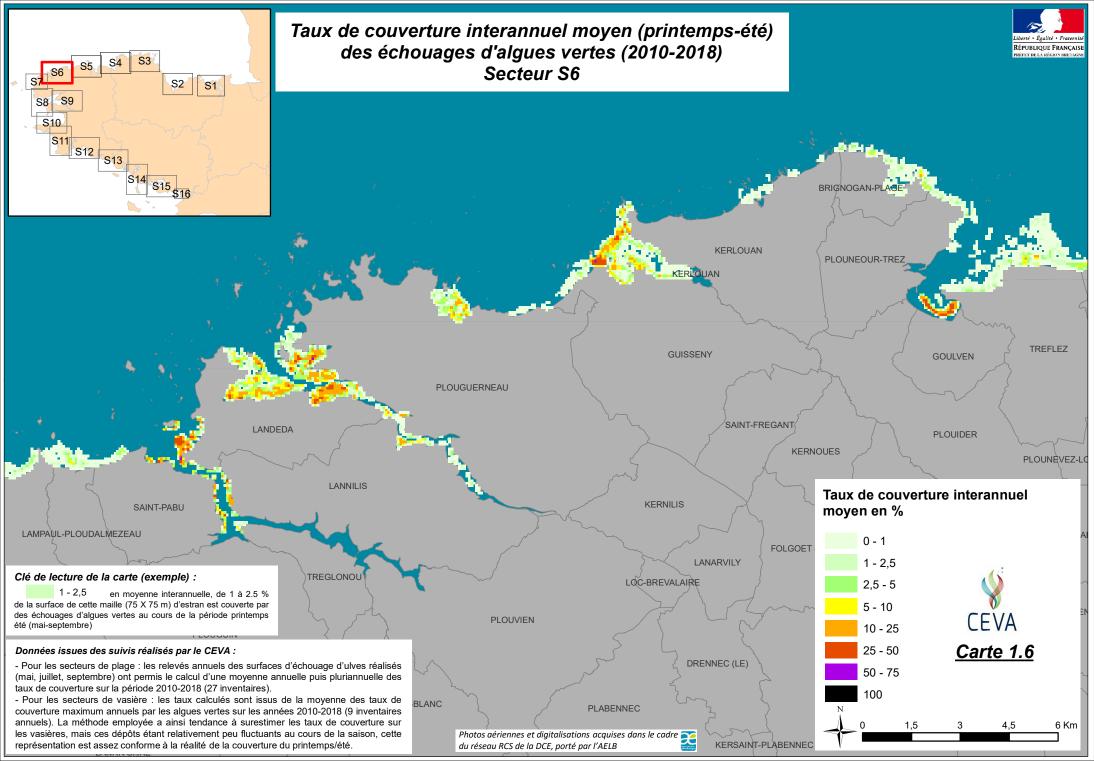




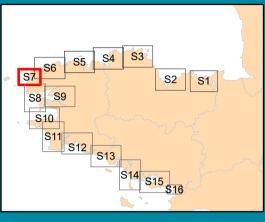








# Taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (2010-2018) Secteur S7

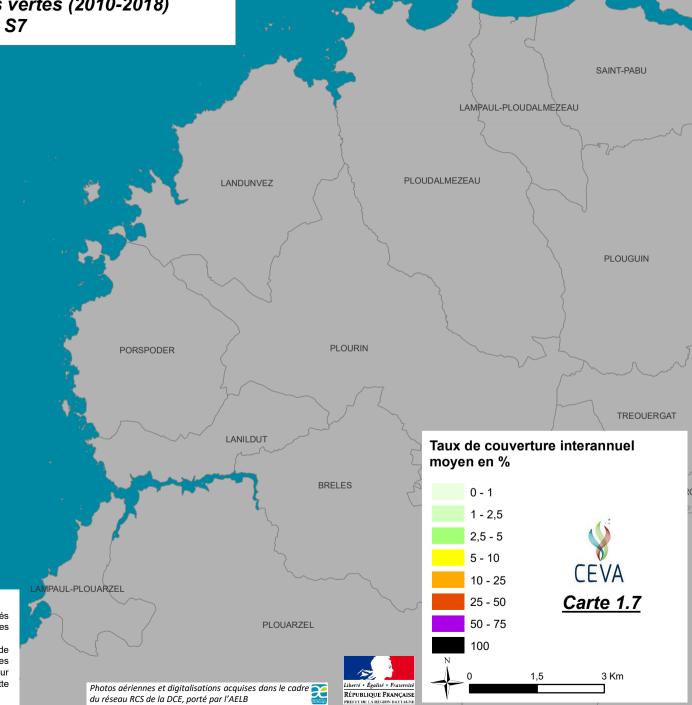


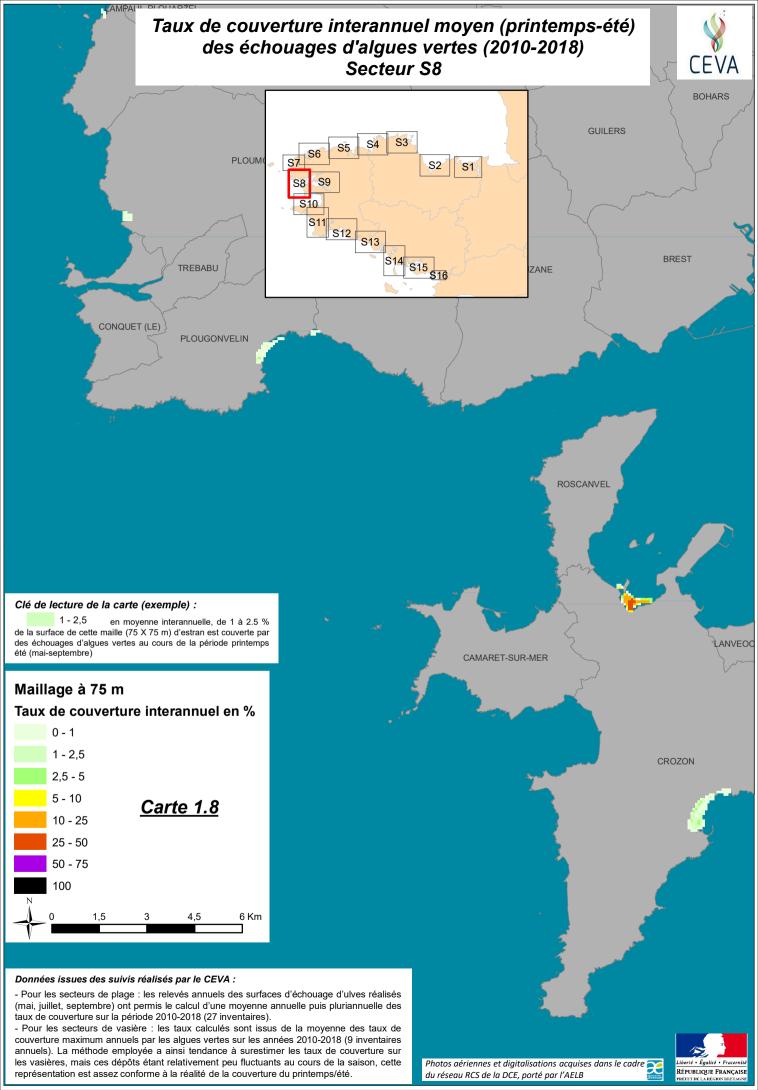
## Clé de lecture de la carte (exemple) :

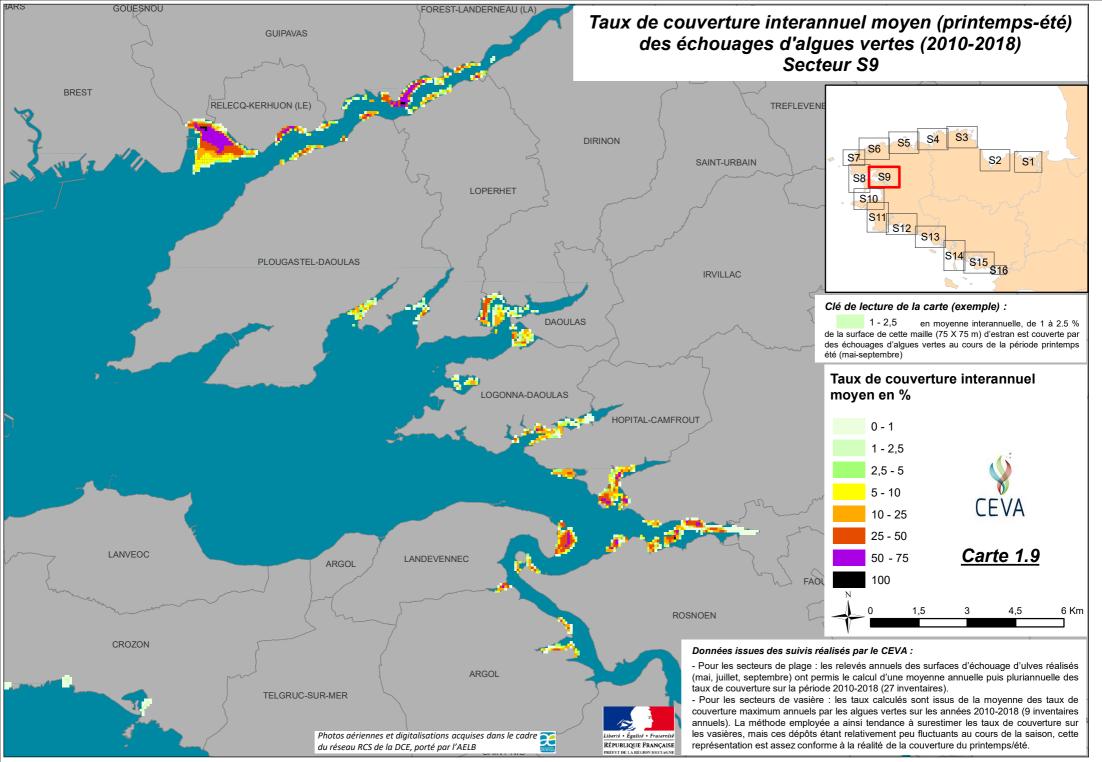
1 - 2,5 en moyenne interannuelle, de 1 à 2.5 % de la surface de cette maille (75 X 75 m) d'estran est couverte par des échouages d'algues vertes au cours de la période printemps été (mai-septembre)

#### Données issues des suivis réalisés par le CEVA :

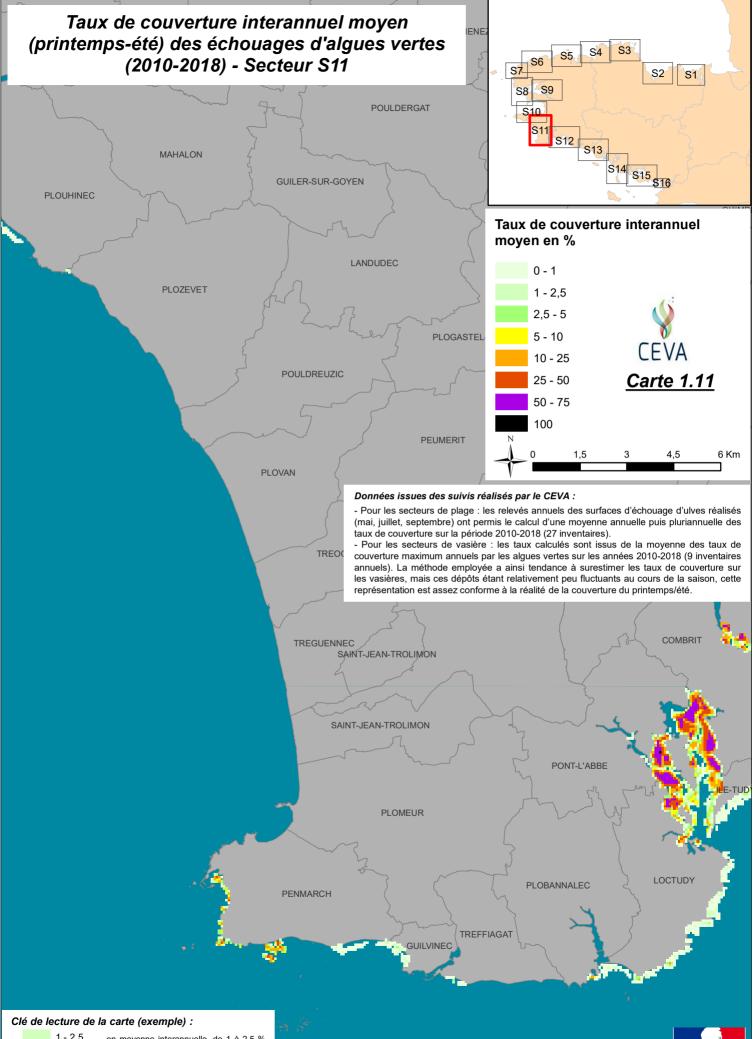
- Pour les secteurs de plage : les relevés annuels des surfaces d'échouage d'ulves réalisés (mai, juillet, septembre) ont permis le calcul d'une moyenne annuelle puis pluriannuelle des taux de couverture sur la période 2010-2018 (27 inventaires).
- Pour les secteurs de vasière : les taux calculés sont issus de la moyenne des taux de couverture maximum annuels par les algues vertes sur les années 2010-2018 (9 inventaires annuels). La méthode employée a ainsi tendance à surestimer les taux de couverture sur les vasières, mais ces dépôts étant relativement peu fluctuants au cours de la saison, cette représentation est assez conforme à la réalité de la couverture du printemps/été.





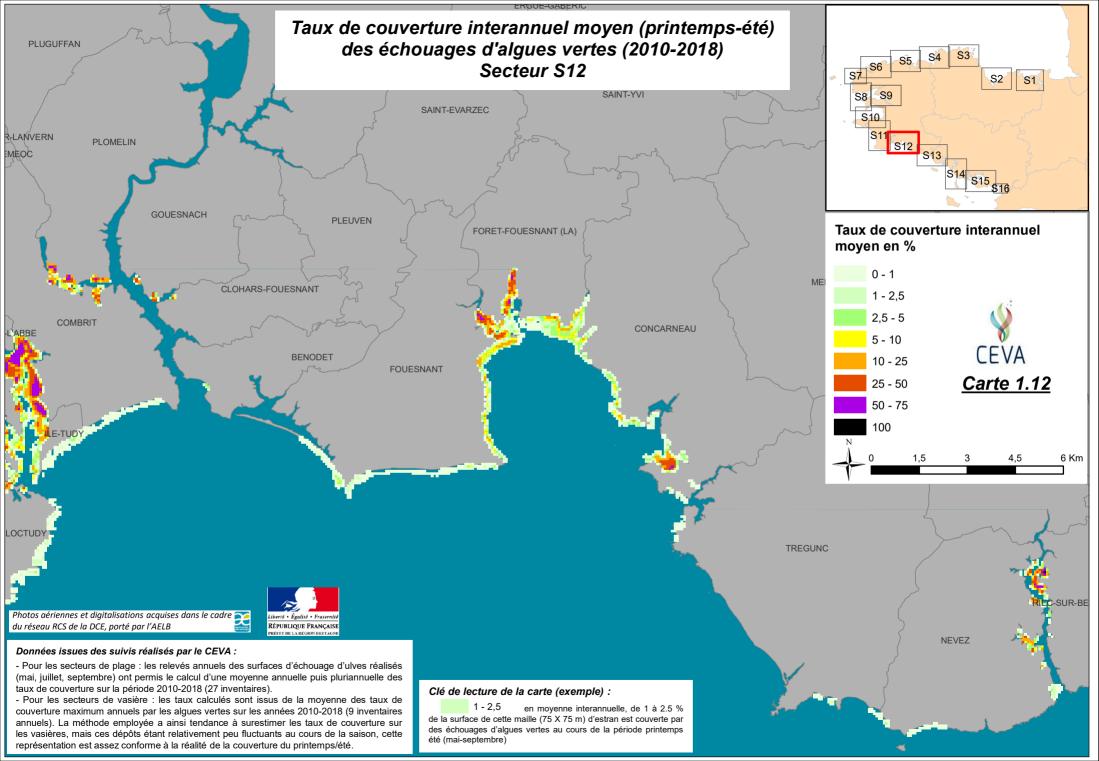


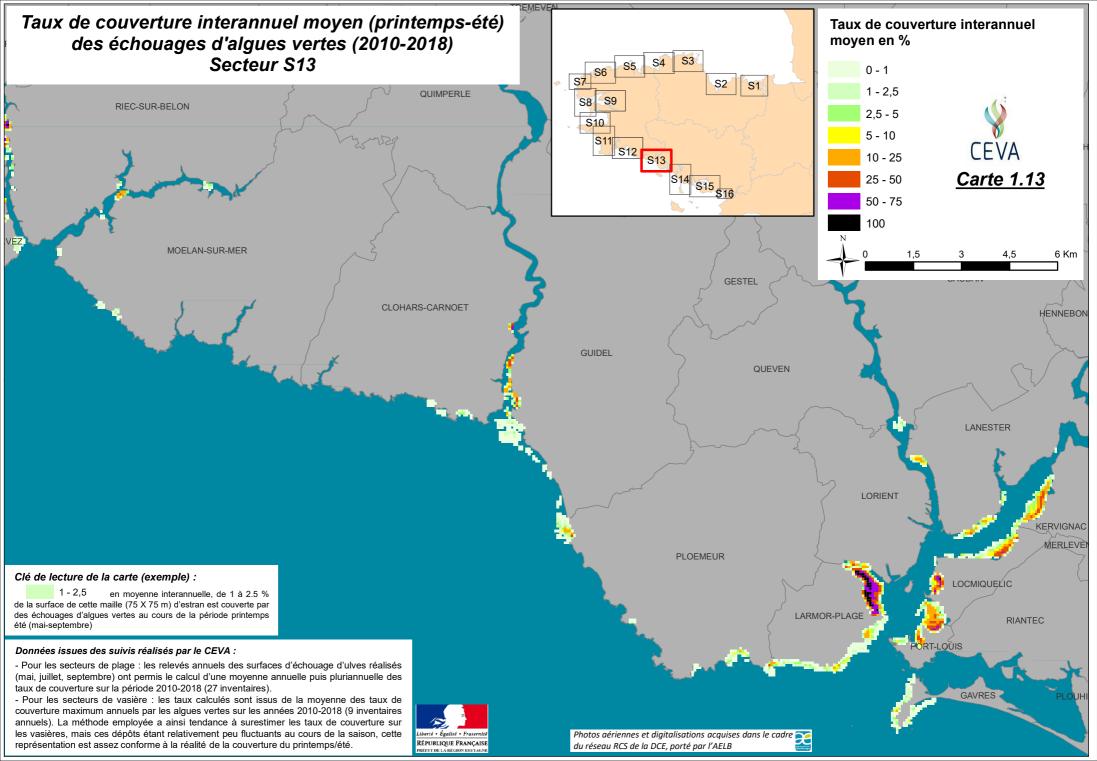
## TELGRUC-SUR-MER Taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (2010-2018) SAINT-NIC Secteur S10 **PLOMODIERN** Clé de lecture de la carte (exemple) : en moyenne interannuelle, de 1 à 2.5 % de la surface de cette maille (75 X 75 m) d'estran est couverte par des échouages d'algues vertes au cours de la période printemps été (mai-septembre) Données issues des suivis réalisés par le CEVA : PLOEVEN - Pour les secteurs de plage : les relevés annuels des surfaces d'échouage d'ulves réalisés (mai, juillet, septembre) ont permis le calcul d'une moyenne annuelle puis pluriannuelle des taux de couverture sur la période 2010-2018 (27 inventaires). - Pour les secteurs de vasière : les taux calculés sont issus de la moyenne des taux de couverture maximum annuels par les algues vertes sur les années 2010-2018 (9 inventaires annuels). La méthode employée a ainsi tendance à surestimer les taux de couverture sur les vasières, mais ces dépôts étant relativement peu fluctuants au cours de la saison, cette représentation est assez conforme à la réalité de la couverture du printemps/été. PLONEVEZ-PORZA KERLAZ BEUZEC-CAP-SIZUN POULLAN-SUR-MER Taux de couverture interannuel **GOULIEN** moyen en % CLEDEN-CAP-SIZUN 1 - 2.5PONT-CROIX **PLOGOFF** 2.5 - 55 - 10PRIMELIN **ESQUIBIEN** 10 - 25 AUDIERNE **S8 Carte 1.10** 25 - 5050 - 75 **PLOUHINEC** RÉPUBLIQUE FRANÇAISE 6 Km Photos aériennes et digitalisations acquises dans le cadre du réseau RCS de la DCE, porté par l'AELB

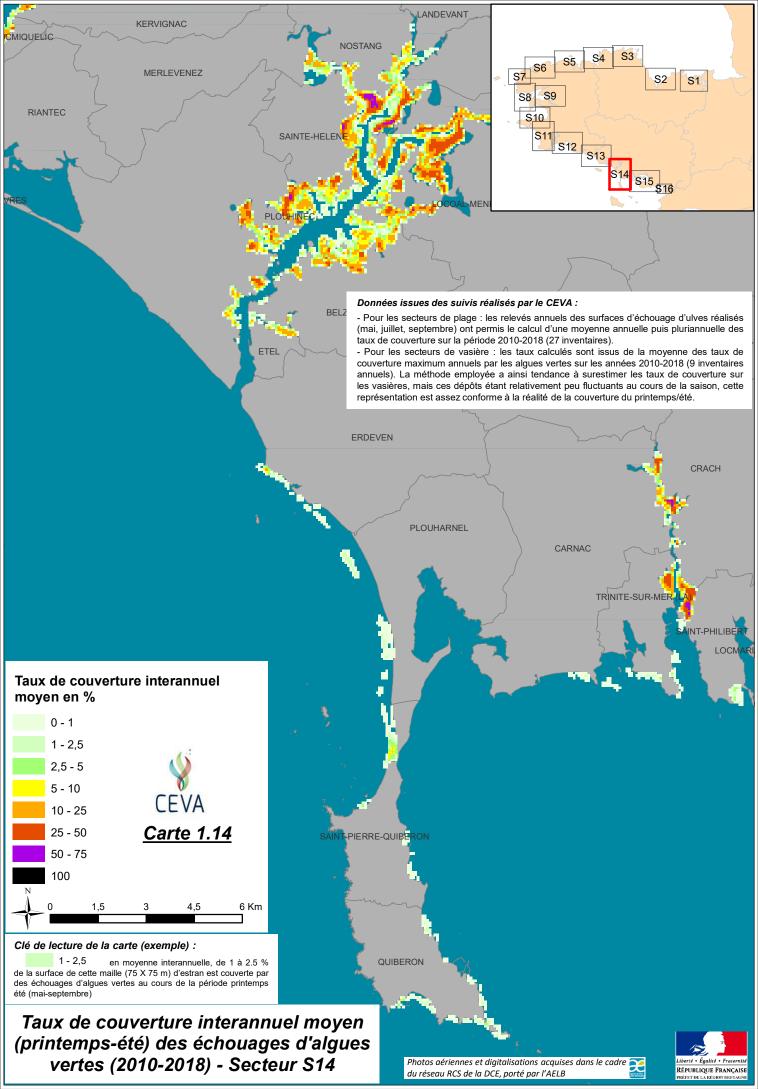


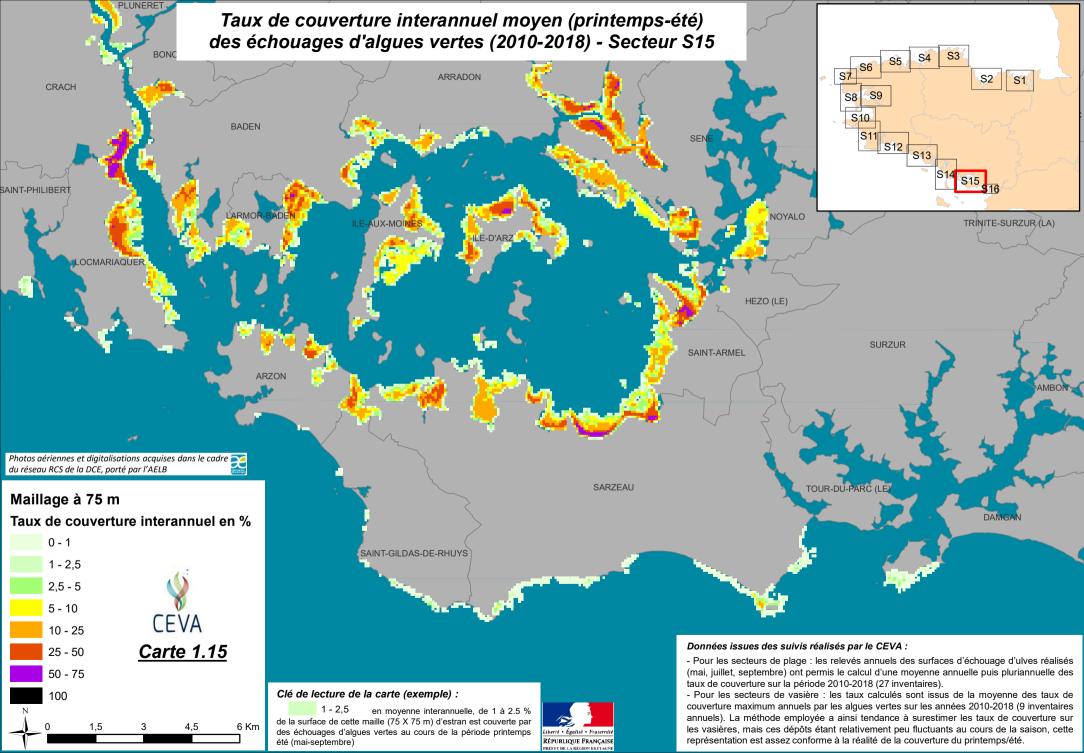
1 - 2,5 en moyenne interannuelle, de 1 à 2.5 % de la surface de cette maille (75 X 75 m) d'estran est couverte par des échouages d'algues vertes au cours de la période printemps été (mai-septembre)

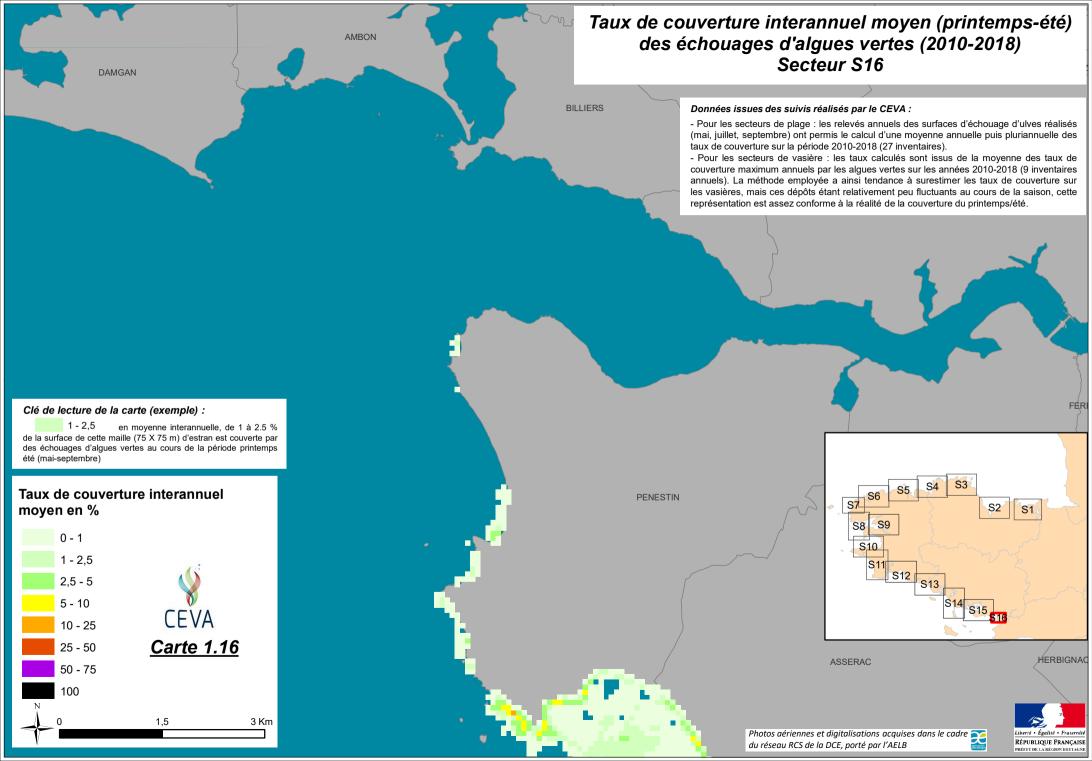


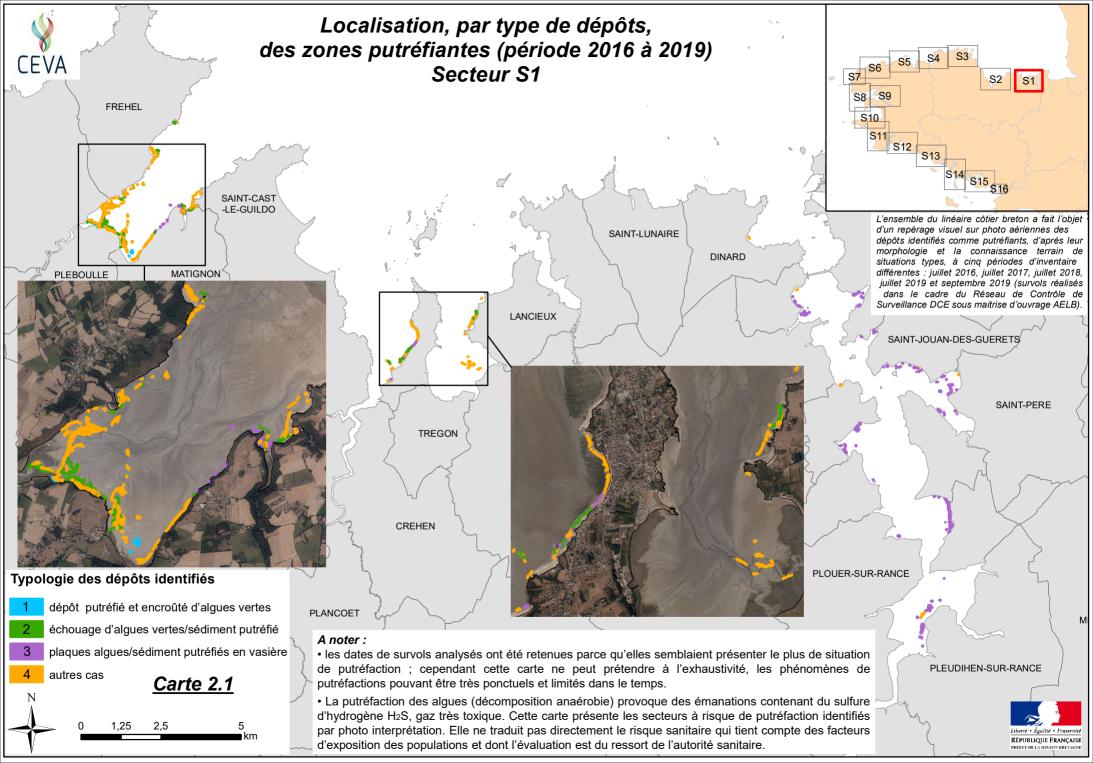


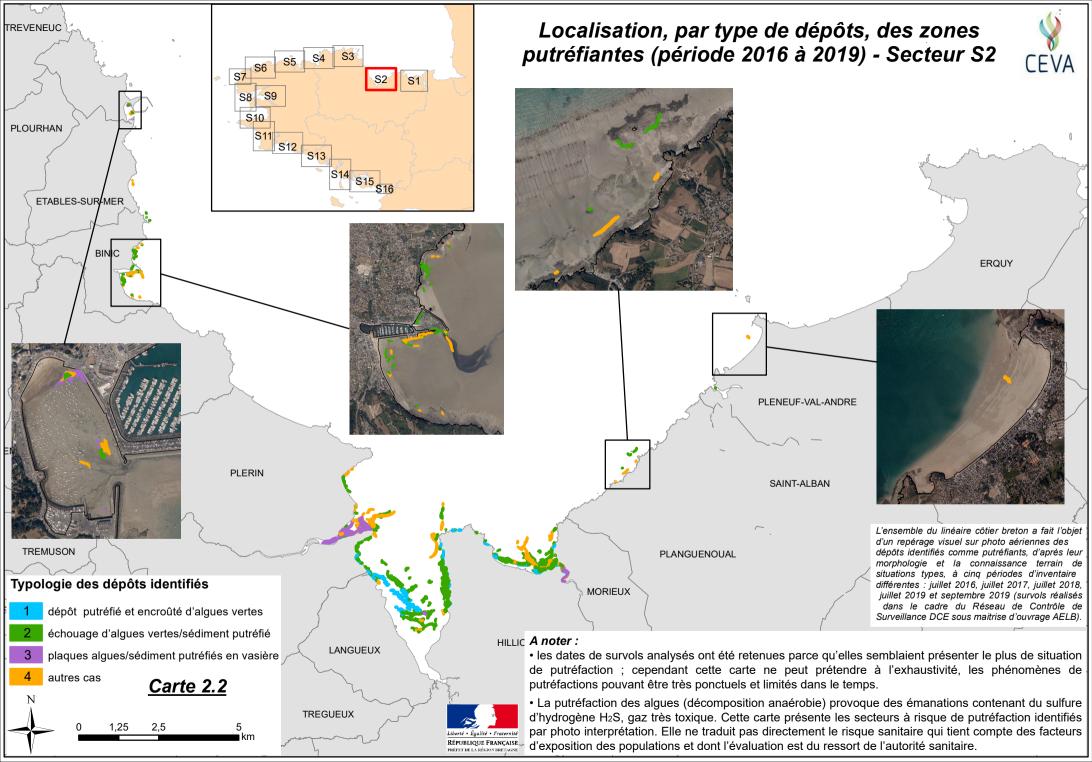


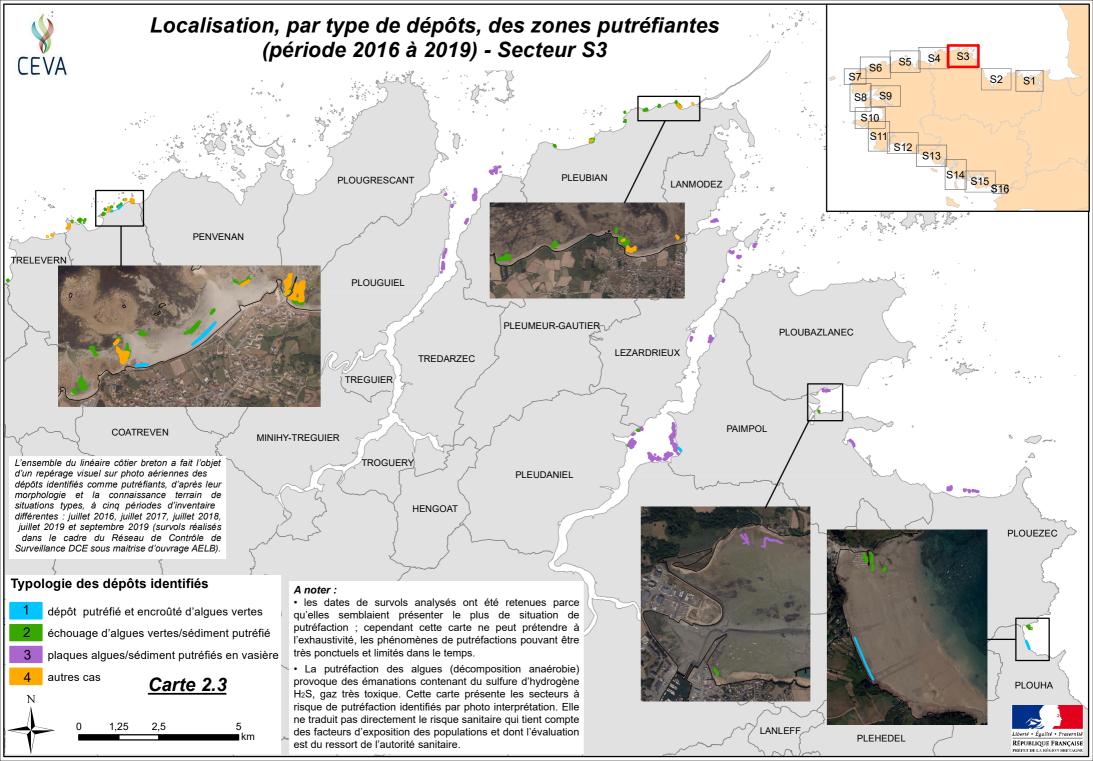


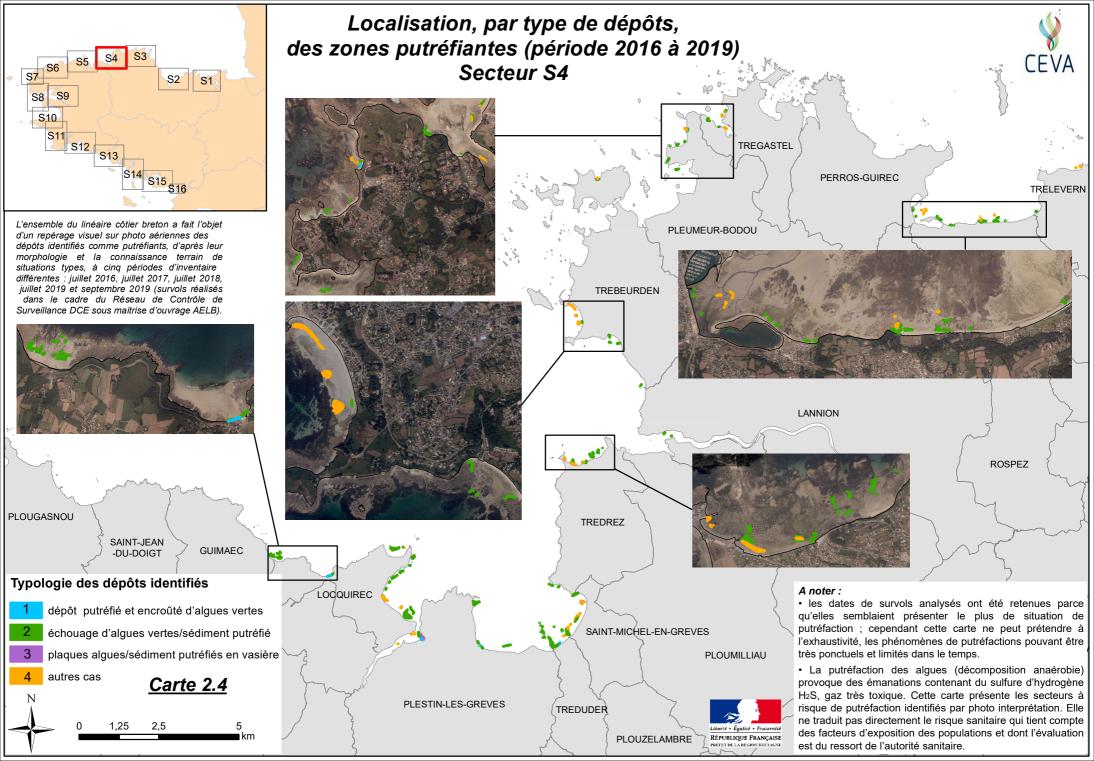


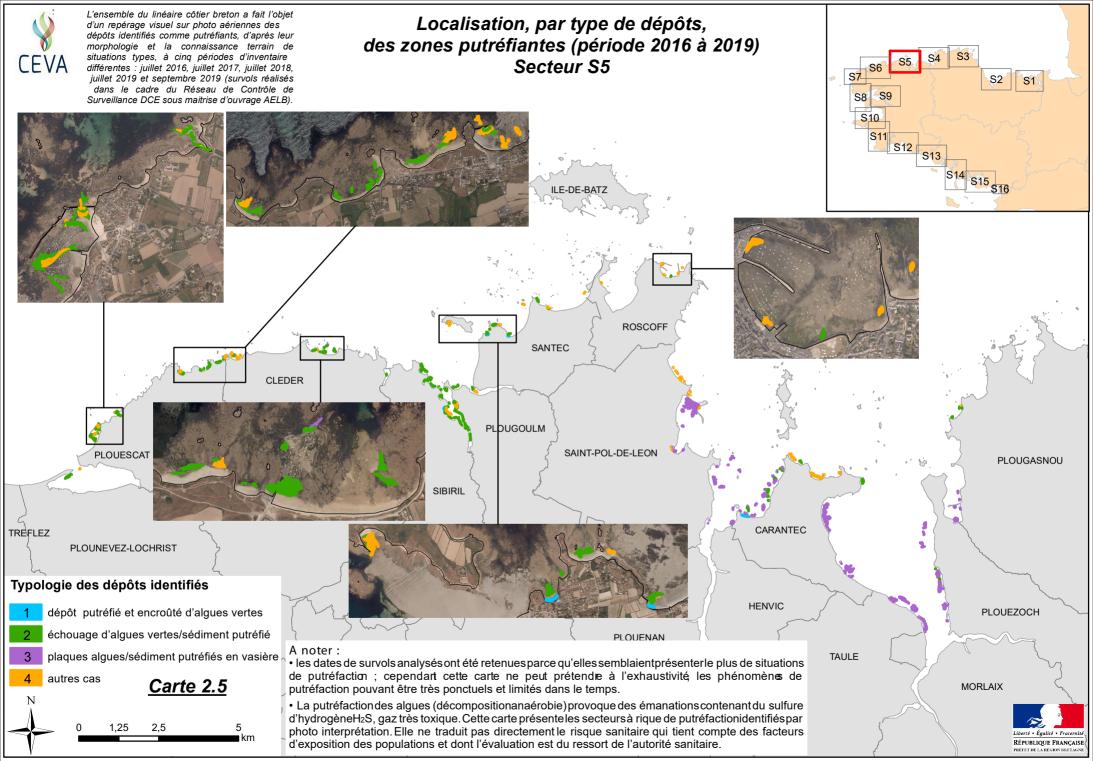


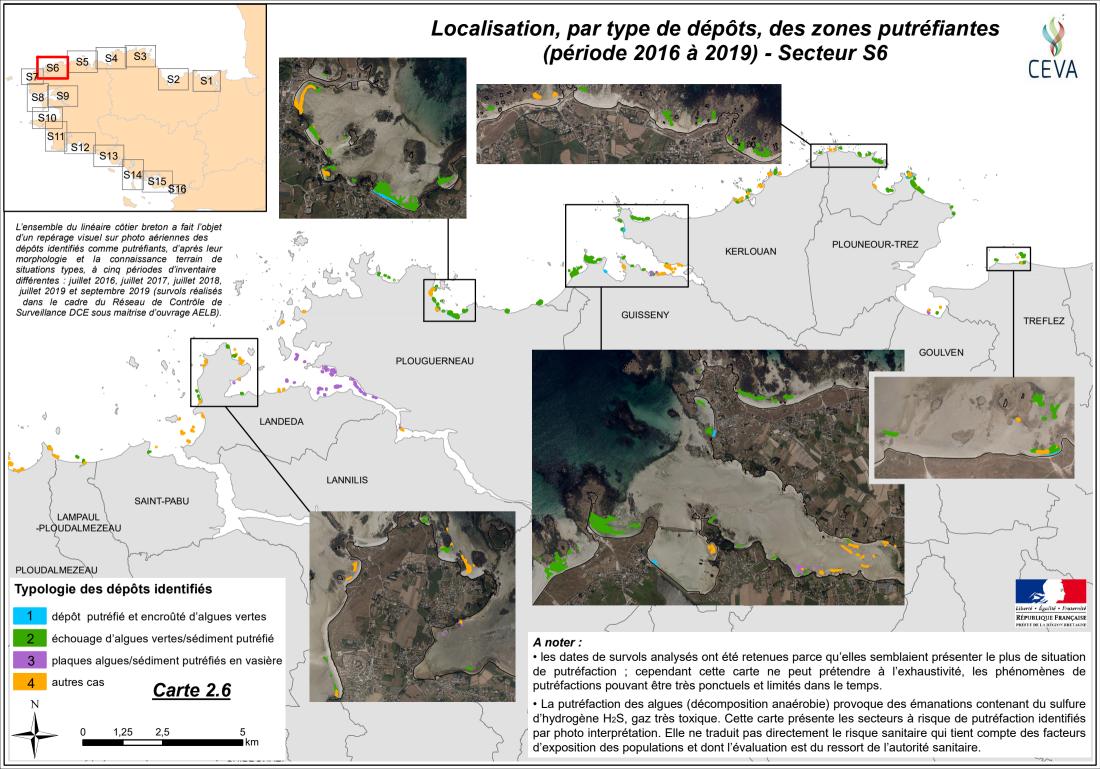


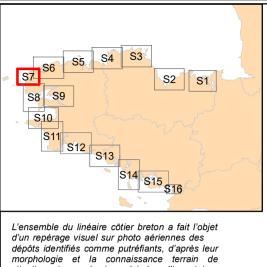






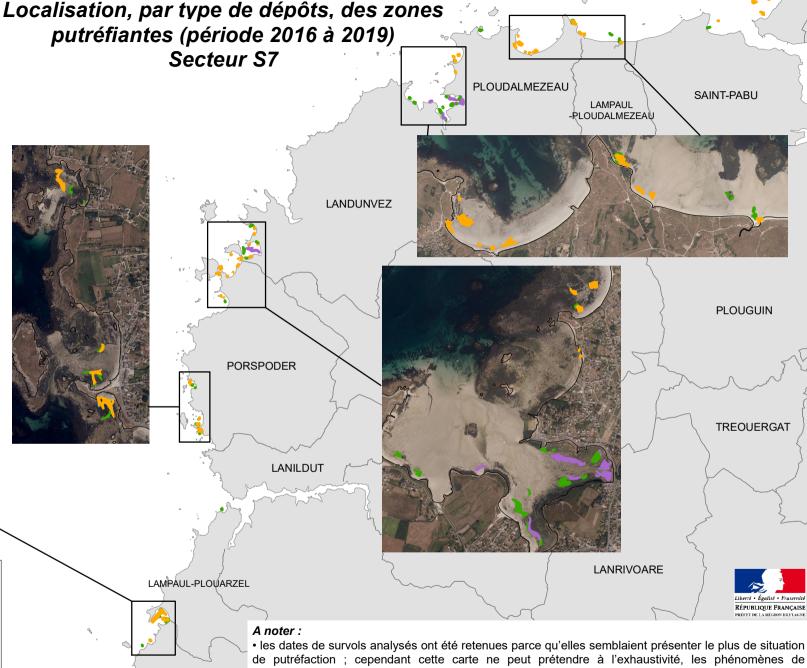






situations types, à cinq périodes d'inventaire différentes : juillet 2016, juillet 2017, juillet 2018, juillet 2019 et septembre 2019 (survols réalisés dans le cadre du Réseau de Contrôle de Surveillance DCE sous maitrise d'ouvrage AELB).

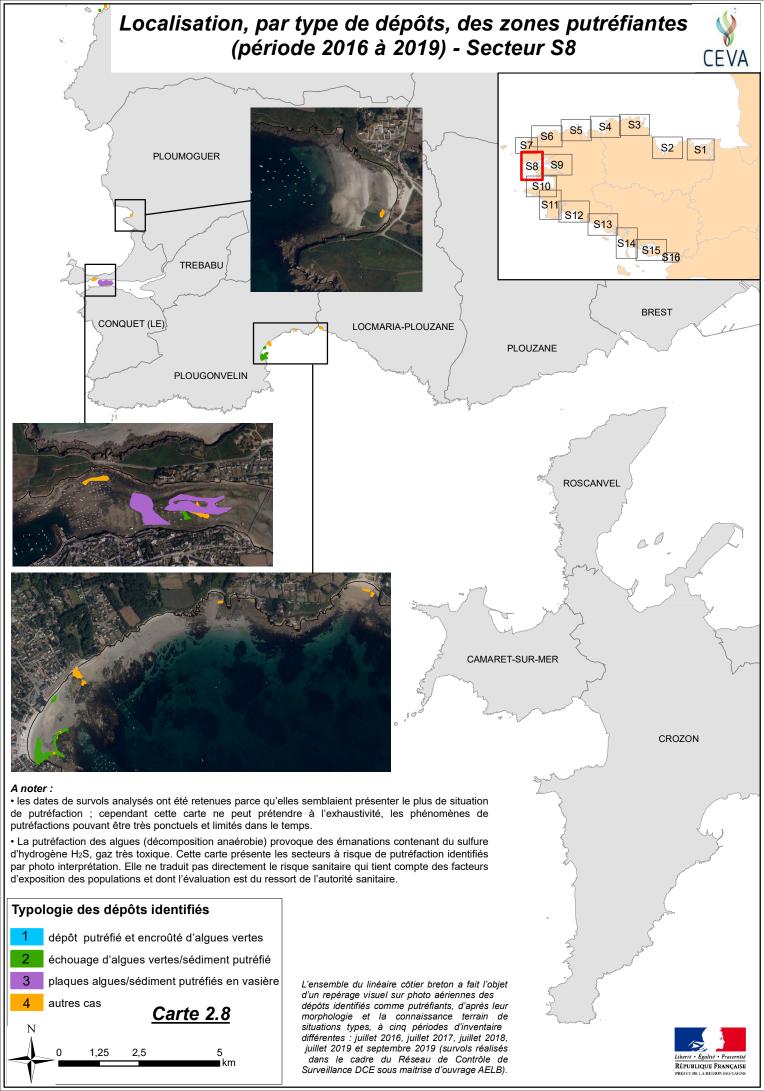


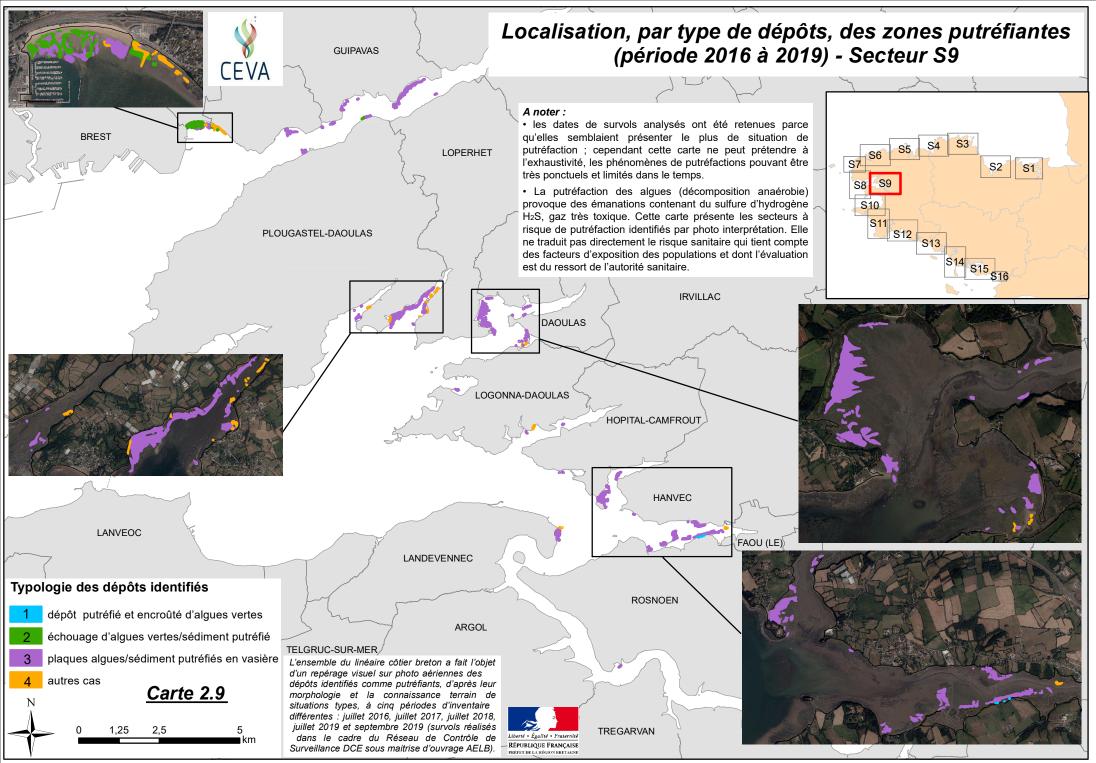


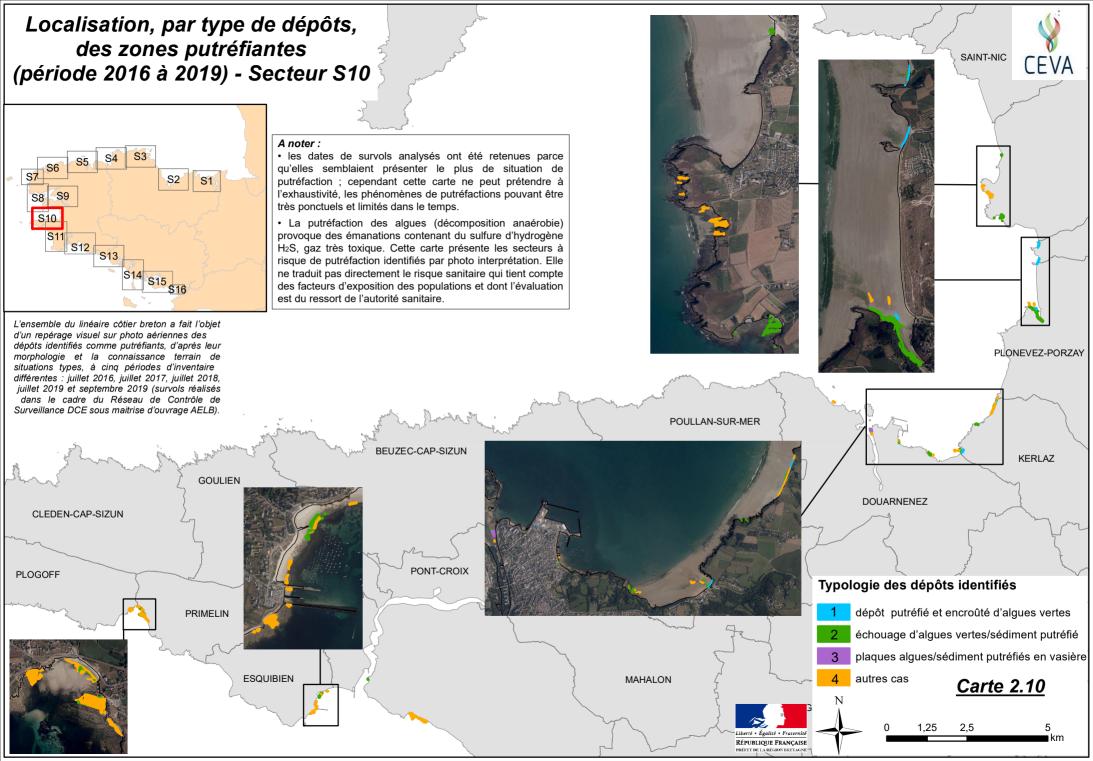
## Typologie des dépôts identifiés dépôt putréfié et encroûté d'algues vertes échouage d'algues vertes/sédiment putréfié plaques algues/sédiment putréfiés en vasière autres cas Carte 2.7

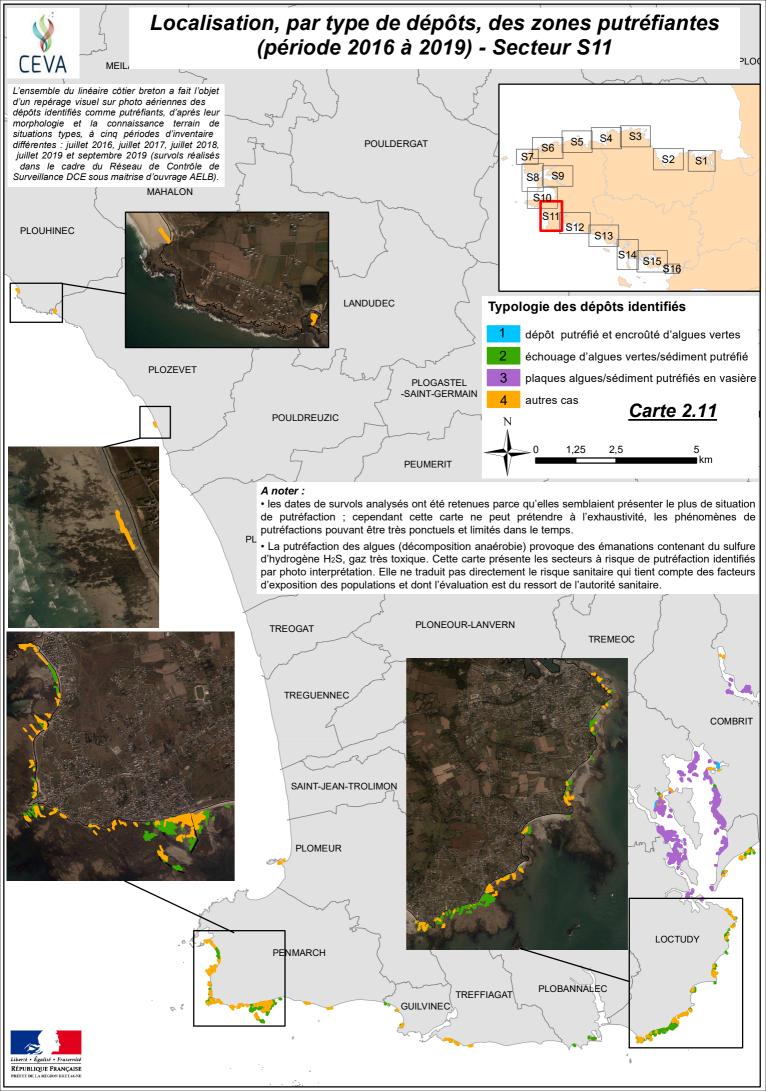
**PLOUARZEL** 

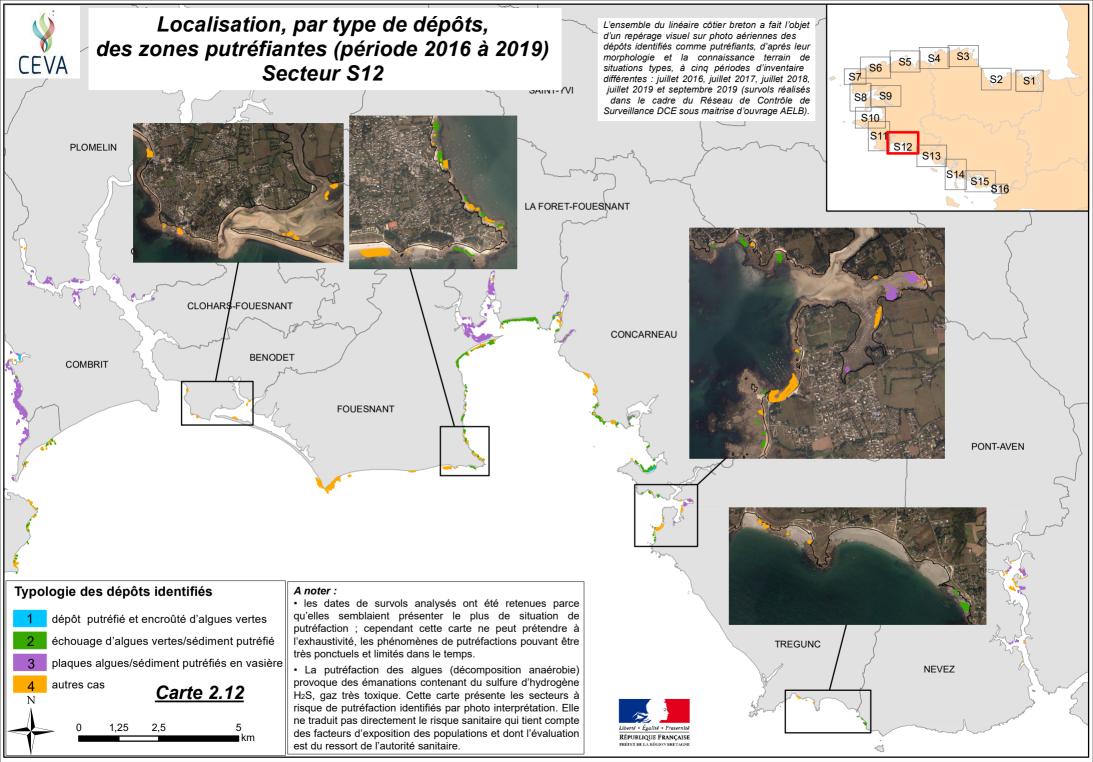
- putréfactions pouvant être très ponctuels et limités dans le temps.
- · La putréfaction des algues (décomposition anaérobie) provoque des émanations contenant du sulfure d'hydrogène H2S, gaz très toxique. Cette carte présente les secteurs à risque de putréfaction identifiés par photo interprétation. Elle ne traduit pas directement le risque sanitaire qui tient compte des facteurs d'exposition des populations et dont l'évaluation est du ressort de l'autorité sanitaire.

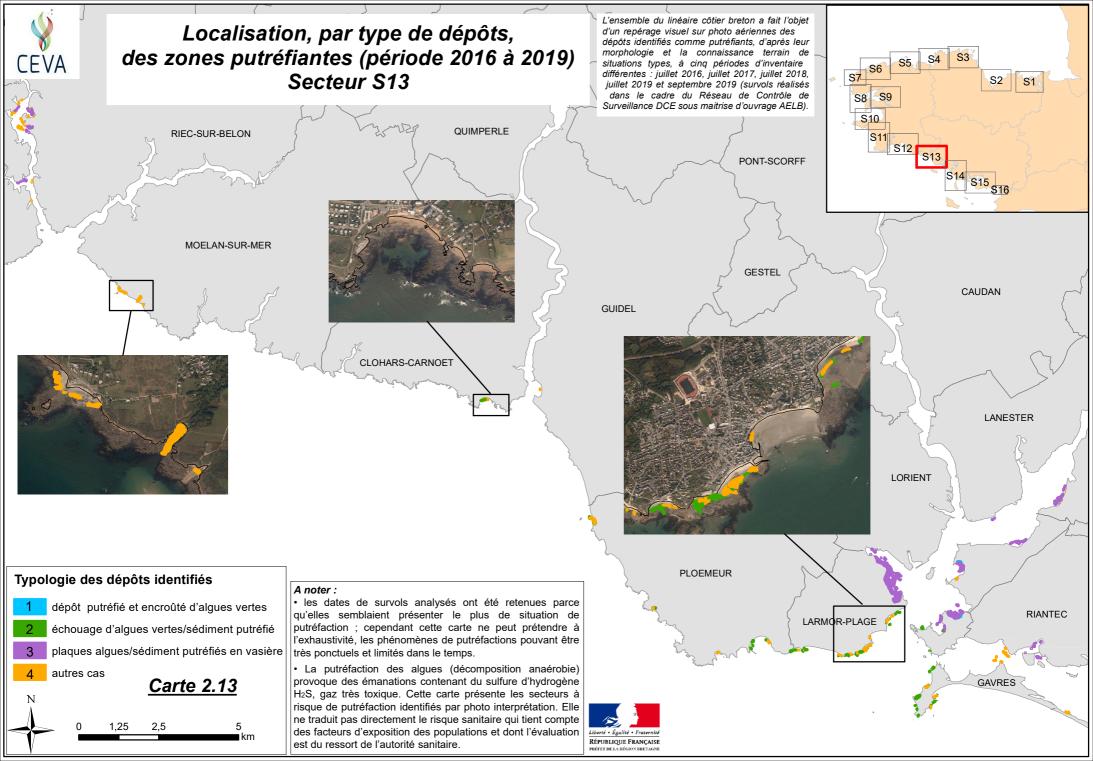


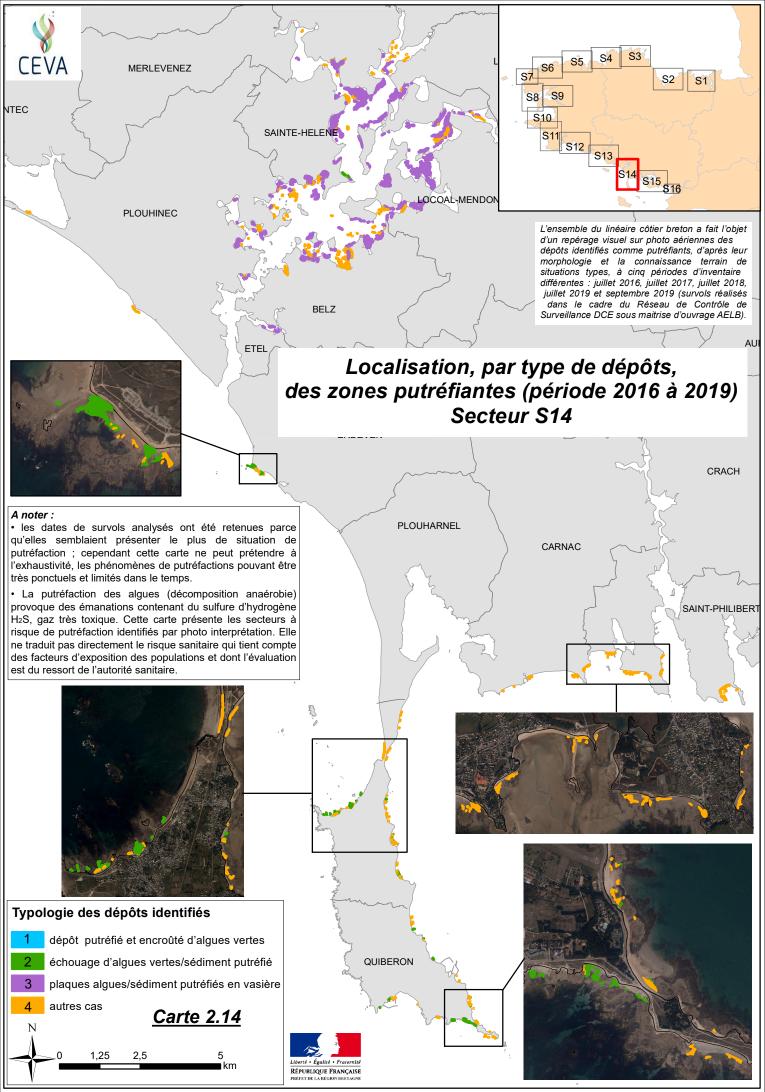


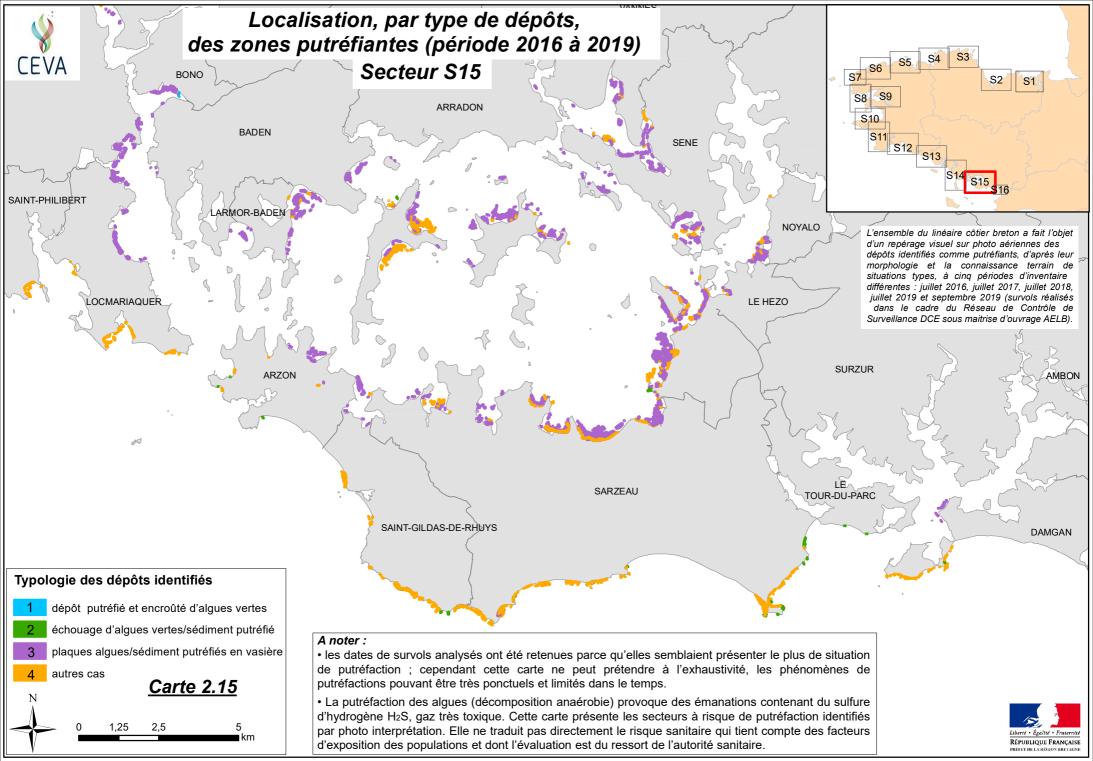


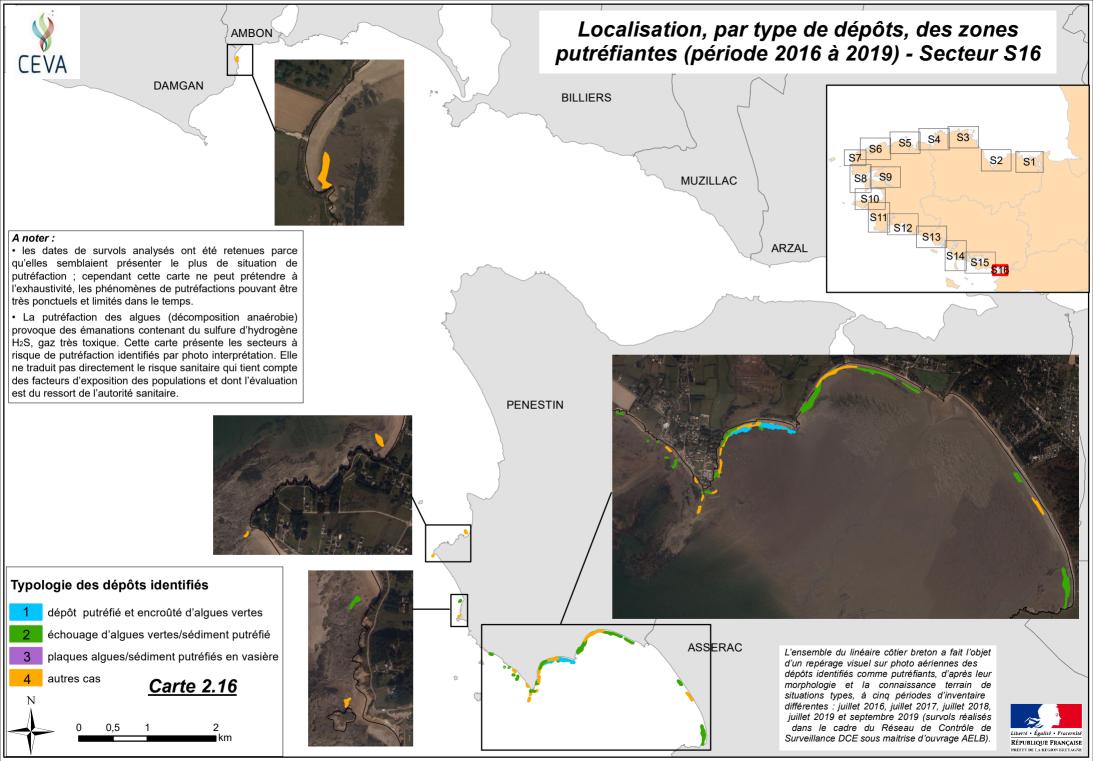


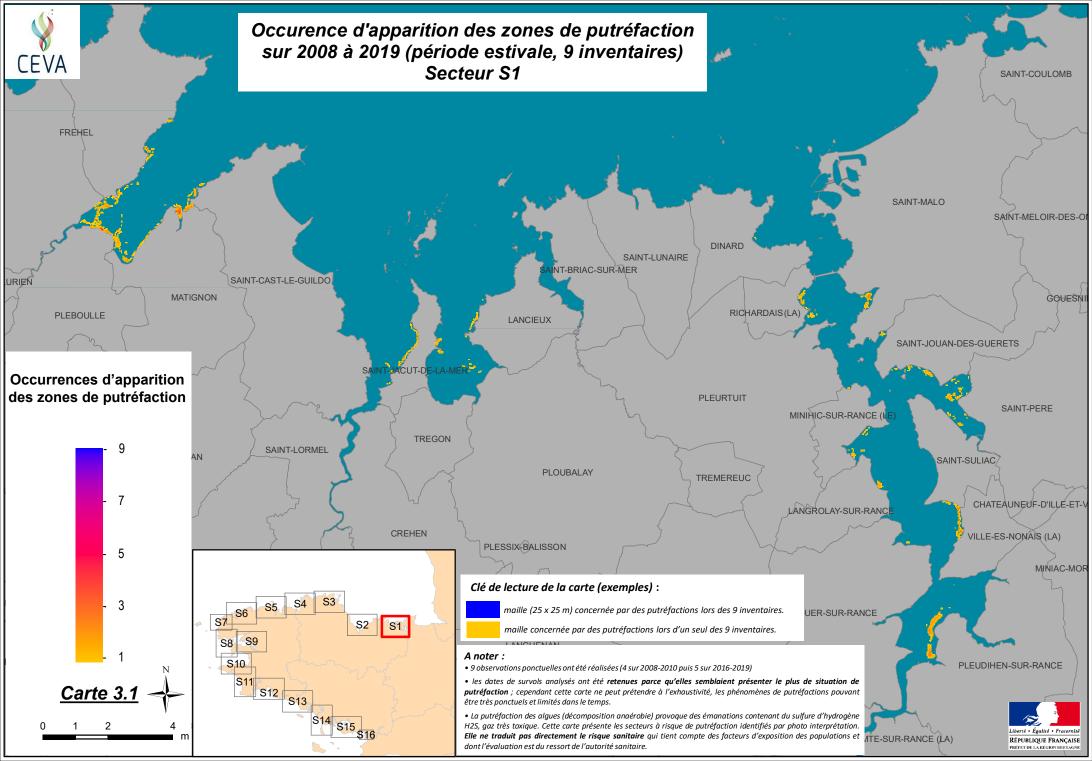


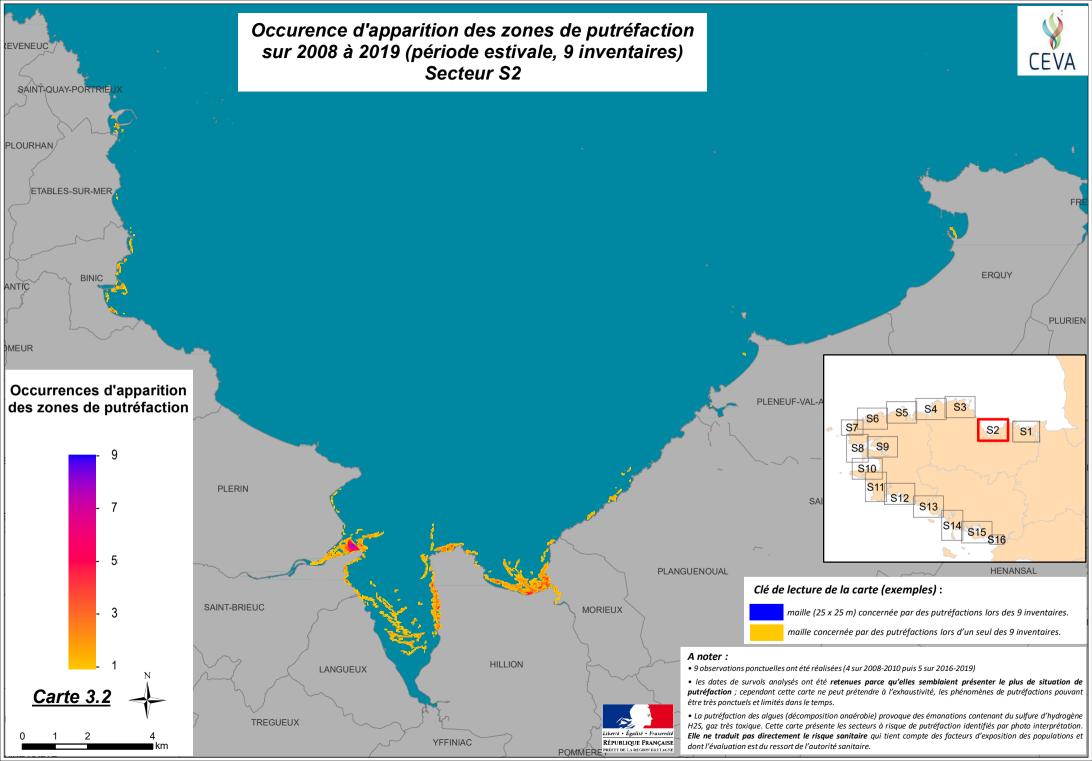


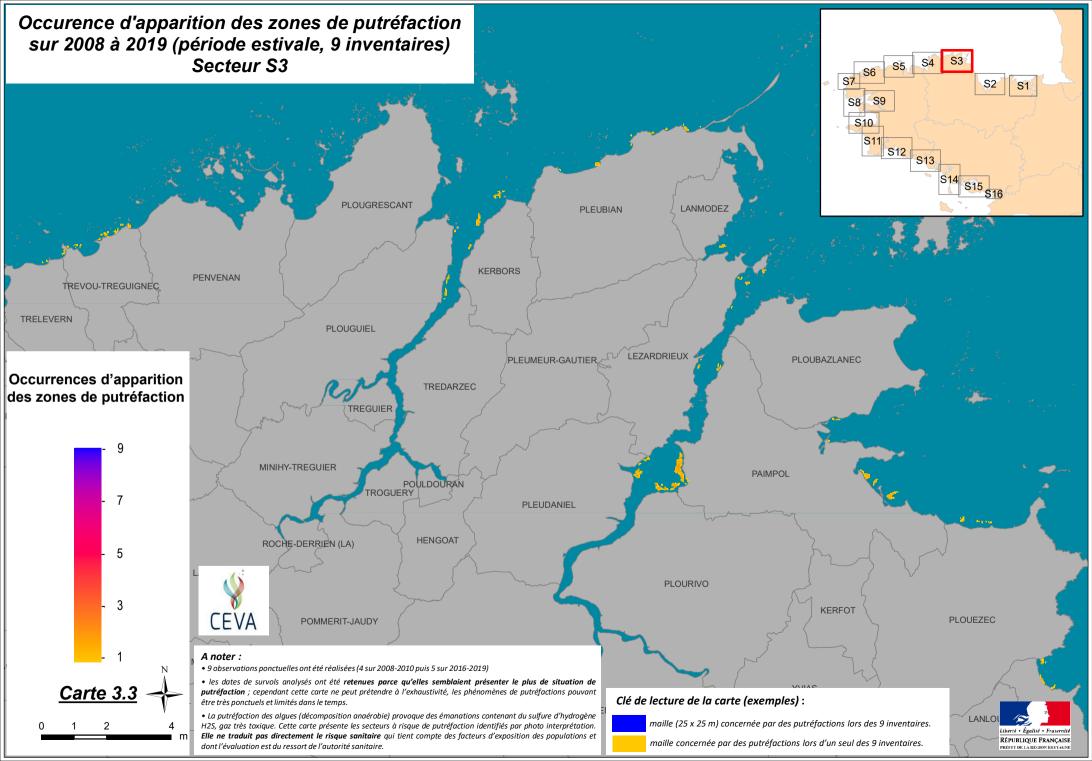


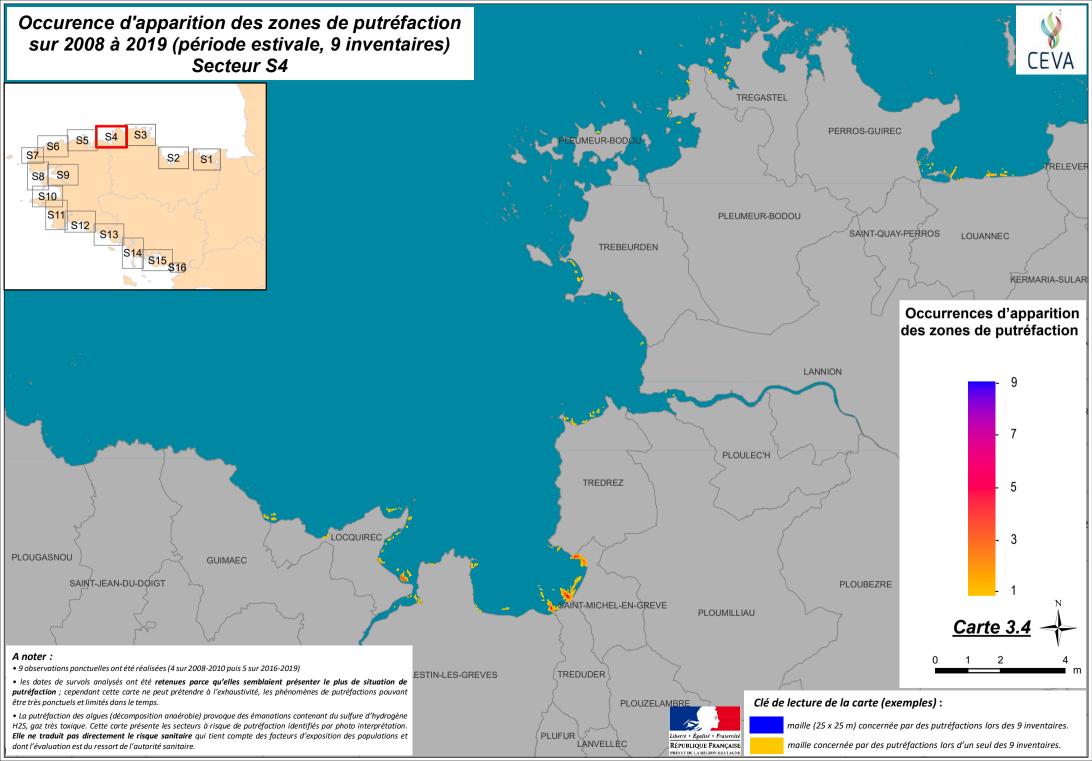


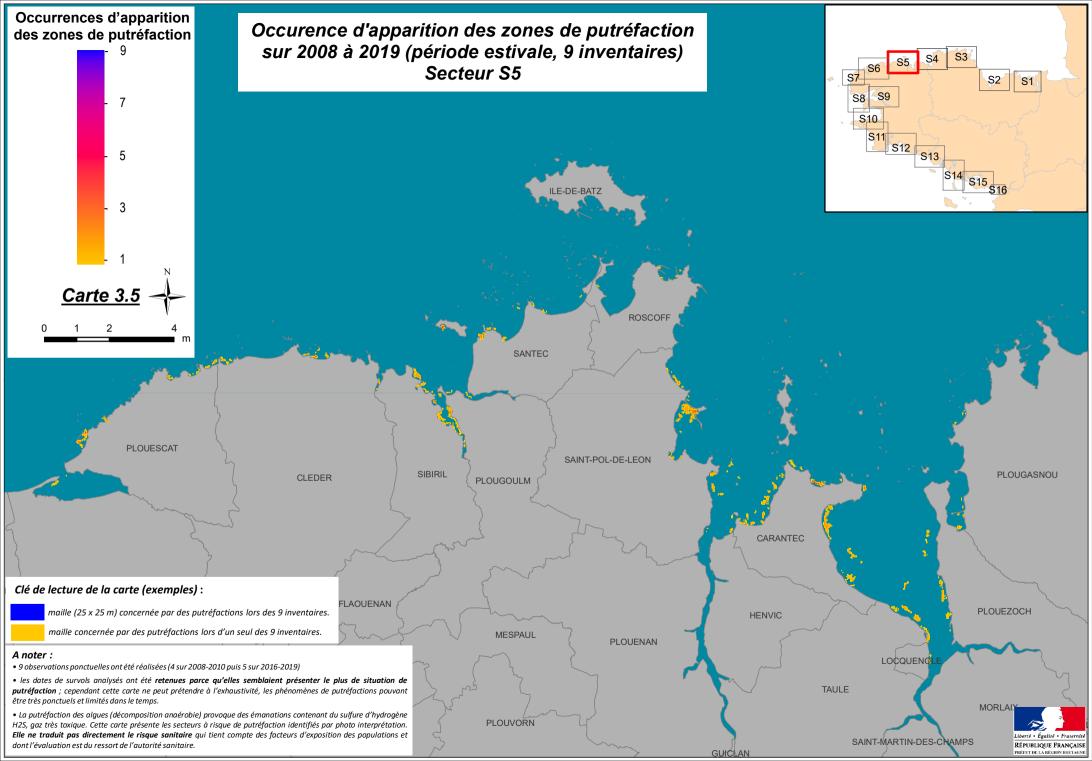


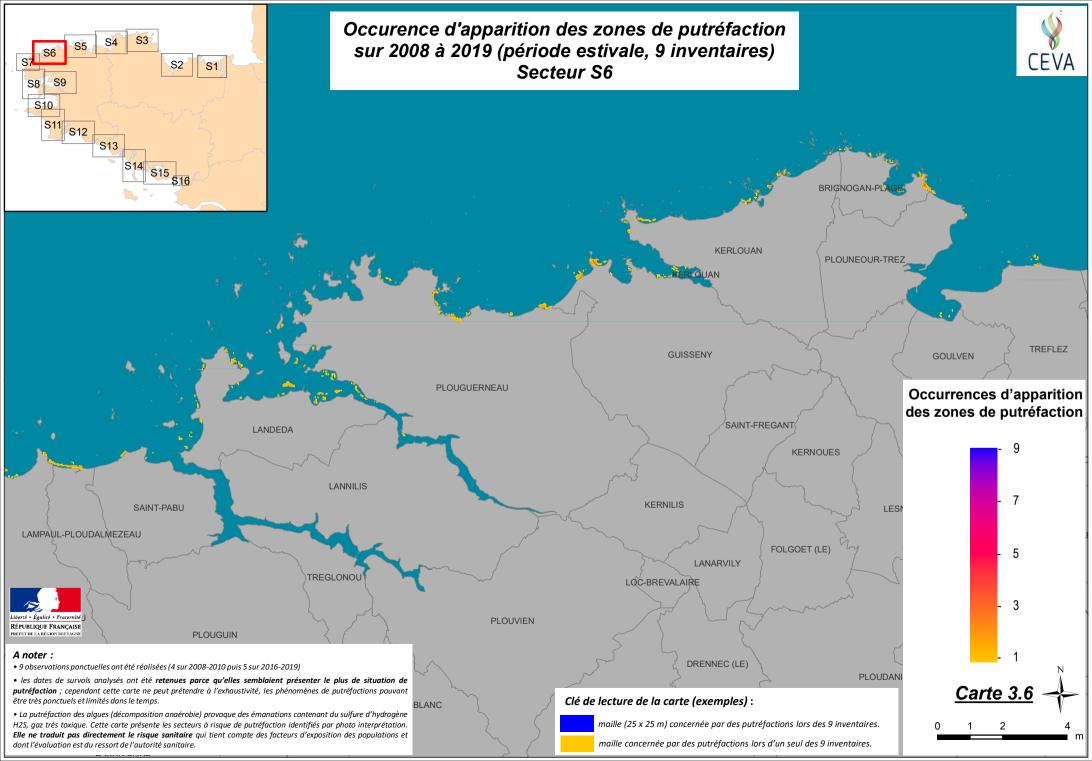


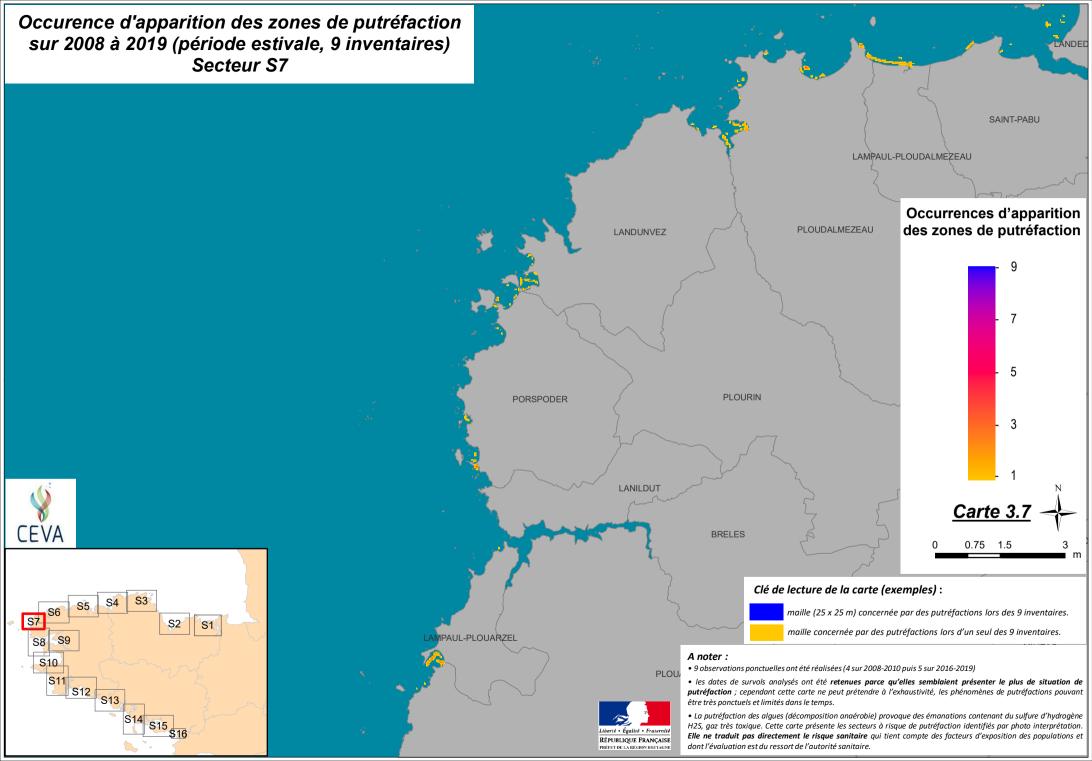


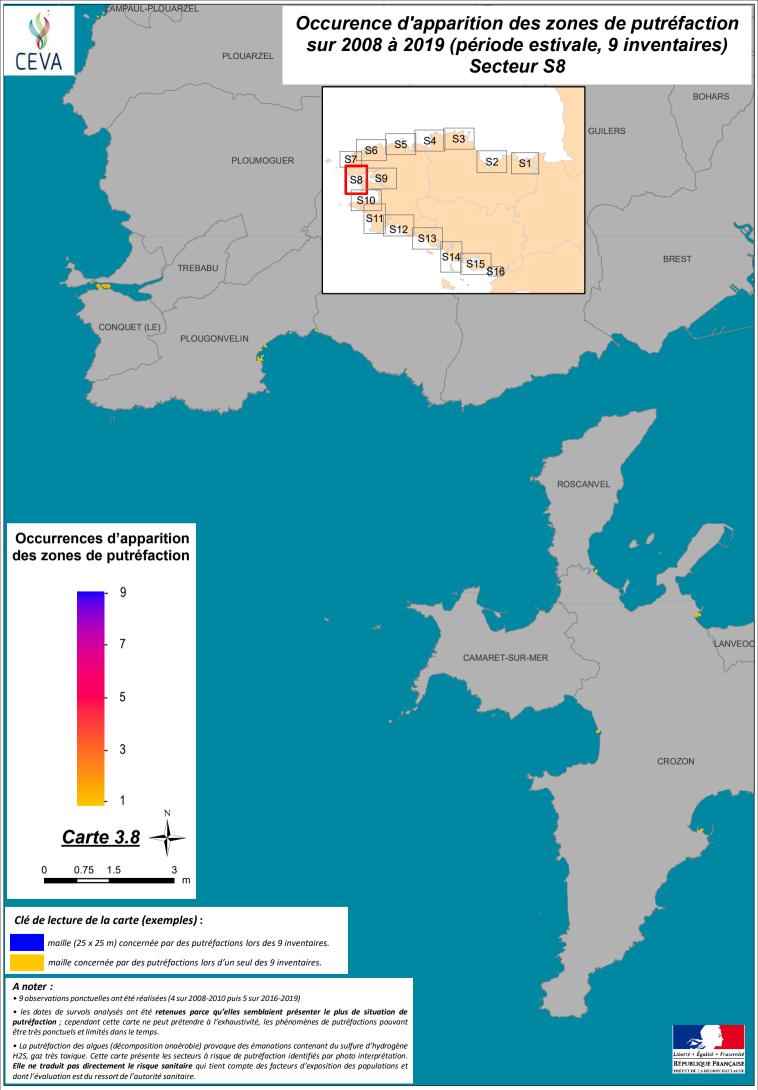


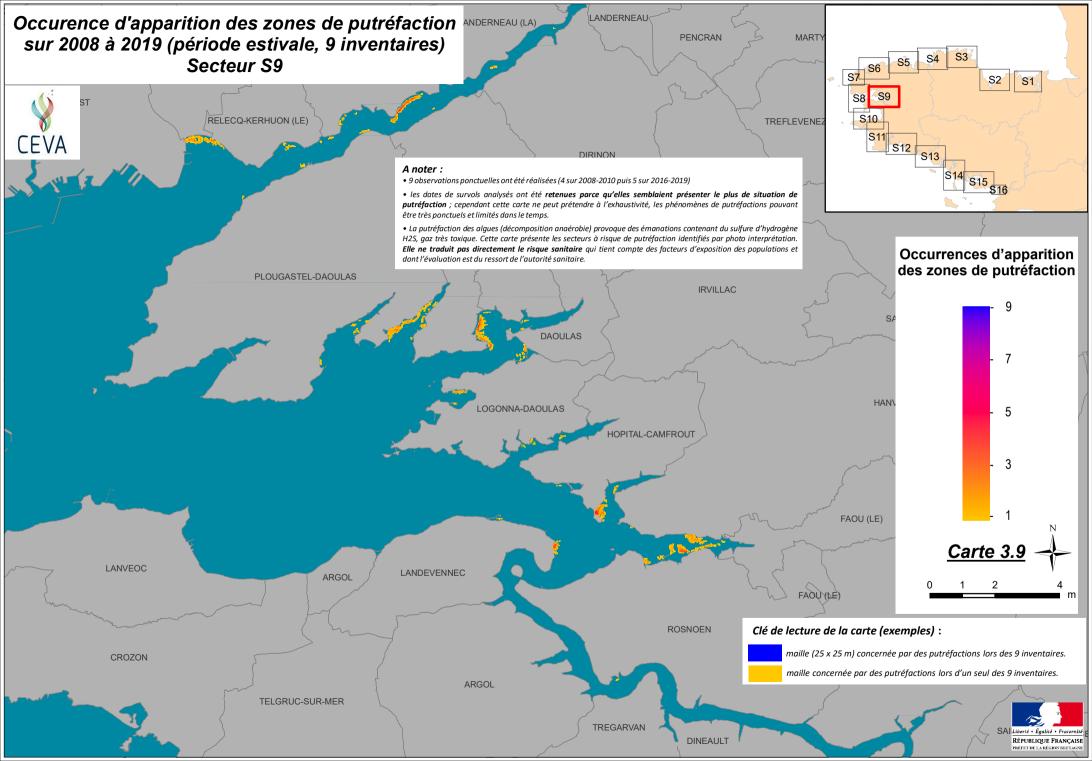


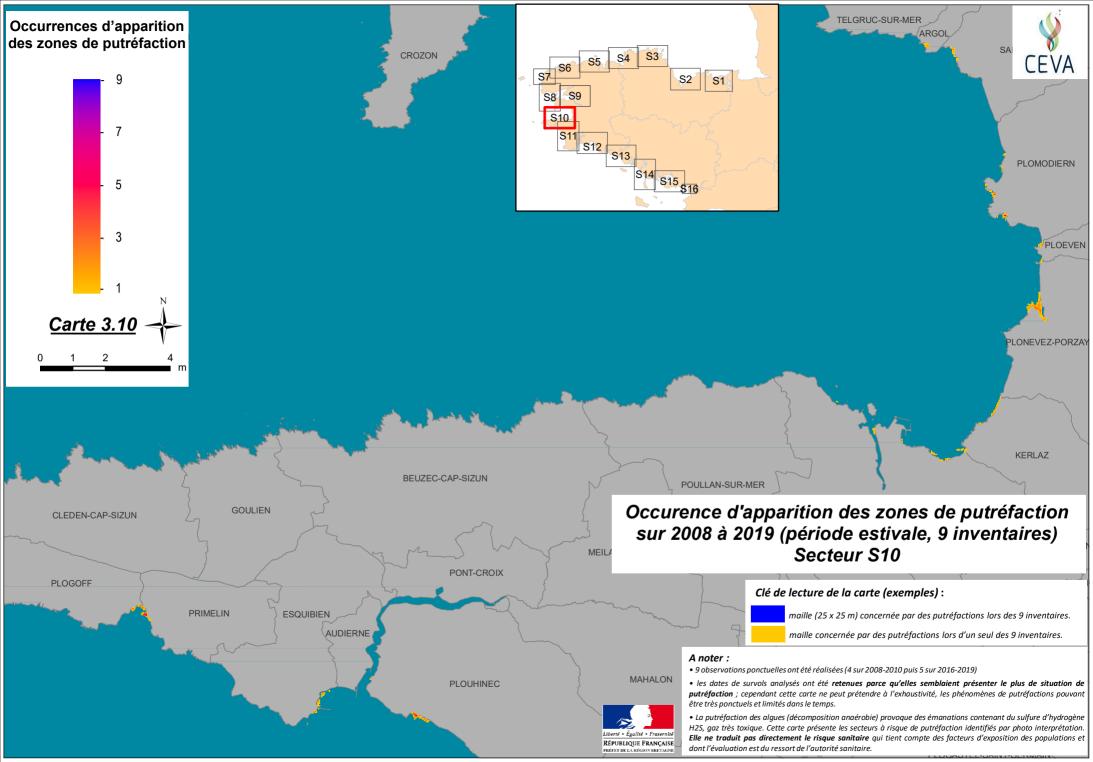


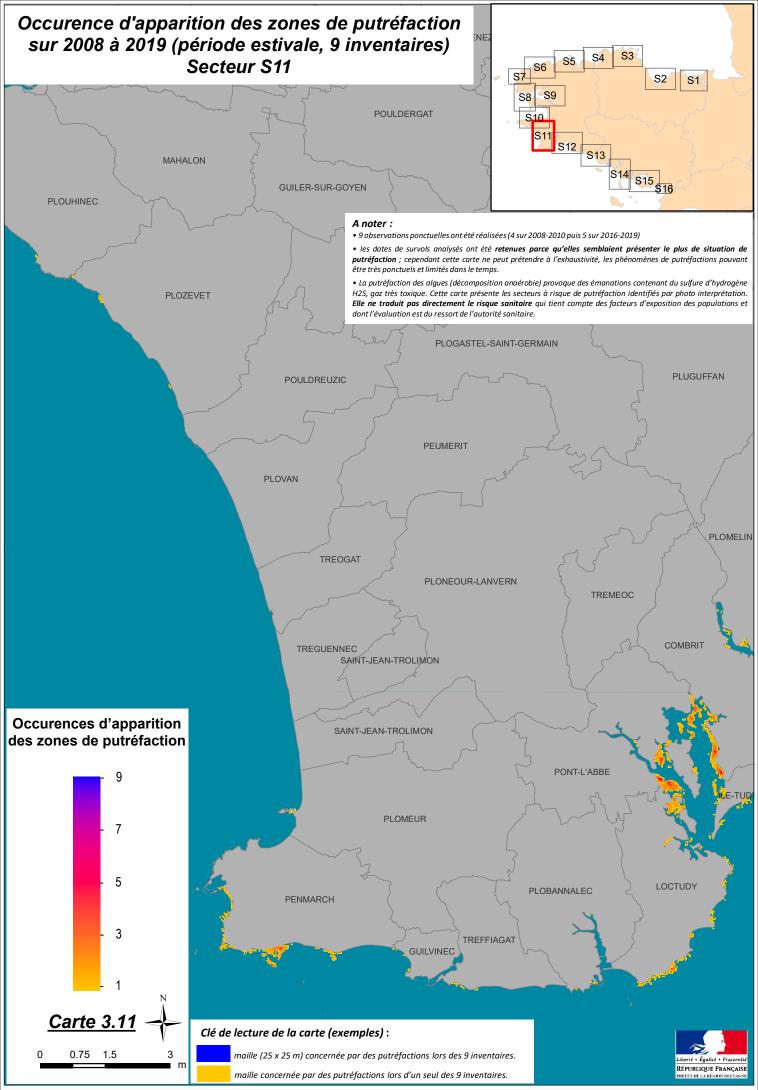


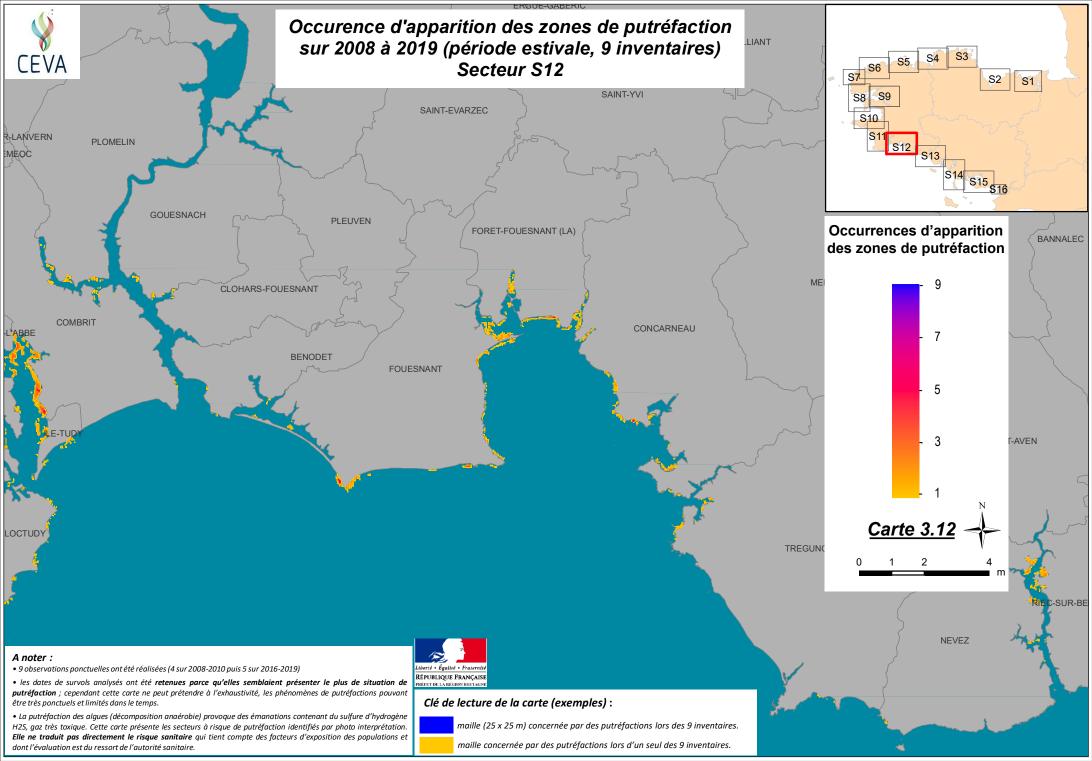


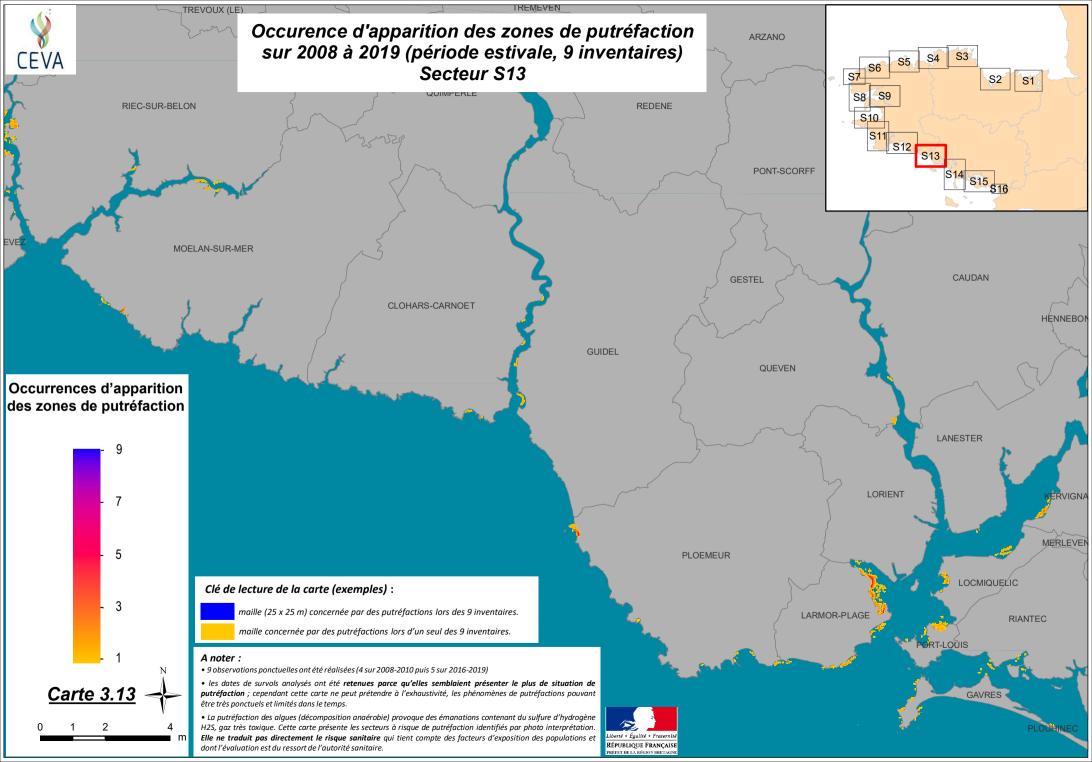


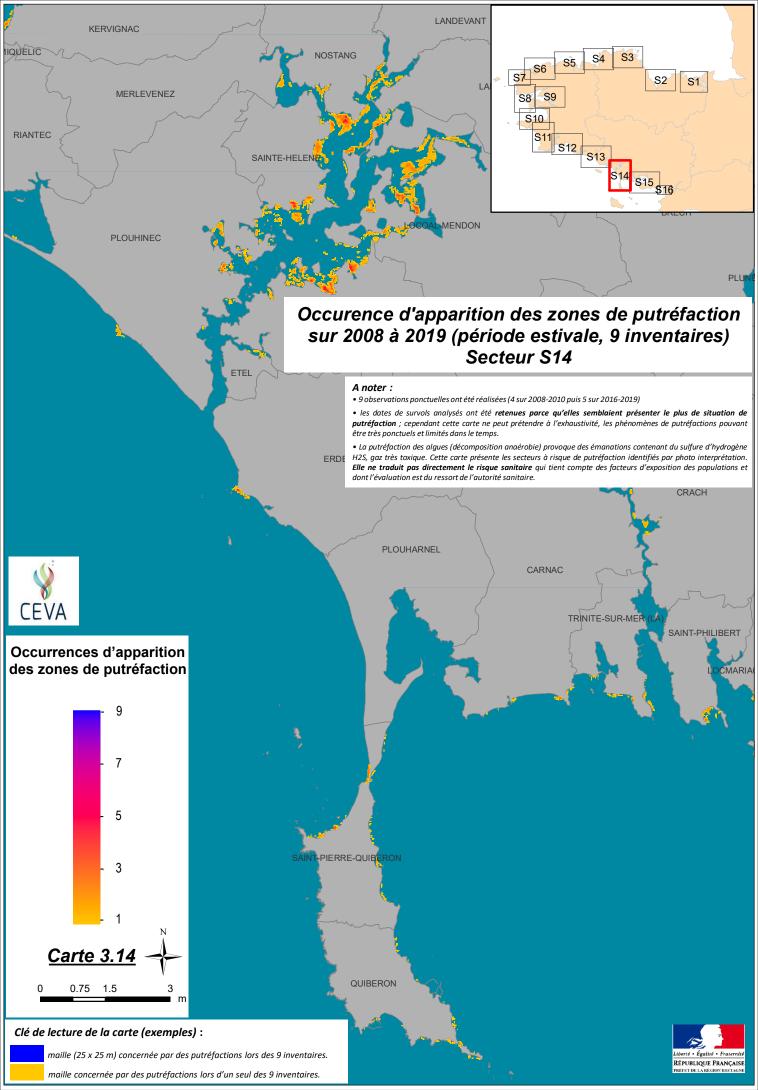


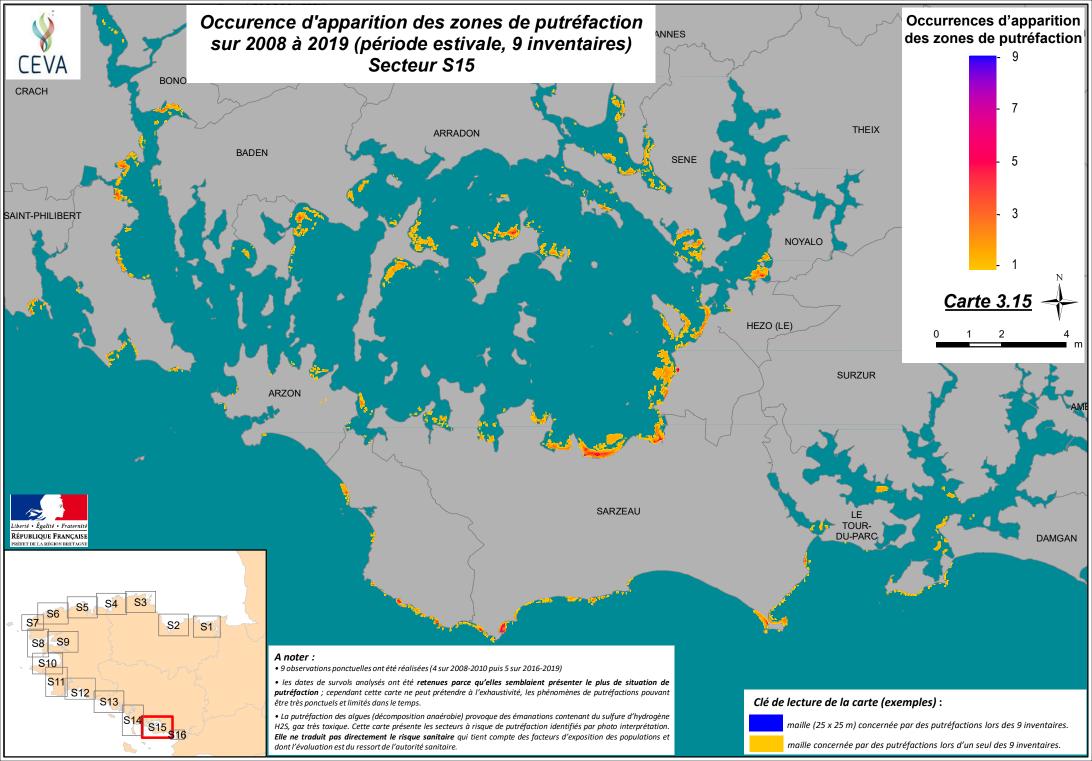


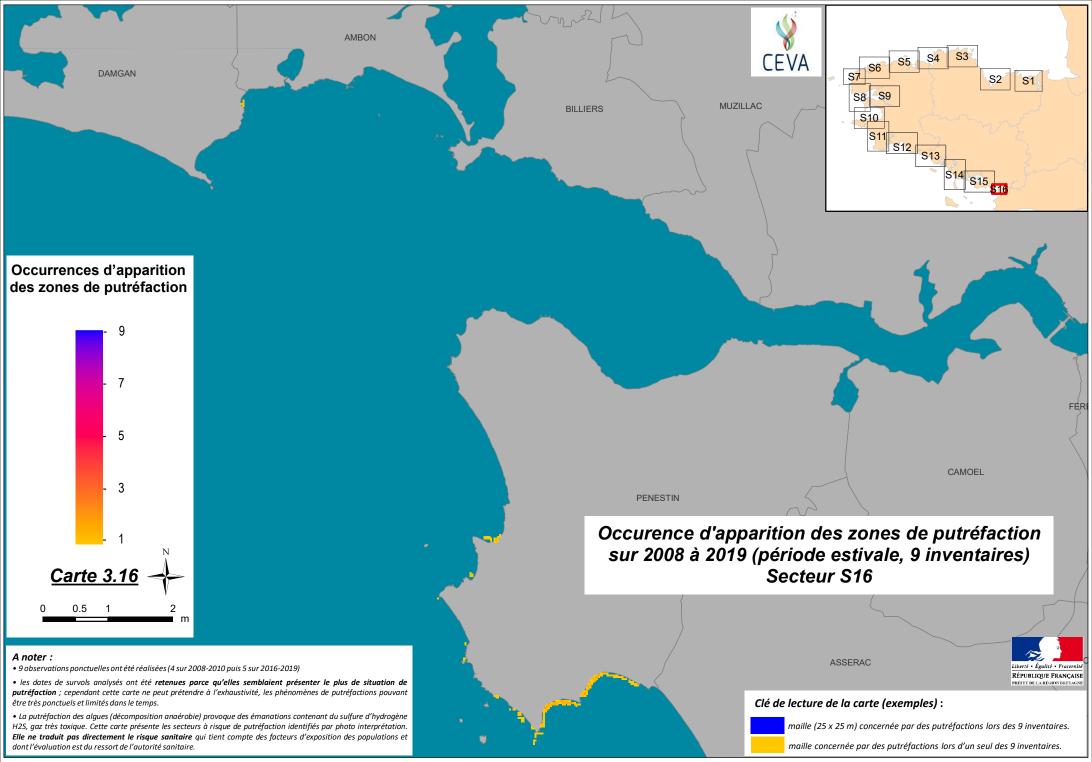












#### Annexe 4:

Fiches des relevés réalisés sur les dépôts en putréfaction (22 fiches en pleine page et « prévisualisation » de l'intégralité des relevés 2019)

# IZAR Inventaire de 2019 :

Fiches de synthèse des observations terrain et des relevés H2S (extrait parmi les 120 fiches)

#### 1. Dépôts putréfiés et encroûtés d'algues vertes

Survol du 14/09/2019



MORIEUX (la Grandville) [H2S] détecté (ppm) air ambiant 0 abrité d<10cm 3 Abrité + perturbé d<10cm + 500











Conditions relativement ventées (14 km/h avec des rafales pouvant atteindre 32 km/h) et fraiches (17°C), peu propices à la mesure d'émissions élevées.

Echouage localisé devant la cale, en haut d'estran. Putréfactions manifestes. Sans brassage les niveaux mesurés sont modérés (moins de 5 ppm) mais en brassant le dépôt on sature le capteur.



### 1. Dépôts putréfiés et encroûtés d'algues vertes

CEVA

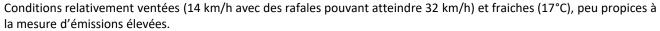
Observations terrain du 09/09/2019

**MORIEUX** (La Grandville / Carieux)

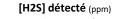








Echouage en haut de plage, sur galets. Blanchi mais bien drainé (très haut sur estran et sur des galets). Aucune émanation H<sub>2</sub>S même en brassant.



air ambiant abrité d<10cm

Abrité + perturbé *d<10cm* 







### 1. Dépôts putréfiés et encroûtés d'algues vertes



[H2S] détecté (ppm) air ambiant 0,7

abrité d<10cm + 72 Abrité + perturbé *d<10cm* 





**MORIEUX** (Carieux)

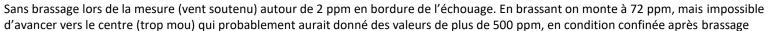
Survol du 14/09/2019







Conditions relativement ventées (14 km/h avec des rafales pouvant atteindre 32 km/h) et fraiches (17°C), peu propices à la mesure d'émissions élevées.





Survol du 17/06/2019



## **YFFINIAC**

(Plage des Valais / sous les Cabanons)





Observations terrain du 20/06/2019

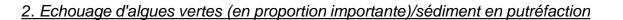


Conditions peu propices à la mesure de teneurs élevées : 15-16°C, vent, temps couvert et marée retirée depuis environ 3-4h. Localement, entre les têtes de roche, le sédiment est très mou et libère des bulles chargées de H2S. Malgré, le vent, le capteur monte à près de 20 ppm dans l'air ambiant, en s'avançant vers le centre du dépôt ; avant brassage on obtient des valeurs autour de 50 ppm dans l'enceinte et en brassant on dépasse les 500 ppm.

[H2S] détecté (ppm) air ambiant 17 abrité d<10cm 51

Abrité + perturbé d<10cm + 500





Survol du 14/09/2019



**LOCQUIREC** (Plage du Fond de la Baie)

[H2S] détecté (ppm) air ambiant

abrité d<10cm 9,8 Abrité + perturbé *d<10cm* 117,9





Observations terrain du 17/09/2019





Conditions peu propices aux mesures de valeurs élevées : vent soutenu 30 km/h rafales à 50 km/h ... En brassant on atteint les 120 ppm. Probablement sans vent la mesure aurait pu dépasser les 500 ppm, en conditions abritées après brassage du milieu.



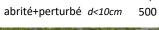


### 2. Echouage d'algues vertes (en proportion importante)/sédiment en putréfaction



## KERLEVEN/SAINT-LAURENT (Plage de Kerleven)

air ambiant 0,6 76,2 abrité d<10cm



[H2S] détecté (ppm)











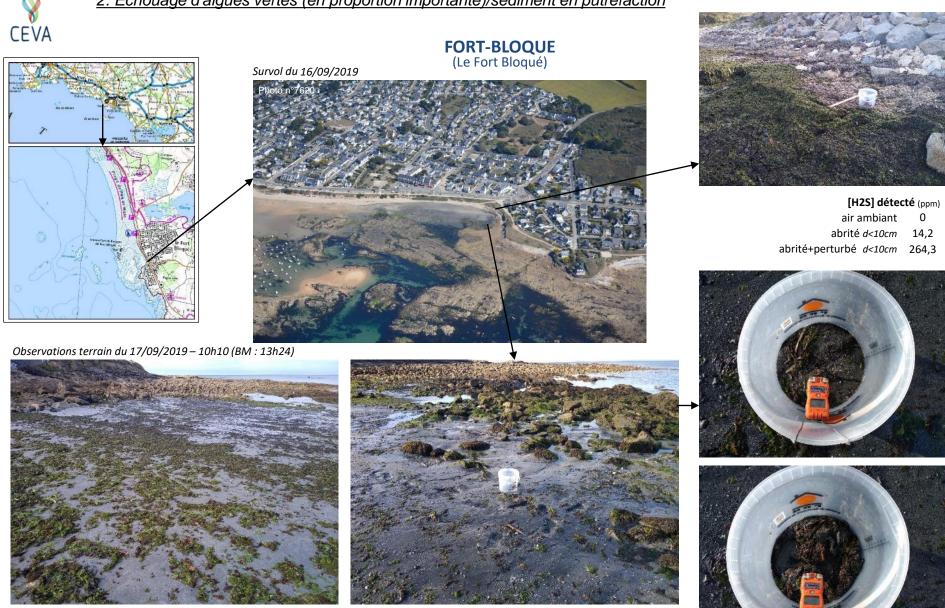




Zone souvent touchée par des putréfactions, également zone de ramassage fréquent favorisant l'enfouissement et donc la formation d'H2S, dépôt d'algues fraiches mais sédiment meuble imbibé de gaz



#### 2. Echouage d'algues vertes (en proportion importante)/sédiment en putréfaction



Conditions relativement propices à la mesure d'émanations élevées : milieu de matinée, ciel légèrement couvert (18°C), peu de vent (18 km/h - rafales 36 km/h).

Andains plus ou moins anciens d'algues vertes en mélange (sans émanation), prolongé en dépôt et sédiment meuble

coloré en gris en bas de plage avec de fortes valeurs relevées dans l'enceinte après perturbation.





YFFINIAC (port du Légué)

[H2S] détecté (ppm) air ambiant 0,8 abrité d<10cm 10 - 20 Abrité + perturbé d<10cm + 500















Conditions peu propices à la mesure d'émanations élevées : 15-16°C, vent, temps couvert et marée retirée depuis environ 3-4h. Les jours précédents au pied de la cale mesures régulièrement autour de 30 à 130 ppm par les opérateurs du port (air ambiant, jours sans vent). Premier jour de reprise du désenvasement après 7 semaines sans opération. Mesures réalisées en « bordure » de la vasière car trop mou pour aller vers l'intérieur.





[H2S] détecté (ppm) air ambiant 0

abrité d<10cm 2,9 Abrité + perturbé d<10cm 465,9

YFFINIAC (port du Légué)

Survol du 17/06/2019



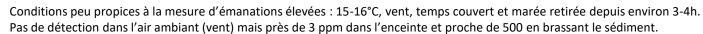
Observations terrain du 20/06/2019

NATURELLE DE LA BAIE













[H2S] détecté (ppm) air ambiant abrité d<10cm

abrité+perturbé d<10cm 117,4

5,6

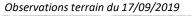
**ELORN** (Kermeur Saint-Yves)















Deux mois après la précédente mesure sur le même secteur, la zone de putréfaction relevée en juillet est toujours présente mais recouverte par plus d'algues vertes, la teneur en H2S est beaucoup plus élevée qu'en juillet.

CEVA

[H2S] détecté (ppm)

abrité+perturbé *d<10cm* 48,2

air ambiant 0 abrité d<10cm 1,6

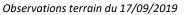






**DAOULAS** (Anse de Prat Mil Pont)









Plaque blanche vue de l'aérien, vase noire molle recouverte de floculat blanc et d'algues (gracilaires et surtout ulvaria) On aurait pu s'attendre à des valeurs de H2S beaucoup plus élevées vu l'aspect très dégradé de cette zone.



CEVA

**PORT LOUIS** (Anse de Zanflamme)



Observations terrain du 22/08/2019





Tapis d'algues vertes en lames. Aucune émanation dans l'air ambiant. La concentration en H2S augmente fortement après perturbation de la vase (noire en profondeur) et des algues.

#### [H2S] détecté (ppm)

air ambiant abrité d<10cm 5,1 abrité+perturbé d<10cm 73







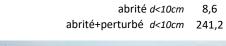


#### 4. Autres cas particuliers - sédiment en putréfaction

[H2S] détecté (ppm)

8,6 abrité d<10cm

air ambiant









**FRESNAYE** (Port Nieux)

Survol du 16/07/2019



Observations terrain du 17/07/2019



St-Cast-le-G



Dépôt d'Ectocarpales en décomposition avancées sur les bords de la filière principale (jus gris/blancs, vase très noire sous les algues). Des odeurs sont perceptible mais aucune émanation d'H2S détectée dans l'air ambiant. Après perturbation du sédiment dans l'enceinte, la concentration augmente très fortement.



[H2S] détecté (ppm)

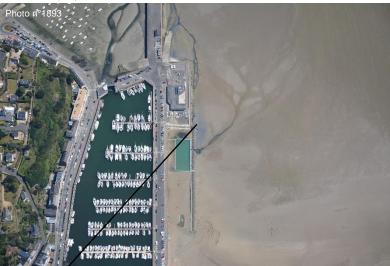
air ambiant 0 abrité *d<10cm* 33,5

abrité+perturbé d<10cm 72,4

#### BINIC/ETABLES-SUR-MER (Plage de la Banche)

Survol du 16/07/2019 (Plage de la Banch





Observations terrain du 18/07/2019



Absence de dépôt le jour du vol, mais le sédiment est teinté en gris et s'enfonce sous l'effet des pas. Aucune émanation dans l'air ambiant, mais les concentrations en H2S sont fortes en milieu abrité et après avoir perturbé le sédiment.











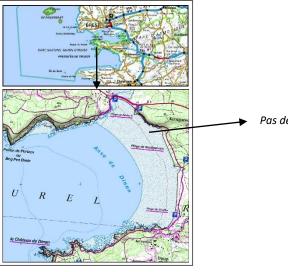
#### **CROZON - ANSE DE DINAN**

(Plage de Kersiguénou)

[H2S] détecté (ppm)

air ambiant 0 abrité *d*<10cm 0,9

abrité+perturbé *d<10cm* 244



Pas de photo aérienne (P112)

Observations terrain du 13/09/2019





Zone sableuse contre des roches, très molles (sables « mouvants ») avec très peu d'algues, algues diverses enfouies (falkenbergia, algues brunes).

Teneur H2S élevée quand on brasse la zone molle, en profondeur.









### 4. Autres cas particuliers - sédiment en putréfaction



[H2S] détecté (ppm)

air ambiant 0 abrité *d<10cm* 214

abrité+perturbé d<10cm 218,5

## **BEG MEIL** (Pointe de Mousterlin)









Observations terrain du 19/09/2019

Dépôts massifs perçus lors du vol sont absents ; plusieurs tests ont été effectués sur du sédiment nu, parfois légèrement rosé (qui ont révélé très peu de H2S). A un endroit et sur moins d'un mètre carré, le sédiment sain en apparence mais beaucoup plus mou a montré un taux élevé d'H2S



### 4. Autres cas particuliers - sédiment en putréfaction





#### **LARMOR-PLAGE** (Plage de Port Maria)

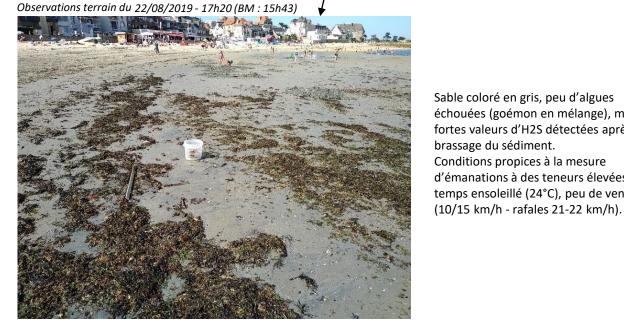


[H2S] détecté (ppm) air ambiant abrité d<10cm abrité+perturbé d<10cm 59,9



Sable coloré en gris, peu d'algues échouées (goémon en mélange), mais fortes valeurs d'H2S détectées après brassage du sédiment. Conditions propices à la mesure d'émanations à des teneurs élevées : temps ensoleillé (24°C), peu de vent







#### 4. Autres cas particuliers - sédiment en putréfaction

Survol du 16/09/2019

CEVA

[H2S] détecté (ppm)

air ambiant 0 abrité *d*<10cm 3,5

abrité+perturbé d<10cm 345,1























### **EST GOLFE 56**

(Lasné)

[H2S] détecté (ppm) air ambiant 5,5 abrité d<10cm

abrité+perturbé *d<10cm* 73













Dépôt très massif de zostère et de Gracilaires en mélange, en décomposition avancée, avec odeurs et jus blanchâtres. De fortes émanations sont détectées en milieu confiné et après perturbation. Le dépôt est très épais et des valeurs supérieures auraient probablement été détectées plus en profondeur.





#### [H2S] détecté (ppm)

air ambiant 0 abrité d<10cm 0,9

# abrité+perturbé d<10cm 69,9







### **SUD ARZON** (Plage de Kervert)





Observations terrain du 19/09/2019



Andain/Echouage massif de *Zostera marina*, sédiment coloré en gris sous le dépôt et en périphérie. Pas/peu d'émanation dans l'air ambiant ou en milieu abrité, mais de fortes valeurs sont mesurées dans l'enceinte après perturbation (sur la partie peu épaisse du bas du dépôt et sur le sédiment nu).



#### [H2S] détecté (ppm)

air ambiant 0 abrité *d<10cm* 1,7

abrité+perturbé *d<10cm* 98,5

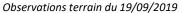
#### SAINT GILDAS DE RHUYS















Echouage massif de *Solieria chordalis* et d'ulves (20% max) en décomposition avancée sur le haut du dépôt. Pas d'émanation dans l'air ambiant, très faibles sur le dépôt en milieu abrité, mais les valeurs augmentent fortement à 100 ppm après perturbation.

[H2S] détecté (ppm)

air ambiant 0,8

5,6 abrité d<10cm

abrité+perturbé d<10cm 72,9





Observations terrain du 22/08/2019 - 14h30 (BM 16h00)





Dépôt massif très dégradé avec une majorité de Solieria chordalis encore identifiables, décomposées et mélangées à la vase (la biomasse en décomposition fusionne avec le sédiment). Une odeur est perceptible dès l'arrivée sur le site (0,8 ppm) et de fortes émanations sont mesurées après perturbation.



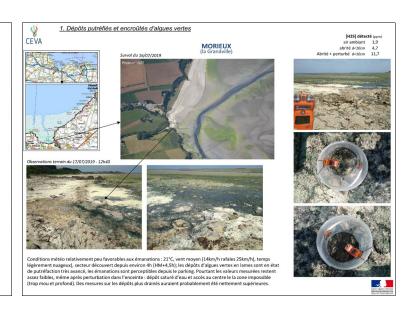


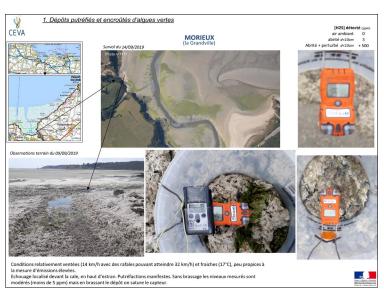




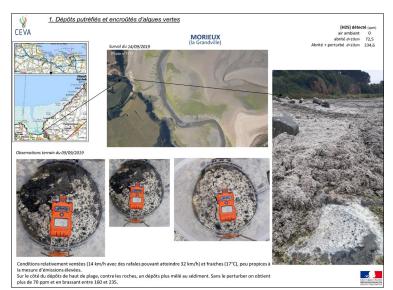
# IZAR Inventaire de 2019 :

Fiches de synthèse des observations terrain et des relevés H2S

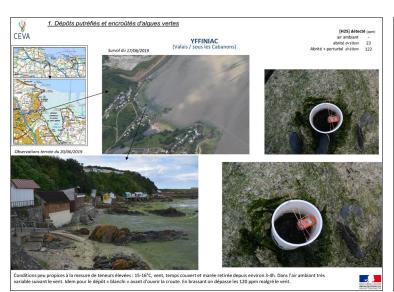


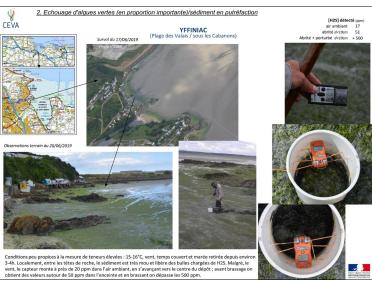


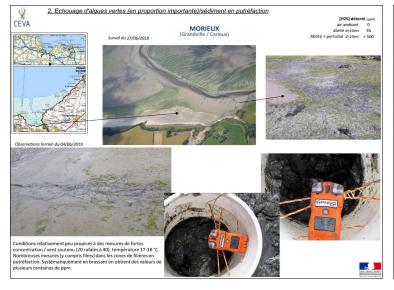


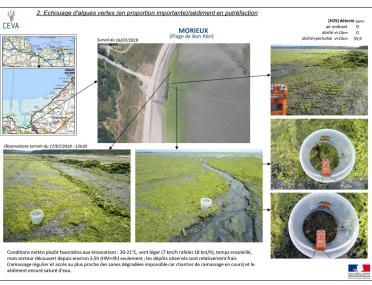


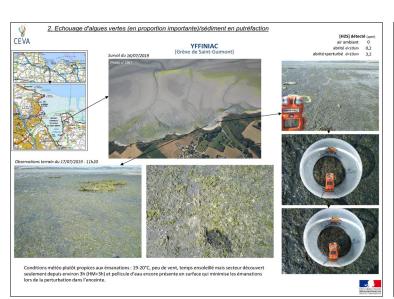


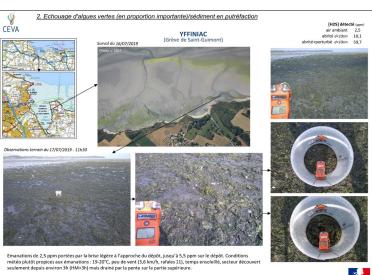


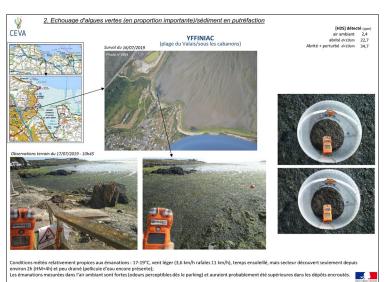




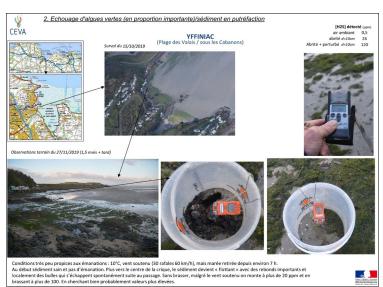




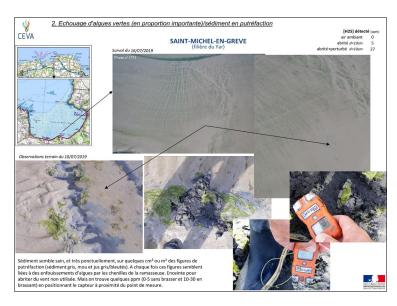






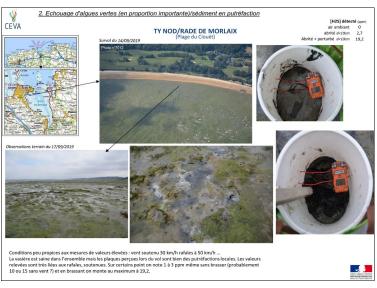




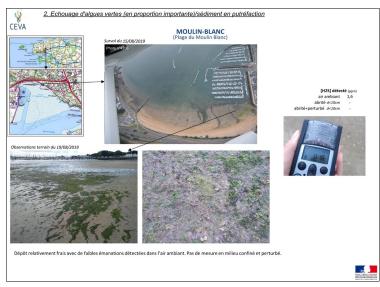








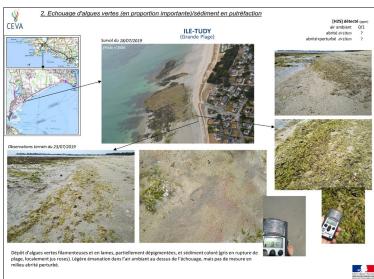


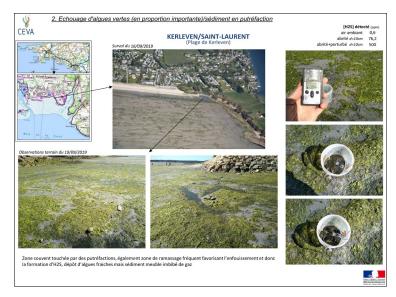


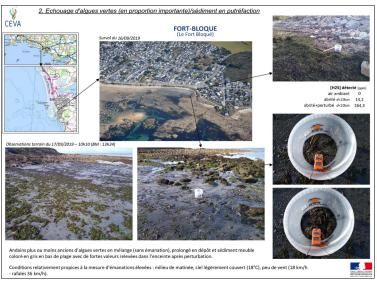




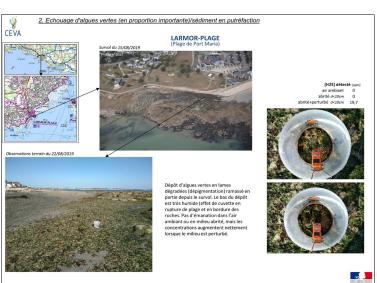


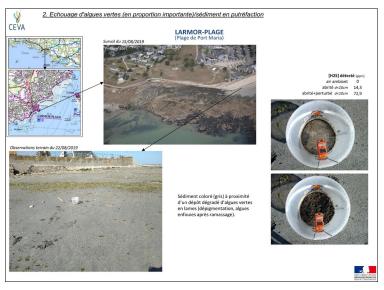




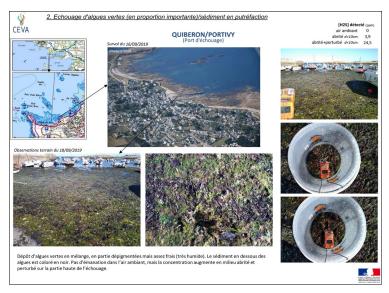


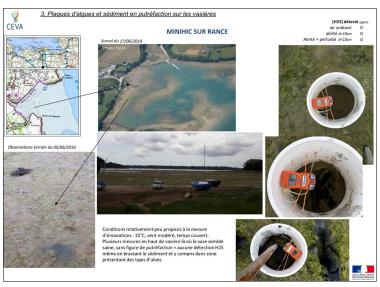


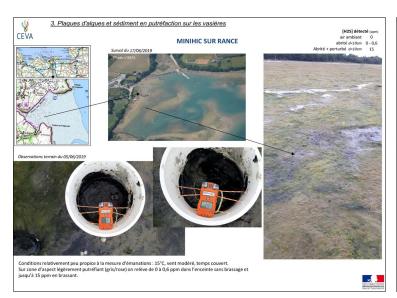


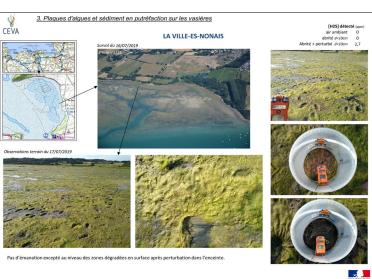


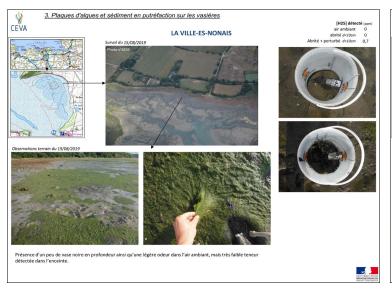


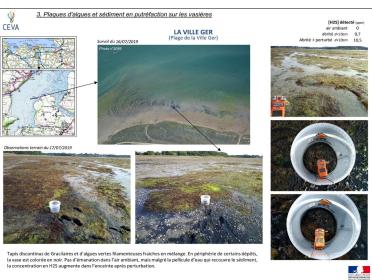


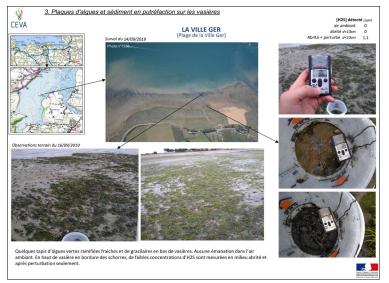


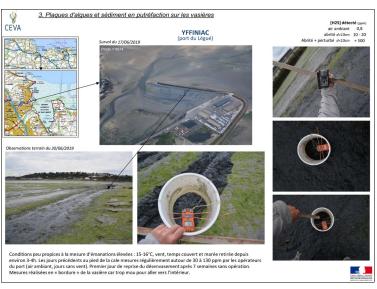








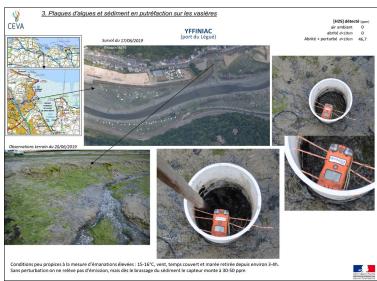


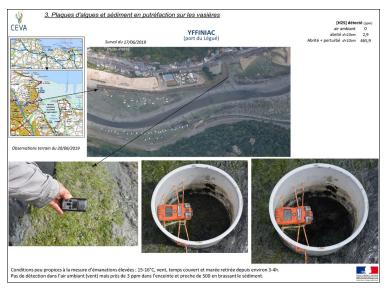




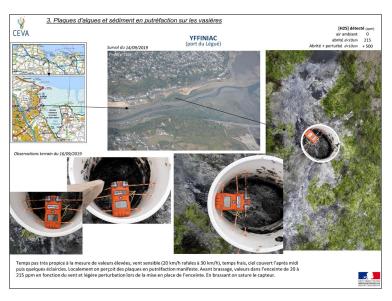


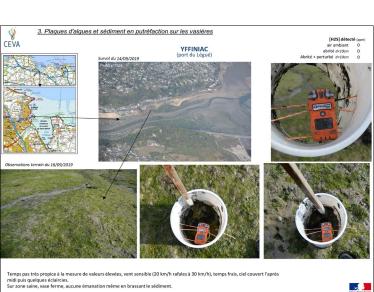


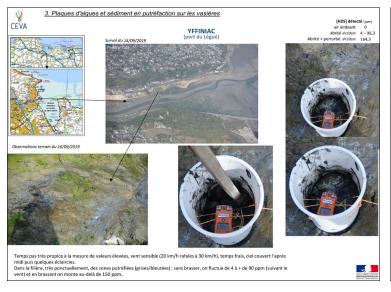


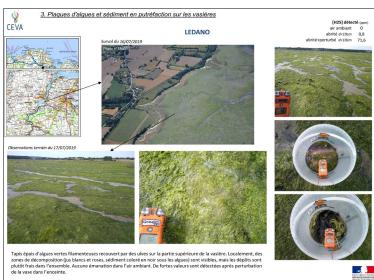


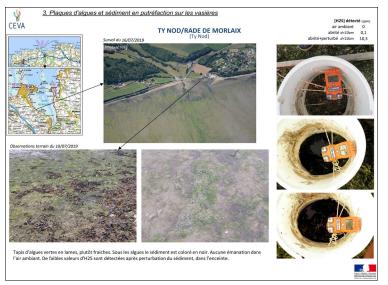




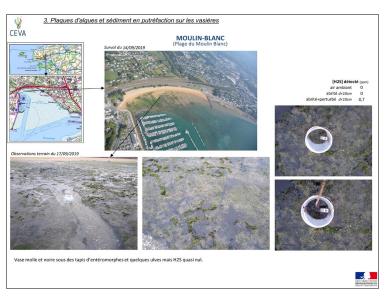






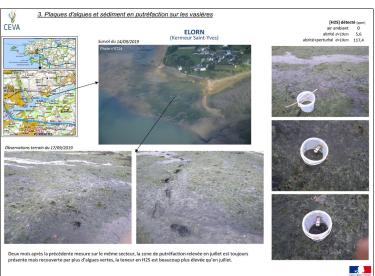


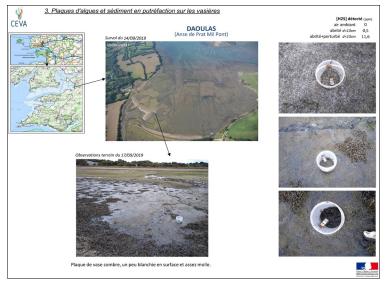




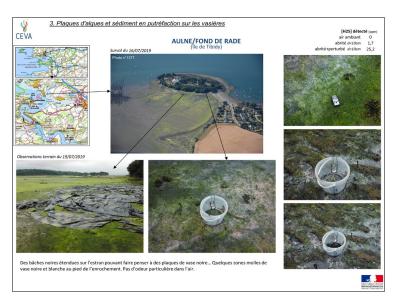






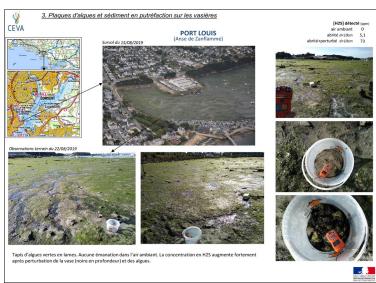


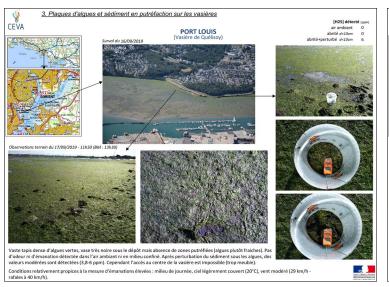


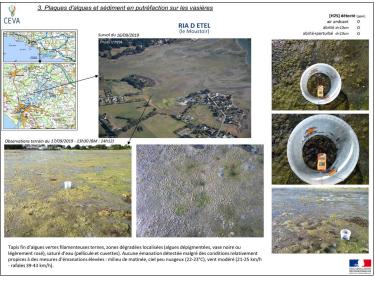


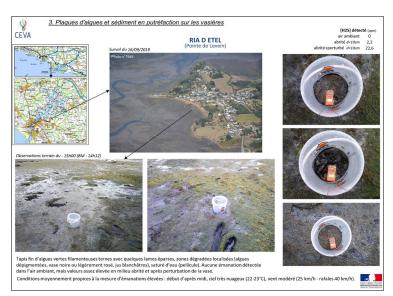




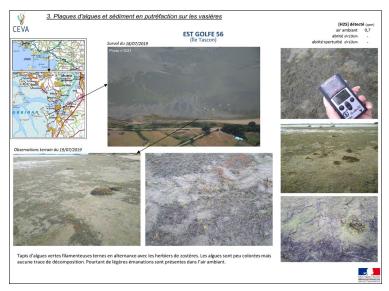


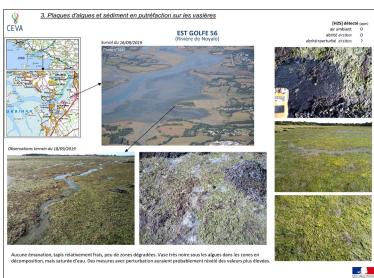


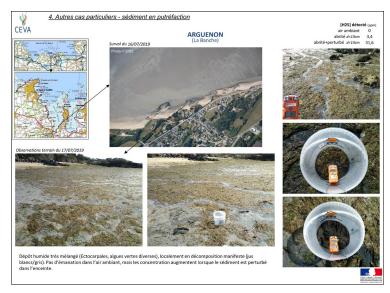






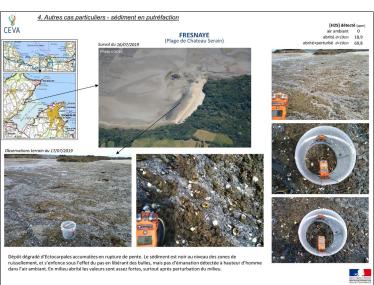


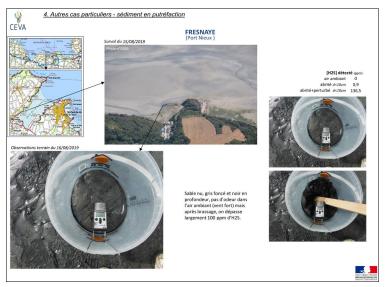




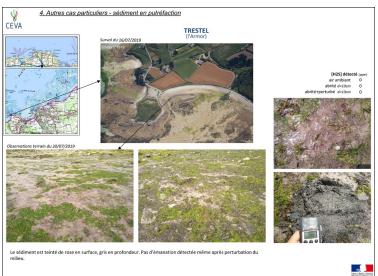


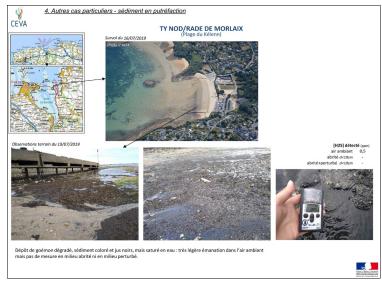








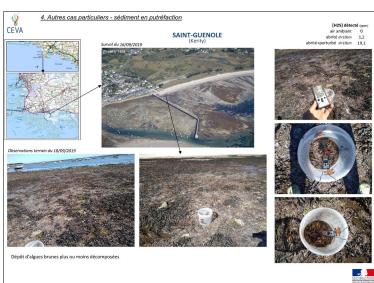


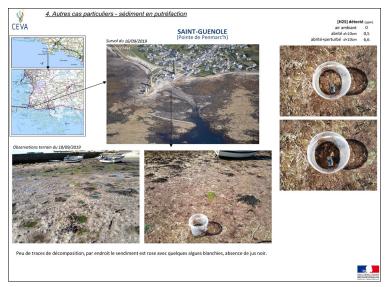




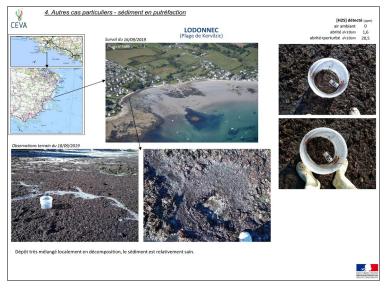


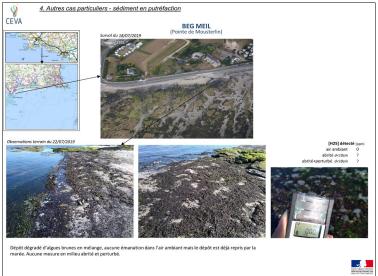


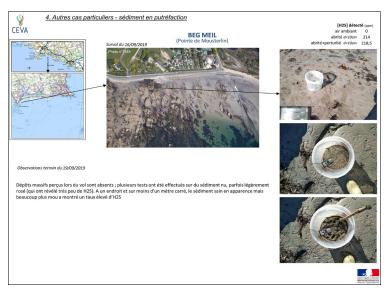


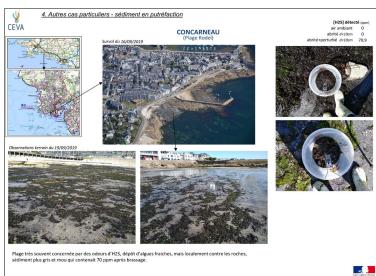


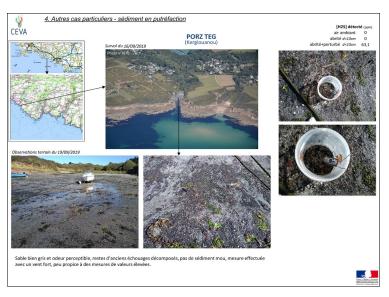






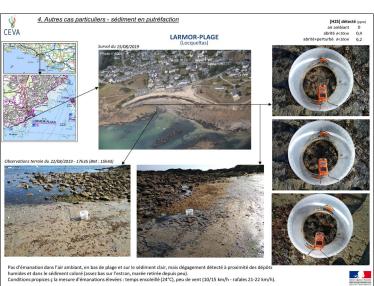


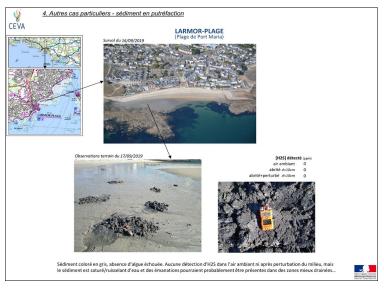








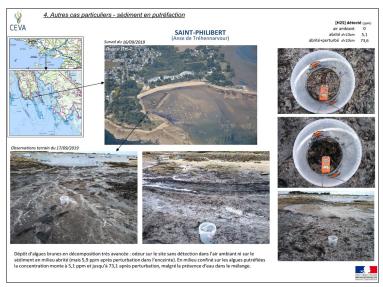




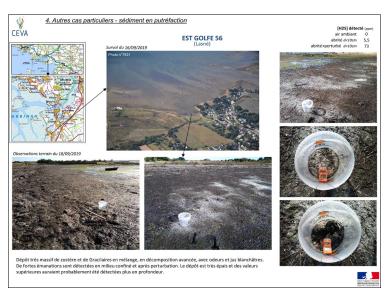








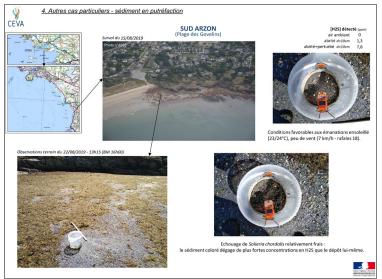


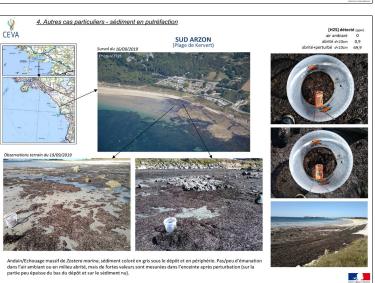




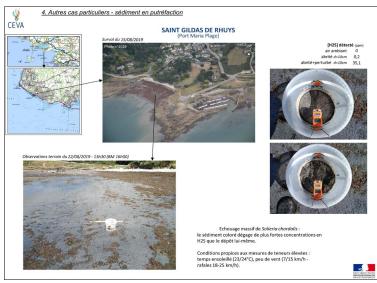




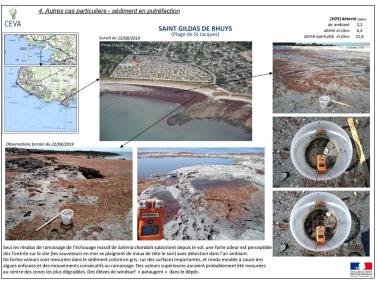






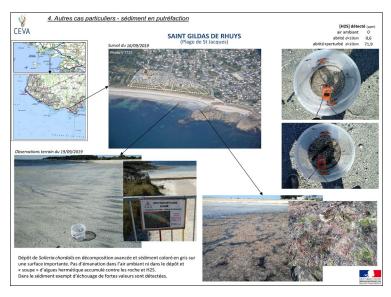




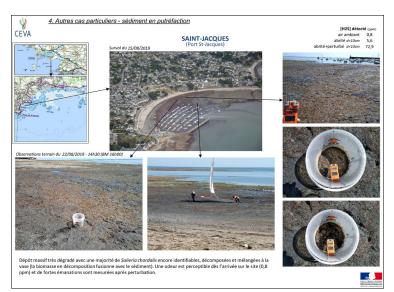




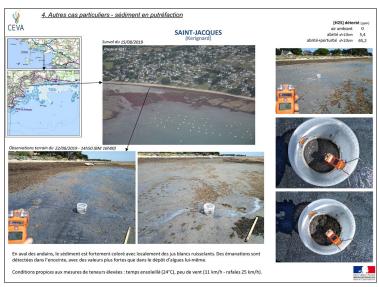


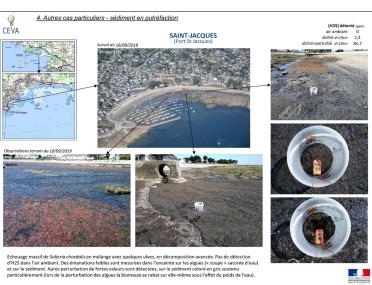


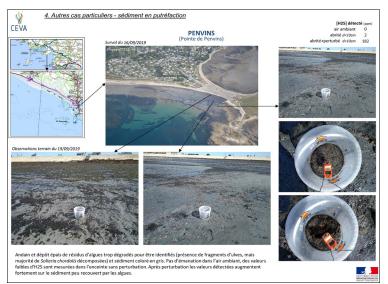




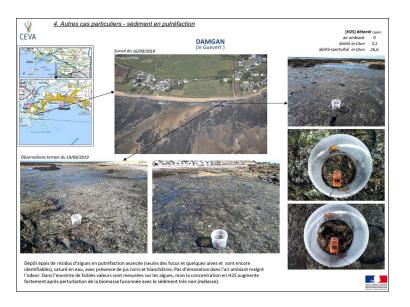












#### Annexe 5:

Test méthodologique de détection automatique des dépôts putréfiant par traitement d'images

#### 1. CONTEXTE

Dans le cadre du projet IZAR, l'analyse des dépôts d'algues putréfiants est réalisée par photo-interprétation des images aériennes acquises le long du littoral pour le suivi des échouages d'ulves. Les précédentes études ont permis d'identifier les sites les plus souvent concernés par des évènements de putréfaction et de définir une typologie des dépôts putréfiants selon 4 classes distinctes :

Cas n°1
Dépôts
Dépôts
Dépôts
Dépôts
Diréfiés et encroutés
Diréfiés

Chaque inventaire constitue plusieurs centaines de photos sur des secteurs plus ou moins vastes. Le dépouillement des images, l'analyse visuelle des dépôts et la caractérisation des zones en putréfaction nécessite un travail lourd et fastidieux et du personnel qualifié et formé pour la reconnaissance des échouages.

L'objectif de ce travail est de tester les méthodes récentes d'analyses et traitements d'images automatisés afin 1/ de présélectionner les photographies aériennes susceptibles de présenter une zone de putréfaction et 2/ délimiter les zones en putréfaction sur les photos sélectionnées selon les 4 classes préalablement définies.

#### 2. METHODOLOGIES

Les photos aériennes sont réalisées à l'aide d'appareils Reflex Nikon d'au moins 20 MPixels et caractérisées par 3 bandes spectrales dans le visible (canaux rouge, vert, bleu). Les conditions météorologiques déterminent les conditions de vol qui auront une influence sur la résolution spatiale (selon l'altitude de vol), l'angle de prise de vue et le contraste de chaque cliché. Ces paramètres diffèrent d'un site à l'autre et d'un inventaire un autre et ont pour conséquence de multiplier les caractéristiques visuelles pour un même type de dépôt.

Une première analyse a été réalisée afin d'extraire les caractéristiques des dépôts putréfiants sur les images en terme de signatures spectrales, texturales et morphologiques à l'aide du logiciel ENVI. Pour cela, la base de données constituée dans l'étude préliminaire à partir des photos aériennes et des polygones digitalisés sur les années 2008, 2009 et 2010 a été utilisée. Les paramètres de textures ont été analysés selon des filtres d'homogénéité, moyenne, variance, contraste, dissimilarité et entropie des valeurs des pixels, sur une fenêtre mobile de 3x3 pixels. Ces caractéristiques pour chaque type de dépôt ont ensuite été intégrées dans des classifications supervisées (SAM – Spectral Angle Mapper, Minimum Distance) et non supervisées (K-Means).

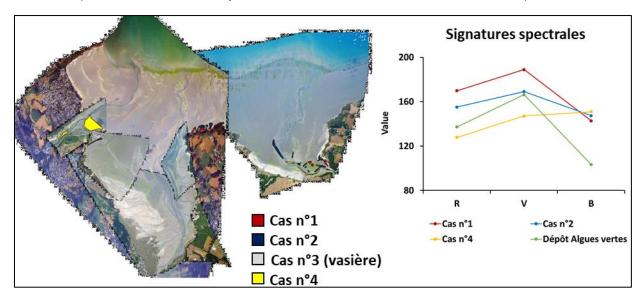
D'autre part, un jeu de données constitué à partir de l'inventaire de septembre 2019 et des digitalisations des zones putréfiantes a été utilisé en tant que base d'apprentissage d'un réseau de neurones (avec une méthode de Deep Learning) pour le repérage et la sélection de photos contenant des cas potentiels de putréfactions. Un test d'apprentissage a été mené à partir d'un extrait d'une trentaine d'images comprenant une centaine de polygones représentant plus de 3,5 millions de pixels à analyser. L'apprentissage du modèle s'est réalisée sur 80 % des données et les 20 % restant ont été utilisés pour la validation du modèle. Le modèle a été entrainé en prenant 20 époques/itérations et 100 lots par époque.

- Une époque/itération correspond à une analyse entière du jeu de données. L'ensemble du jeu de données a donc été analysé 20 fois pour l'apprentissage.
- Le jeu de données global est subdivisé en 100 lots

#### 3. RESULTATS

#### 3.1. Analyse texturale et spectrale

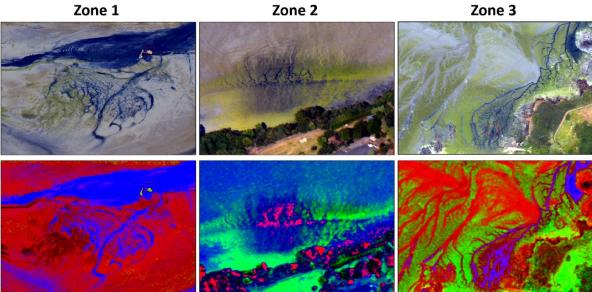
L'analyse spectrale et texturale des différentes typologies de dépôts en putréfaction a montré qu'il est possible, dans certains cas, de distinguer des variations spectrales malgré le nombre réduit de bandes (3 bandes RVB). La figure ci-dessous présente les différents polygones digitalisés sur la baie de Saint-Brieuc pour les inventaires de 2008, 2009 et 2010, ainsi que les variations spectrales moyennes de chacune des 4 classes identifiées (hormis la classe 3 correspondante aux vasières et non aux baies sableuses).



Les formes spectrales les plus proches sont celles des dépôts d'algues vertes (courbe verte) avec le cas n°1 (courbe rouge) qui correspond à des dépôts d'ulves encroutés. La distinction peut se faire notamment par un albédo (ou réflexion) plus élevée pour le cas n°1 de putréfaction car les algues vertes qui se dégradent, se dépigmentent et forment une croute blanchâtre qui reflète davantage la lumière.

Les indices de textures, croisés avec les signatures spectrales des dépôts, permettent d'identifier les zones d'intérêt image par image (figure ci-dessous).



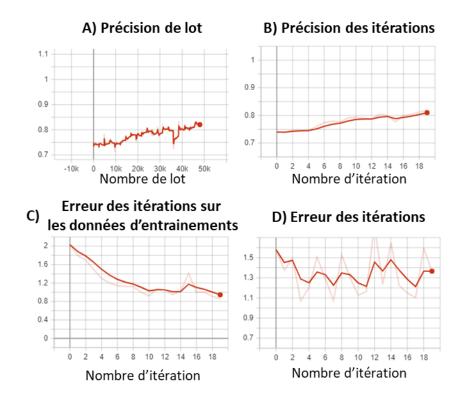


#### 3.2. Analyse Deep Learnig

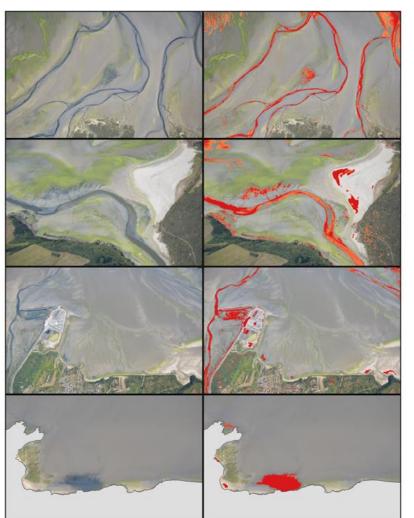
L'extrait du jeu de données de juillet 2019 a permis d'alimenter un 1er modèle d'apprentissage à l'aide d'un réseau de neurones (méthode deep learning). L'évaluation de l'apprentissage peut se traduire par les résultats des statistiques obtenues par lot ou par itération.

Les graphiques **A** et **B** représentent la précision par lot et par itération qui sont croissante et atteignent une valeur d'environ 0.8 (plus la précision se rapproche de 1 et plus le modèle est fiable).

Les graphiques **C** et **D** représentent les erreurs observées lors des itérations réalisées sur les données d'entrainement ou sur les données de validation. Au cours des itérations ces erreurs tendent à diminuer (plus les erreurs se rapprochent de 0 et plus le modèle est fiable).



Le modèle a été appliqué sur des images tests afin d'évaluer la plus forte probabilité d'avoir un échouage putréfiant. Les classes des plus faibles probabilités ont été masquées afin de délimiter les zones probables en putréfaction. Les classifications sont satisfaisantes mais des améliorations sont à apporter pour affiner le modèle d'apprentissage car il existe des faux positifs et des faux négatifs sur les résultats des classifications.



Précision globale : 67 %

Kappa: 0,51

Confusion Putréfaction > Algues vertes : 18 % Confusion Putréfaction > Sédiment : 14 % Confusion Algues vertes > Putréfaction : 2 % Confusion Sédiment > Putréfaction : 3 %

Précision globale: 59 %

Kappa: 0,32

Confusion Putréfaction > Algues vertes : 10 % Confusion Putréfaction > Sédiment : 29 % Confusion Algues vertes > Putréfaction : 5 % Confusion Sédiment > Putréfaction : 13 %

Précision globale : 68 %

Kappa: 0,36

Confusion Putréfaction > Algues vertes : 2 % Confusion Putréfaction > Sédiment : 27 % Confusion Algues vertes > Putréfaction : 7 % Confusion Sédiment > Putréfaction : 3 %

Précision globale : 83 %

Kappa: 0,35

Confusion Putréfaction > Algues vertes : 9 % Confusion Putréfaction > Sédiment : 7 % Confusion Algues vertes > Putréfaction : 0 % Confusion Sédiment > Putréfaction : 11 %

#### 4. **CONCLUSION**

Les méthodes testées dans le cadre de cette action sont encourageantes au vu des résultats obtenus et de la possibilité d'identifier les zones putréfiantes selon leurs caractéristiques spectrales et texturales. Les méthodes de deep learning sont également prometteuses mais nécessitent néanmoins un développement plus conséquent, avec notamment, l'alimentation de la base de données d'apprentissage avec toutes les données récemment analysées (intégration des digitalisations 2017, 2018, 2019 sur plusieurs inventaires). La diversité des exemples de putréfaction qui sera implémentée dans le modèle aura pour conséquence d'améliorer les statistiques de précision et de réduire les erreurs lors de l'apprentissage du modèle. Cela nécessite de fournir un grand nombre de cas possibles pour chacune des catégories en tenant compte également des conditions météorologiques au moment des prises de vues qui modifient la perception des échouages. La sélection des images afin de réduire le nombre de photos à analyser par un opérateur à la suite d'un inventaire aérien, pourra se faire dans un second temps, lorsque le modèle sera en mesure d'identifier les différents types de dépôts avec plus de précision.

#### Annexe 6:

Banques de données exploitées et méthodes déployées pour la cartographie

#### Dépôts d'ulves dans les sites :

Photos aériennes: dans le cadre de ses missions de suivi des algues vertes, le CEVA a acquis des photos aériennes de l'ensemble du littoral breton (« survol quasi exhaustif du littoral » : 4 par an de 2002 à 2006 dans le cadre du programme Prolittoral, 3 par an depuis 2007 dans le cadre du programme de surveillance de la DCE). En complément, afin de mieux suivre les secteurs les plus touchés ou les plus « sensibles » le CEVA photographie 30 sites dits en suivis « renforcés » (sites prédéterminés ; 7 fois par an depuis 2002). Pour plus de détails sur ces suivis, se reporter aux rapports RCS<sup>7</sup> qui décrivent les méthodologies de suivi du littoral. Depuis 2005, toutes les acquisitions photographiques aériennes sont numériques et de ce fait facilement accessibles (photos des années antérieures stockées en format papier, par date d'inventaire et dans l'ordre géographique des prises de vue et très partiellement numérisées).

Les données issues des contrôles de terrain: après chaque survol, le CEVA détermine les sites sur lesquels des contrôles de terrain doivent être entrepris afin de mieux caractériser les dépôts d'algues perçus lors du survol. Est notamment relevée la proportion d'ulves dans l'échouage (sites sableux) ou la présence de tapis d'ulves (sites de vasière), données qui sont utilisées pour classer les sites comme « touchés » par des proliférations ou échouage d'ulves. L'ensemble des relevés de terrain fait l'objet de mise en fiches (photos aériennes, de terrain, description des types d'algues présentes...). Outre ces informations, sont reportées sur les fiches les informations sur les situations de putréfactions rencontrées (et depuis 2009, sont parfois ajoutées des mesures de teneurs en H<sub>2</sub>S des dépôts en putréfaction).

Polygones de dépôt d'ulves ou d'algues vertes: les sites « sableux » classés comme « touchés par des échouages d'ulves » font l'objet de digitalisation des couvertures d'algues vertes (tracé de polygones autour de chaque zone de dépôts d'ulves). Un site « sableux » est classé comme « touché » par des proliférations d'ulves si des quantités anormales d'algues vertes sont détectables par avion et si le contrôle de terrain confirme que ce sont bien des ulves, qu'elles sont libres et représentent visuellement plus d'un tiers de l'échouage. Pour le cas des vasières, depuis 2008 les digitalisations des dépôts d'algues vertes sont réalisées pour l'ensemble des tapis d'algues vertes (ulves en lame ou filamenteuses) des sites « classés pour les ulves ». Sont classés comme touchés par une prolifération d'ulves les sites présentant, au moins localement des tapis continus d'ulves en lame. A partir de 2011, afin d'alléger les suivis, les digitalisations ne concernent plus que 10 Masses d'Eau (définies comme « hors du Bon Etat DCE » en 2010) que les sites soient « classés pour les ulves » ou pas. Pour tous ces inventaires « classiques » de suivi des proliférations, le CEVA digitalise tous les dépôts d'ulves, pour chaque site « classé » comme touché par un échouage d'ulves. Ces échouages n'impliquent pour autant pas forcément des risques d'émanation de H<sub>2</sub>S, les algues fraîches, régulièrement reprises par la marée, n'étant pas émissives. Tous les tracés des polygones d'échouage d'ulves sont stockés sous système d'information géographique depuis le démarrage de ces suivis en 2002 et donc facilement exploitables pour des traitements cartographiques.

#### Dépôts identifiés en état de putréfaction :

<u>Données issues de l'étude 2010</u>: dans le cadre de cette étude, les dépôts putréfiants avaient été photo interprétés à 4 dates sur l'ensemble du littoral (juillet 2008, septembre 2008, juillet 2009, juillet 2010), dates auxquelles avaient été ajoutés des compléments pour intégrer des zones de vasières partiellement couvertes (juin 2008 et août 2009). L'ensemble des polygones issus de cette étude sont disponibles sous format SIG.

Mesures H₂S complémentaires 2019: Dans le cadre du présent programme, des relevés spécifiques ont été entrepris sur des dépôts préalablement repérés lors des survols du littoral (cf. 2.2). Ces mesures ont été centralisées dans une base et exploitées avec les connaissances préalables du Ceva pour réaliser les photo-interprétations des putréfactions sur le littoral.

<u>Tracés 2019 des zones putréfiantes sur les années 2016-2019</u>: Dans le cadre du présent programme ; 5 campagnes aériennes ont été exploitées afin d'identifier les zones touchées par des putréfactions (méthodologie : cf. 2.2). L'ensemble des données qui en est issu a été centralisé dans une base de données SIG disponible ensuite pour les différents traitements.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> Rapports consultables sur le site CEVA https://www.ceva-algues.com/document/etude-et-suivi-des-marees-d-algues-vertes-en-bretagne/

#### Méthode de photo-interprétation des dépôts putréfiants

L'ensemble des photos aériennes prises dans le cadre des suivis des proliférations d'ulves a fait l'objet d'une analyse afin de déterminer les dépôts putréfiants, d'après leur morphologie et la connaissance terrain de « situations types », à cinq périodes d'inventaire différentes : juillet 2016, juillet 2017, juillet 2018, juillet 2019 et septembre 2019 (survols réalisés dans le cadre du réseau de Contrôle de Surveillance DCE sous maîtrise d'ouvrage AELB).

Comme présenté ci-dessus, afin d'améliorer la photo interprétation des situations de putréfaction le CEVA a réalisé des mesures spécifiques de teneurs en H<sub>2</sub>S (cf. paragraphe 2.2.2) suite aux survols de 2019.

Les dates de survol analysées ont été retenues, parmi les 4 dernières années disponibles, pour les inventaires qui semblaient présenter le plus de situations de putréfaction afin de repérer les secteurs les plus soumis à ces phénomènes. Malgré ce choix, nous ne pouvons prétendre au report de l'intégralité des secteurs ayant été soumis à des putréfactions sur ces 4 années, les phénomènes de putréfactions pouvant être ponctuels et limités dans le temps.

Campagne de vol	Dates des vols analysés visuellement	Secteurs analysés
Juillet 2016	19/07/2016	littoral Bretagne Nord
	21/07/2016	littoral Bretagne Sud
Juillet 2017	24/07/2017	littoral Bretagne Sud
	25/07/2017	littoral Bretagne Nord
Juillet 2018	11/07/2018	littoral Bretagne Nord
	12/07/2018	littoral Bretagne Sud
Juillet 2019	16/07/2019	littoral Bretagne Nord
	18/07/2019	littoral Bretagne Sud
Septembre 2019	14/09/2019	littoral Bretagne Nord
	16/09/2019	littoral Bretagne Sud

Afin de faire un état des secteurs présentant des putréfactions, 5 campagnes de vols ont été exploitées par analyse visuelle et photo interprétation des dépôts dont la morphologie conduit à estimer qu'il y a putréfaction donc risque d'émission de H<sub>2</sub>S. L'ensemble des photos brutes acquises lors des vols a donc été passé en revue pour chacune des dates. Les données de contrôle de terrain, quand elles permettent de mieux décrire les dépôts perçus en aérien, ont été systématiquement exploitées pour appuyer les photo-interprétations. Chaque dépôt identifié comme putréfiant est reporté sur Système d'Information Géographique (SIG) à une échelle comprise entre le 1/1 000ème et 1/2 500ème, en décrivant la typologie (base typologie établie en 2010) et la date d'observation. Ces informations sont stockées dans une base de données qui pourra être complétée ultérieurement par d'autres dates d'inventaires.

Lors des survols « généraux » des côtes (en mai, juillet et septembre), l'ensemble du littoral breton est survolé sur 2 journées (à noter que certaines portions du littoral, dont certaines îles et des fonds de ria ne peuvent être survolées ; pour plus de détail, se référer aux rapports RCS qui décrivent les suivis réalisés). Certains vols complémentaires sont réalisés pour étendre les observations notamment aux vasières en fond de ria (suivi spécifique des Masses d'Eau de Transition). Afin de décrire le littoral de la façon la plus exhaustive possible, en complément des survols généraux de juillet 2016, 2017, 2018 et de juillet et septembre 2019, les survols spécifiques ont également été analysés pour déterminer si des dépôts non photographiés dans les survols généraux étaient à ajouter.

## <u>Test méthodologique de détection automatisé des dépôts putréfiants par</u> procédure de traitement d'images

Afin de pouvoir envisager de systématiser les analyses des secteurs en putréfaction, il a été proposé de tester des traitements d'image qui pourraient, au moins sur certains types de dépôts permettre une détection automatique des situations de putréfaction. Deux approches sont envisagées : la détermination par ces traitements d'une sélection de photos sur lesquelles des dépôts putréfiant seraient présents (permettrait d'éviter de passer en revue plusieurs centaines de photos par inventaire et de sortir une liste plus limitée de photos à analyser) ou l'analyse et la cartographie sur une photo donnée des zones concernées par des putréfactions. Une telle approche, en diminuant les temps de traitements par la méthode « classique » de photo-interprétation, pourrait permettre une analyse plus systématiques des photos de survols (allant jusqu'à chaque inventaire de chaque année). Les travaux entrepris font l'objet d'une synthèse en annexe 5.

#### Cartographie des dépôts d'algues vertes et des dépôts putréfiants

Dans le cadre de la présente étude, différentes cartes ont été générées afin de renseigner la localisation des dépôts putréfiants, leur situation par rapport aux dépôts d'algues vertes plus globalement et enfin leur évolution dans le temps et plus spécifiquement entre la première étude (années 2008-2010) et la présente (années 2016-2019).

#### Synthèse interannuelle des dépôts d'algues vertes

La base de données interannuelle des couvertures d'ulves constituée à partir de 2002 intègre les données des suivis d'échouages d'ulves. L'objectif initial de ce suivi est l'évaluation de l'importance des échouages par secteur et la perception de l'évolution dans le temps des surfaces couvertes. Cette base, très riche pour décrire les proliférations, ne renseigne pas de façon fiable et exhaustive sur les phénomènes de putréfaction rencontrés sur le littoral. En effet, dans le cadre de ces suivis, seuls les échouages à forte proportion d'ulves (1/3 des algues de l'échouage minimum, pour les sites de type « plage ») font l'objet de digitalisation. Or, même si les dépôts d'ulves sont les plus fréquemment en cause dans les putréfactions rencontrées, des dépôts d'autres natures, comme cela est décrit dans la section 3.2, peuvent générer également de fortes émanations de gaz H<sub>2</sub>S. Par ailleurs, la plupart des couvertures d'ulves digitalisées sont constituées d'algues vertes fraiches, exemptes de toute émanation d'H<sub>2</sub>S.

La base de données comprenant l'ensemble des digitalisations réalisées de 2010 à 2018 a été analysée afin de connaître les zones d'échouages d'ulves les plus fréquentes, sur les dernières années. Afin d'avoir la même perception pour tous les sites sableux, ne sont traités dans ces cartes que les inventaires « généraux » de mai, juillet et septembre (les inventaires additionnels d'avril, juin, août et octobre ne concernent que les sites en suivi renforcé).

Les limites de dépôts étant, pour chaque date, différentes il n'est pas possible de procéder par simple intersection des polygones. Les traitements réalisés se basent sur la constitution d'un maillage régulier de 75 mètres de côté (soit une surface  $S_m = 0.526$  ha pour chaque maille carrée).

Le traitement est alors réalisé maille par maille. Pour une maille donnée et un inventaire donnée, est comptée la surface de chaque polygone digitalisé incluse dans cette maille (en équivalent 100 % de couverture : un polygone d'une superficie totale d'1 ha et un taux de couverture de  $t_c = 25$  % représente une surface en équivalent 100 % de  $S_{pol.eq100} = S_{pol.tot}$  x  $T_c = 0.25$  ha). Ensuite, est évaluée la proportion p de la maille couverte par le polygone. Si la maille est entièrement incluse dans le polygone (p = 1) on aura alors  $S_{mi} = p \times S_m \times T_c$  soit dans l'exemple précédent (1 ha à 25 % de couverture) = 1 x 0.526 x 0.25 = 0.14 ha alors que si le polygone ne couvre que la moitié de la maille (p=0.5) on aura alors une  $S_{mi} = 0.5 \times 0.526 \times 0.25 = 0.07$  ha.

On détermine ensuite le taux de couverture moyen interannuel T<sub>cinterannuel</sub> de chaque maille : pour une maille

<sup>8</sup> Au moment des traitements, les données de l'année 2019 n'étant pas validées, la chronique 2010-2018 a été utilisée. L'intégration de l'année 2019 ne changerait que très peu la représentation proposée.

donnée les surfaces  $S_{mi}$  de chaque date d'inventaire sont sommées ; la valeur obtenue est ensuite divisée par la surface de la maille  $S_m$  puis par le nombre d'inventaire  $n_i$  (nombre différents suivant les types de sites : les sites sableux bénéficiant de 3 dates d'inventaire annuelles et les vasières ne faisant l'objet de digitalisation que sur la date du maximum annuel).

Le taux de couverture interannuelle pour une maille est alors calculé :  $T_{\text{cinterannuel}} = \frac{\sum_{m} S_{mi}}{S_{mi} n_{i}}$ 

La méthode de calcul permet donc d'intégrer pour toutes les dates renseignées les occurrences des dépôts et les taux de couverture. Il en résulte une carte présentant les taux de couverture moyens interannuels des dépôts d'ulves observés de 2010 à 2018. La lecture de cette première cartographie permet de repérer les secteurs de dépôts les plus récurrents, susceptibles, particulièrement en haut de plage, de causer des nuisances, voire des risques sanitaires.

Pour les secteurs de plage : 3 données annuelles sur tous les sites de 2010 à 2018 (mai, juillet et septembre) ont été exploitées soit 27 inventaires. Pour un site « classé » comme touché par un échouage d'ulves, tous les dépôts d'ulves visibles sur les photos aériennes sont digitalisés, avec estimation du taux de couverture pour chaque polygone.

Pour les sites de vasière : seule une évaluation à la date du maximum annuel apparent est exploitée (une donnée par an, comme préconisé pour le suivi des Masse d'Eau de type « vasière » dans le cadre de la DCE). Pour les secteurs suivis tous les ans (10 Masses d'Eau et environ 30 à 35 « sites ») la compilation réalisée porte donc sur 9 inventaires (certaines vasières ne sont plus suivies depuis 2011, d'autres depuis 2013 ou 2014 ; dans le cas de ces vasières, les couvertures sont calculées sur les années disponibles ; dans le cas des vasières les moins bien suivies, seule l'année 2010 était disponible sur la période 2010-2018). La méthode employée à tendance à surestimer les taux de couverture sur les vasières, ceux-ci étant issus de la mesure du maximum annuel, plutôt que de mesures sur l'ensemble de la saison comme sur les sites « sableux ». Cependant, les dépôts sur les vasières étant relativement peu mobiles et peu fluctuants au cours de la saison, cette représentation est assez conforme à la réalité de la couverture des vasières.

#### Cartes de location des secteurs présentant des putréfactions

Les cartes sont issues de l'analyse (cf. 2.3) des campagnes aériennes de juillet 2016, juillet 2017, juillet 2018, juillet 2019 et septembre 2019.

La localisation des dépôts identifiés comme putréfiants est proposée au travers de cartes détaillées, sectorielles (jeu de 16 cartes). Ces cartes présentent le cumul de toutes les zones identifiées comme en putréfaction sur les 5 dates d'inventaire de 2016 à 2019. La situation reportée n'a donc pas existé à un instant donné.

L'information contenue dans ces 16 cartes sectorielles est synthétisée dans une carte « régionale ». Pour cette carte régionale, afin de conserver une lisibilité suffisante à cette échelle, toutes les zones en putréfaction appartenant à un même type et distant de moins de 800 m ont été fusionnées et représentées par un symbole placé au centre de la zone issue de la fusion.

A noter que certains dépôts identifiés comme putréfiants peuvent être positionnés en dehors des zones de dépôt d'ulves issues de l'exploitation de la base de données interannuelles. Il s'agit de zones en putréfaction dont les dépôts n'ont pas été digitalisés dans la base de données interannuelle car ils ne sont pas constitués d'ulves ou pas en proportion suffisante pour que le site soit « classé » (proportion inférieure à 1/3 des algues présentes dans le dépôt).

#### Carte d'occurrence des dépôts putréfiants sur la période 2008-2019

L'objectif principal de cette étude étant de mettre en évidence les secteurs les plus susceptibles d'être concernés par des putréfactions afin **d'attirer la vigilance sur ces zones « à risque » de putréfaction**, la compilation de l'ensemble des digitalisations de zones en putréfaction a été réalisée. Pour cela, les 4

inventaires de la première étude de 2010 (2008-2010) et les 5 inventaires de la présente étude (2016-2019) ont été exploités afin de calculer « l'occurrence de putréfaction ». L'analyse a été réalisée sur des mailles fines, de 25 m de côté. Pour chaque maille est calculée l'occurrence en tenant compte de la superficie du dépôt en putréfaction dans chaque maille (si une maille est intégralement dans une zone en putréfaction pour chaque date son occurrence sera de 9, mais elle sera de 4.5 si cette maille est concernée un inventaire sur 2 ou alors si c'est uniquement la moitié de la maille qui est couverte lors de chaque inventaire). La localisation des dépôts est proposée à l'échelle sectorielle comme présenté en 4.1 et 4.2 (mêmes emprises géographiques). Ces cartes permettent en plus des cartes du cumul des zones putréfiantes (4.2) de percevoir les zones qui sont le plus souvent concernées, des zones touchées plus épisodiquement. A noter que les 9 inventaires analysés ayant été sélectionnés sur les dates présentant le plus de putréfaction, la situation reportée est donc fortement « maximisée ». Une analyse qui comporterait par exemple une analyse chaque mois sur plusieurs années aboutirait à des occurrences probablement 5 à 10 fois plus basses.