

CENTRE D'ÉTUDE
& DE VALORISATION
DES ALGUES

ALGAE TECHNOLOGY
& INNOVATION
CENTRE


PRÉFET
DE LA RÉGION
BRETAGNE

*Liberté
Égalité
Fraternité*

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

Préambule.....	3
Résumé.....	5
1 Contexte et objectifs	10
2 Cadrage méthodologique.....	12
2.1 Un objectif de cartographie de la dangerosité de certains secteurs	12
2.2 Des mesures de H ₂ S visant à mieux caractériser le potentiel d'émissions des différents types de dépôts putréfiants	12
2.3 Modalités et attendus des mesures de terrain réalisées en 2019	14
2.4 Limites d'utilisation des données	15
3 Caractérisation 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 Taux de couverture interannuel moyen (printemps-été) des échouages d'algues vertes (2010-2018)	27
4.2 Cartes de localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes (2016 à 2019)	28
4.3 Carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction (période estivale) sur la période 2008-2019.....	30
5 Suites à donner.....	32
Glossaire - Définitions.....	33
ANNEXES	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 H₂S) 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 photo-interprétation 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 H₂S ;
- la localisation des échouages d'ulves et des dépôts putréfiants.



Caractérisation des émissions potentielles de sulfure d'hydrogène H₂S

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 « ambient », 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'H₂S.**
- **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.

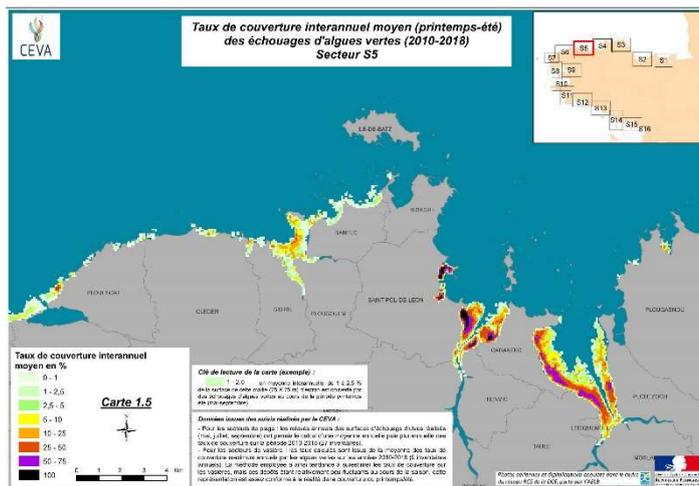


Une localisation des échouages d'ulves et des dépôts putréfiants sur 16 jeux de cartes

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.

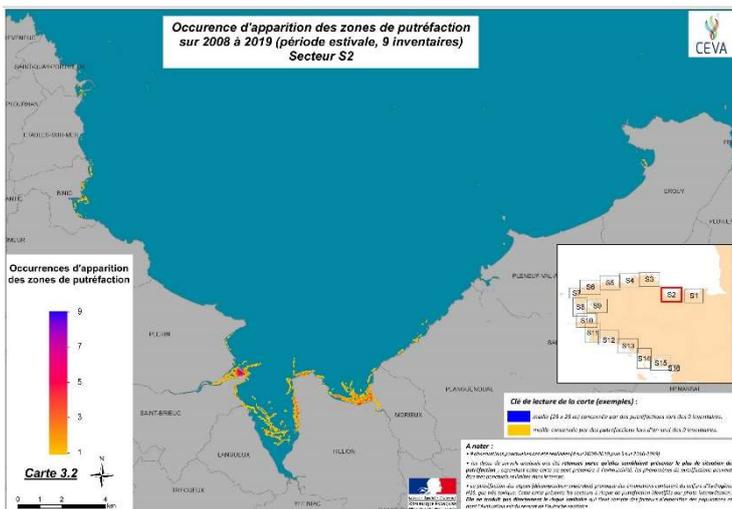
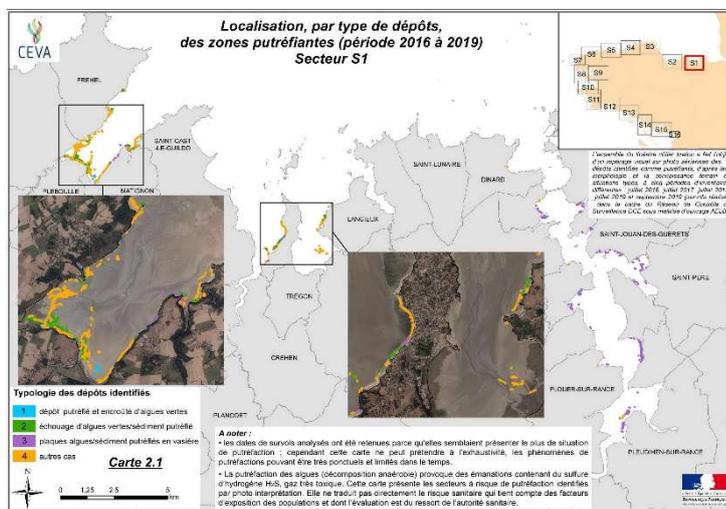
Principaux résultats de l'étude :

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 H₂S, 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 H₂S réalisées *in situ* par le CEVA, dont les opérateurs sont équipés de capteurs H₂S 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 H₂S 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 (H₂S 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 H₂S 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 H₂S 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 H₂S, 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 H₂S, 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 H₂S** associées à ces dépôts (plusieurs dizaines de ppm) afin de valider leur caractère de « 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 H₂S visant à mieux caractériser le potentiel d'émissions des différents types de dépôts putréfiants

Les mesures de H₂S 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 H₂S des dépôts en fonction de leur aspect, les opérateurs de terrain, équipés de capteurs portables à cellule électrochimique H₂S [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 H₂S 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 « ambient », 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 ambient, 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 H₂S, 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 remodelent 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**.

¹ Rapports consultables sur le site CEVA <https://www.ceva-algues.com/document/etude-et-suivi-des-mares-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).

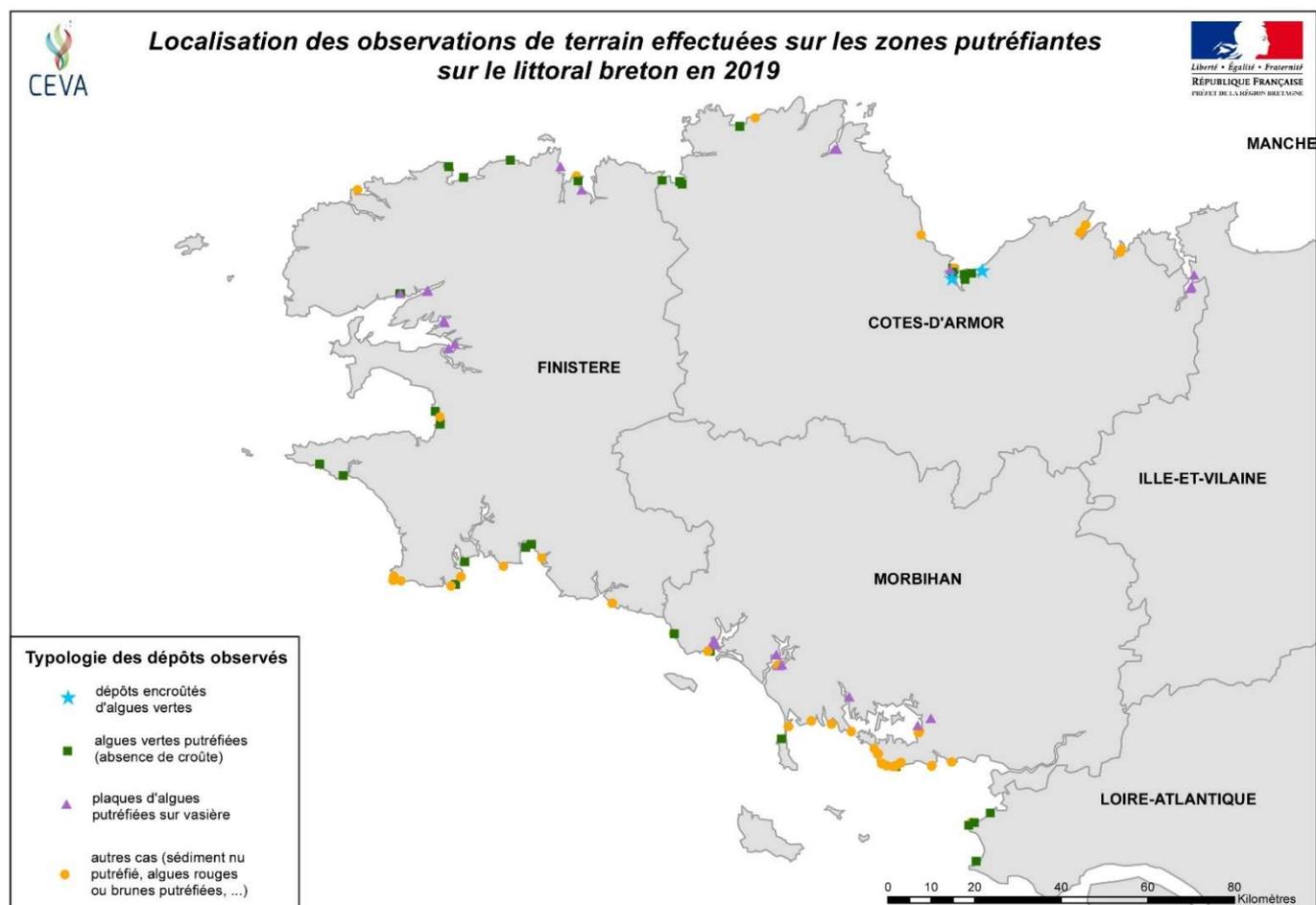


Figure 2 : Localisation des 120 observations de terrain réalisées sur les zones putréfiantes sur le littoral breton en 2019

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 H₂S sur les figures de putréfaction pré-identifiées lors des survols.



a)



b)



c)



d)

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 dans une vasière de la Ria d'Étel 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.



- « Type 0 » : dépôt d'algues fraîches, non putréfiantes

Caractéristiques	Algues vertes fraîches
Lieux d'échouage	Vasières, baies sableuses
Dangerosité potentielle	Nulle : aucune émanation de gaz détectée (0 ppm), y compris en brassant le sédiment
Illustrations des dépôts d'algues fraîches non putréfiantes	 <p data-bbox="1145 568 1458 770">Exemple de dépôt d'algues vertes fraîches sur baie sableuse ; aucune détection d'H₂S, y compris en brassant les algues ou le sédiment</p>  <p data-bbox="533 1191 836 1285">Exemple de vasière présentant un dépôt d'algues vertes fraîches</p>  <p data-bbox="1133 1935 1410 2029">Aucune émanation détectée, y compris en brassant le sédiment</p>



- **Type 1 : dépôts putréfiés et encroûtés d'algues vertes**

Caractéristiques	<p>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).</p> <p>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.</p> <p>Ce premier type de dépôt est caractérisé par :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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). <p>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.</p>
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	<p>Valeurs relevées dans le cadre de cette étude :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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 <p><i>(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).</i></p>
Illustrations des dépôts de Type 1	<p>Exemples de dépôts épais ponctuels relevés en 2019 sur un secteur n'ayant pu faire l'objet de ramassage</p> 



• **Type 2 : échouages d'algues vertes (en proportion importante) ou sédiment, en putréfaction**

Caractéristiques	Ce type d'échouage se caractérise par : <ul style="list-style-type: none">- 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 :<ul style="list-style-type: none">▪ 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 les mesures de H₂S réalisées	Valeurs relevées dans le cadre de cette étude ² : <ul style="list-style-type: none">- air ambiant : min = 0 ; max = 17 ppm- semi-confinement : min = 0 ; max = 76.2 ppm- semi-confinement et brassage : min = 0 ; max > 500 ppm <i>(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).</i>
Illustrations des dépôts de Type 2	   <p>Exemple de dépôts algues vertes + sédiment en putréfaction relevé en 2019</p>

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 H₂S 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 H₂S, 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	<p>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.</p> <p>Ce type de dépôt présente les caractéristiques suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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	<p>Valeurs relevées dans le cadre de cette étude :</p> <ul style="list-style-type: none">- air ambiant : min = 0 ; max = 3 ppm- semi-confinement : min = 0 ; max = 233 ppm- semi-confinement et brassage : min = 0 ; max > 500 ppm <p><i>(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).</i></p>
Illustrations des dépôts de Type 3	<p>Exemple de dépôts algues vertes en putréfaction sur vasière relevé en 2019</p>   



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

Caractéristiques	<p>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.</p> <p>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.</p> <p>Les cas de sédiments putréfiés sont caractérisés par :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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. <p>Un autre cas particulier de dépôt engendrant des émissions de teneurs élevées en H₂S est constitué par des échouages d'algues brunes et/ou rouges en putréfaction. Ces échouages sont identifiables par :</p> <ul style="list-style-type: none">- 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 peut-être 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	<p>Valeurs relevées dans le cadre de cette étude :</p> <ul style="list-style-type: none">- air ambiant : min = 0 ; max = 4.1 ppm- semi-confinement : min = 0 ; max = 214 ppm- semi-confinement et brassage : min = 0 ; max = 345 ppm <p><i>(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).</i></p>



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).

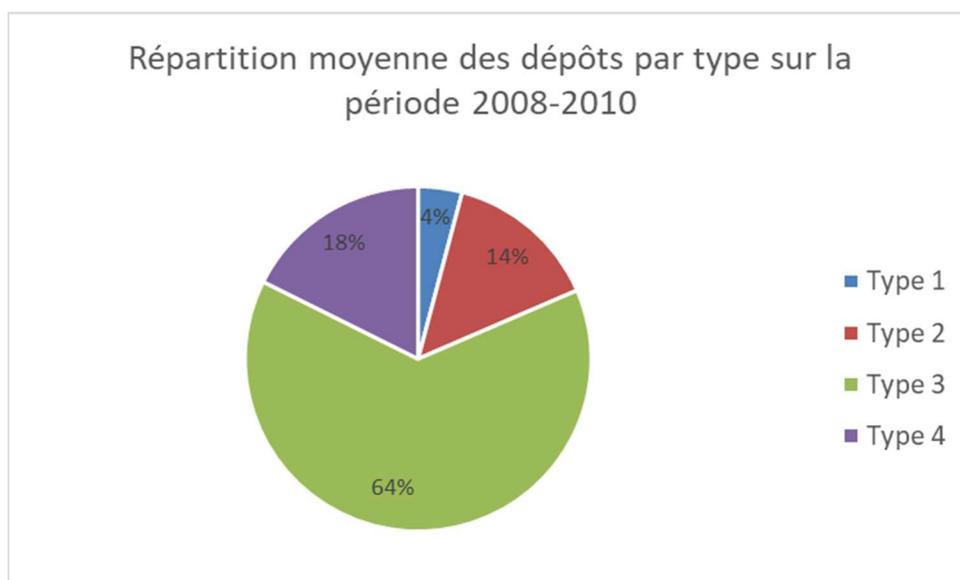
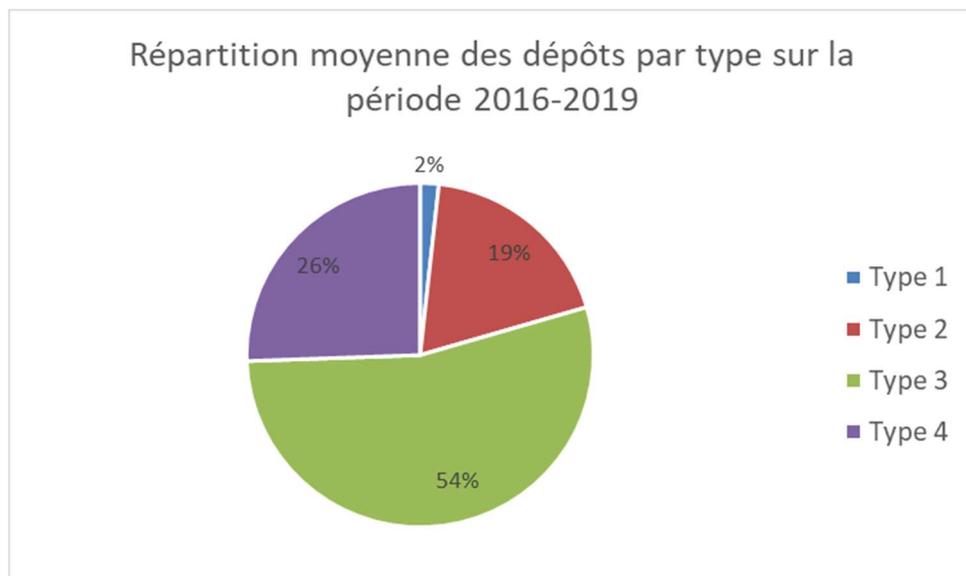


Figure 4 : Répartition des dépôts putréfiants par type sur les périodes 2008-2010 et 2016-2019

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 **surfaces soient sous-estimées 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 H₂S 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 H₂S 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 H₂S 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 H₂S réalisées par type de dépôt putréfiant (en ppm)

Mesure [H ₂ 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 H₂S (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 H₂S 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.

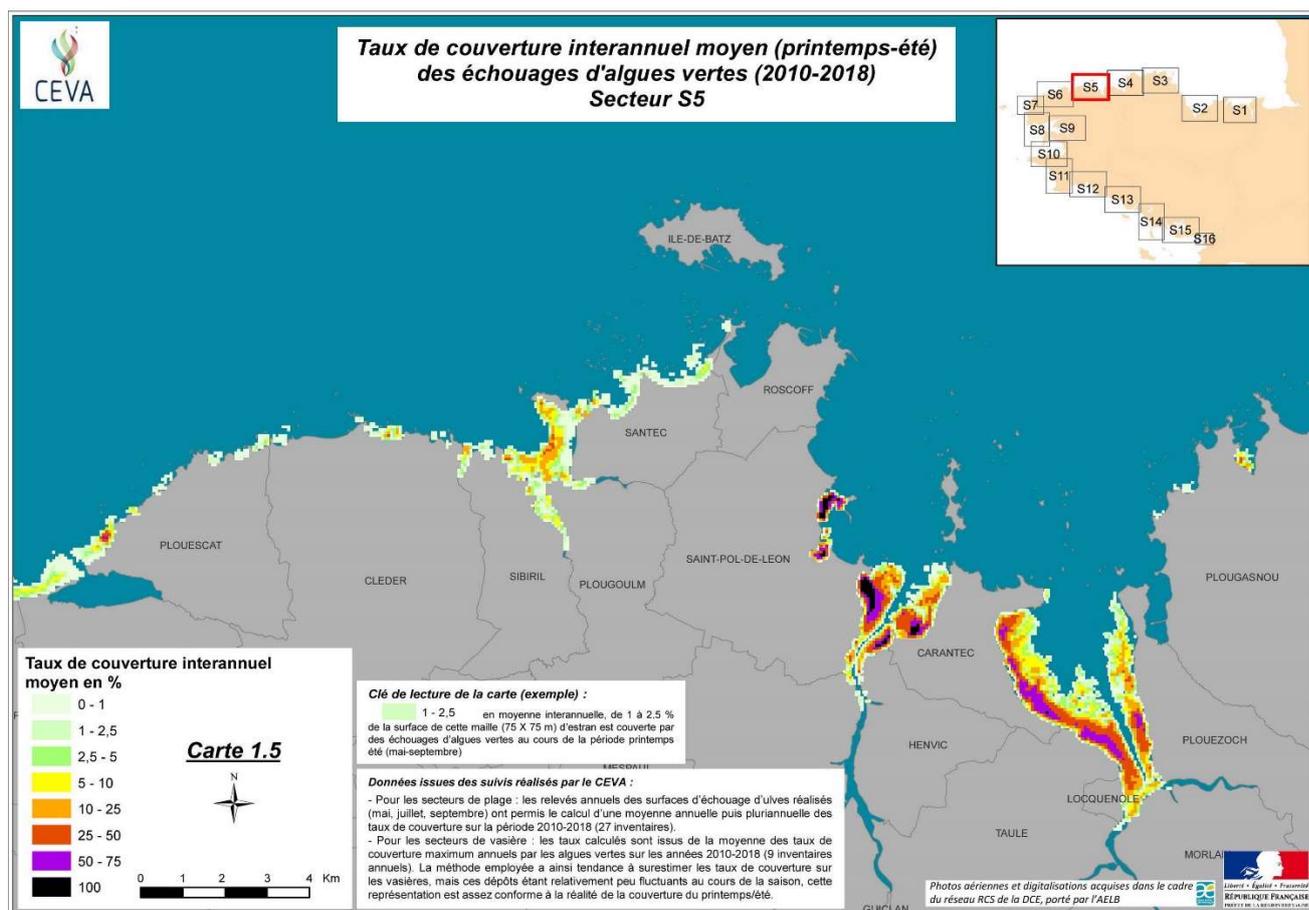


Figure 5 : Carte sectorielle illustrant un taux de couverture interannuel moyen des échouages d'algues vertes sur le secteur S5 (Finistère nord du Diben à Keremma) pour les années 2010 à 2018 (mai, juillet et septembre pour les sites de « plage » et maximum annuel pour les vasières).

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.

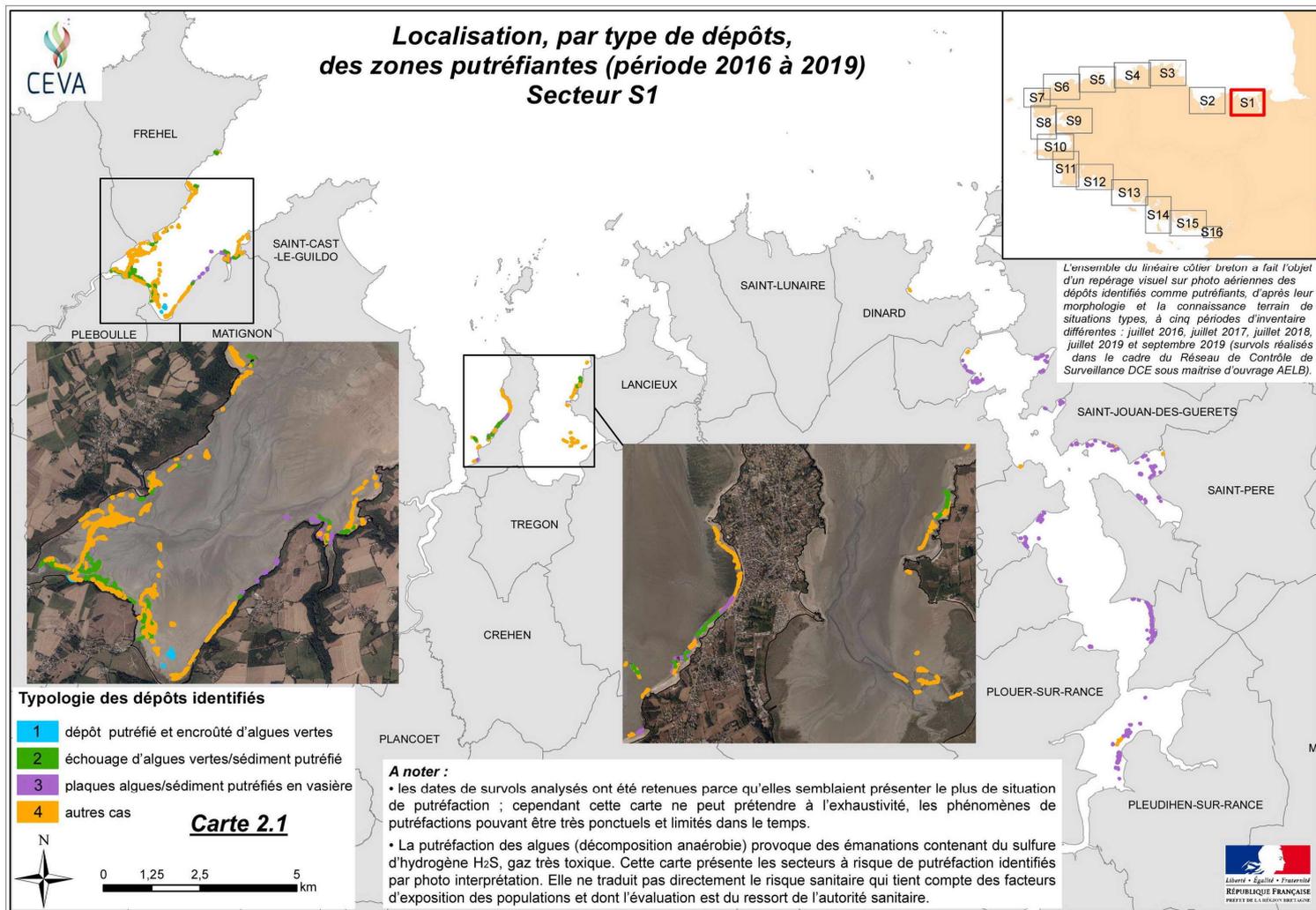


Figure 6 : Exemple de carte sectorielle de la localisation, par type de dépôts, des zones putréfiantes entre 2016 et 2019 : secteur S1 (Est des Côtes d'Armor et Rance).

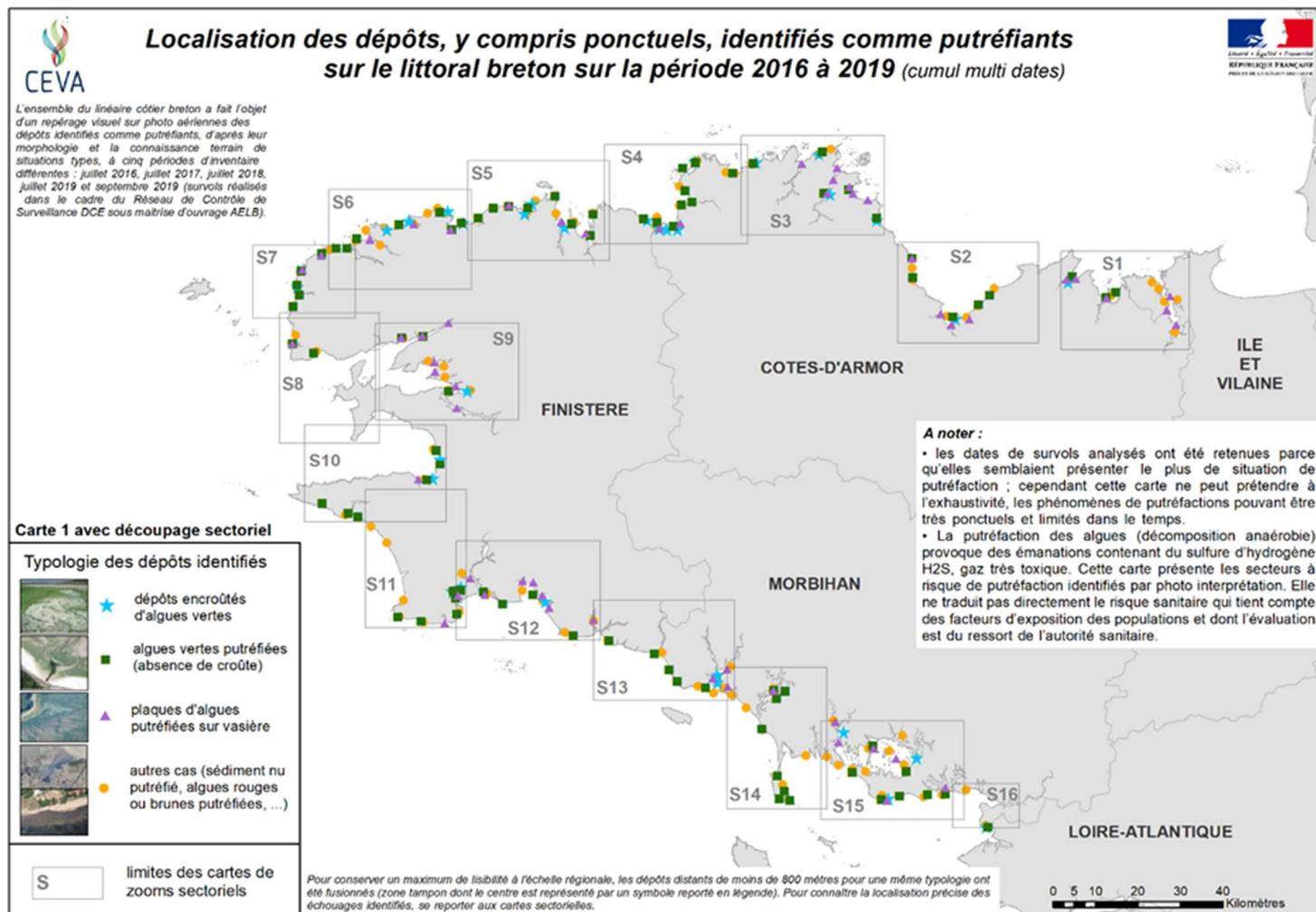


Figure 7 : Carte régionale de la localisation des zones putréfiantes sur le littoral breton entre 2016 et 2019 (cumul des sites de localisation). Les encarts S1 à S16 correspondent aux cartes sectorielles générées et disponibles en annexe 3.

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.

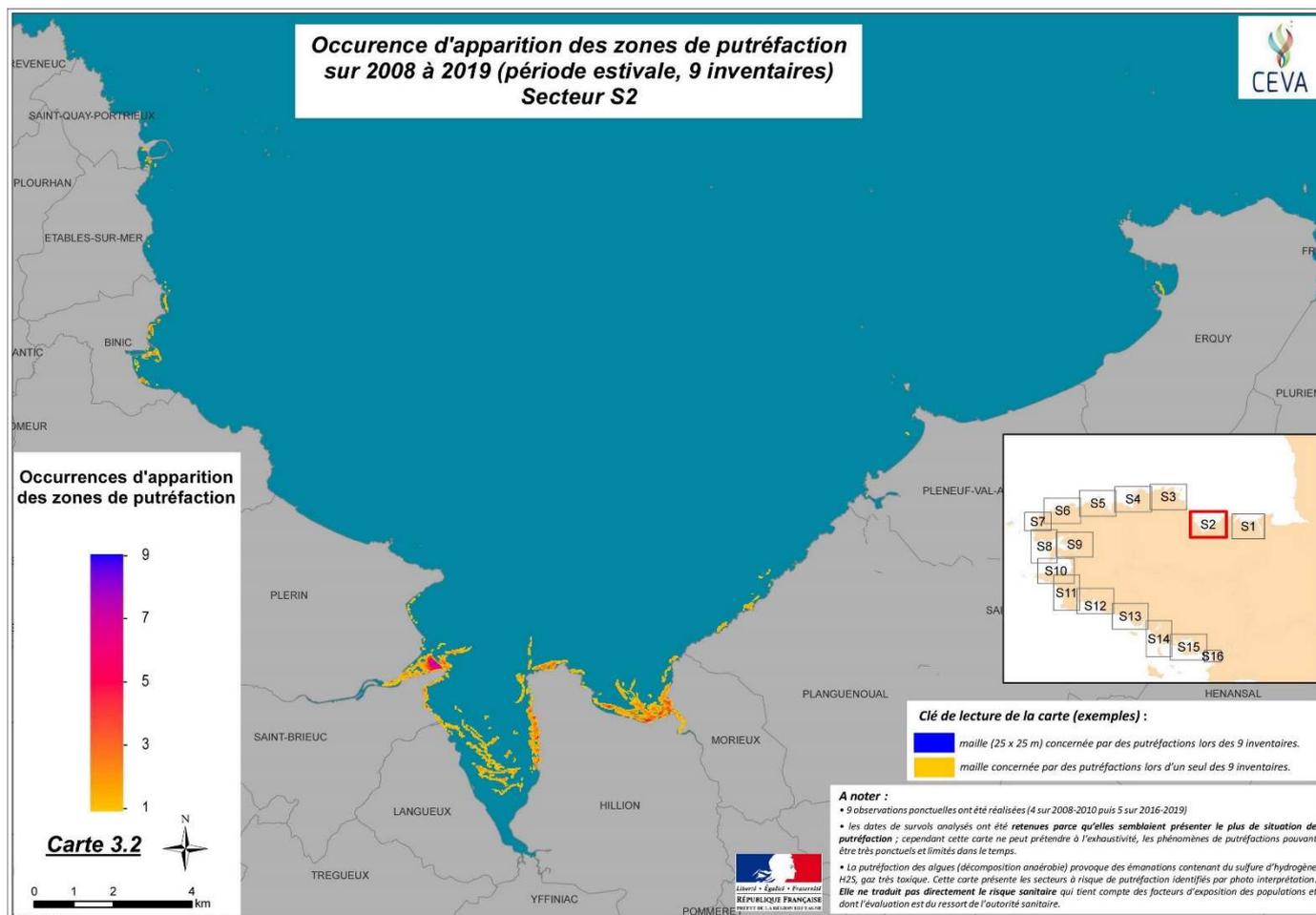


Figure 8 : Exemple de carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction établie à partir de données d'inventaires de la période 2008 à 2019 : secteur S2 du centre des côtes d'Armor (Erquy à Saint Quay Portrieux).

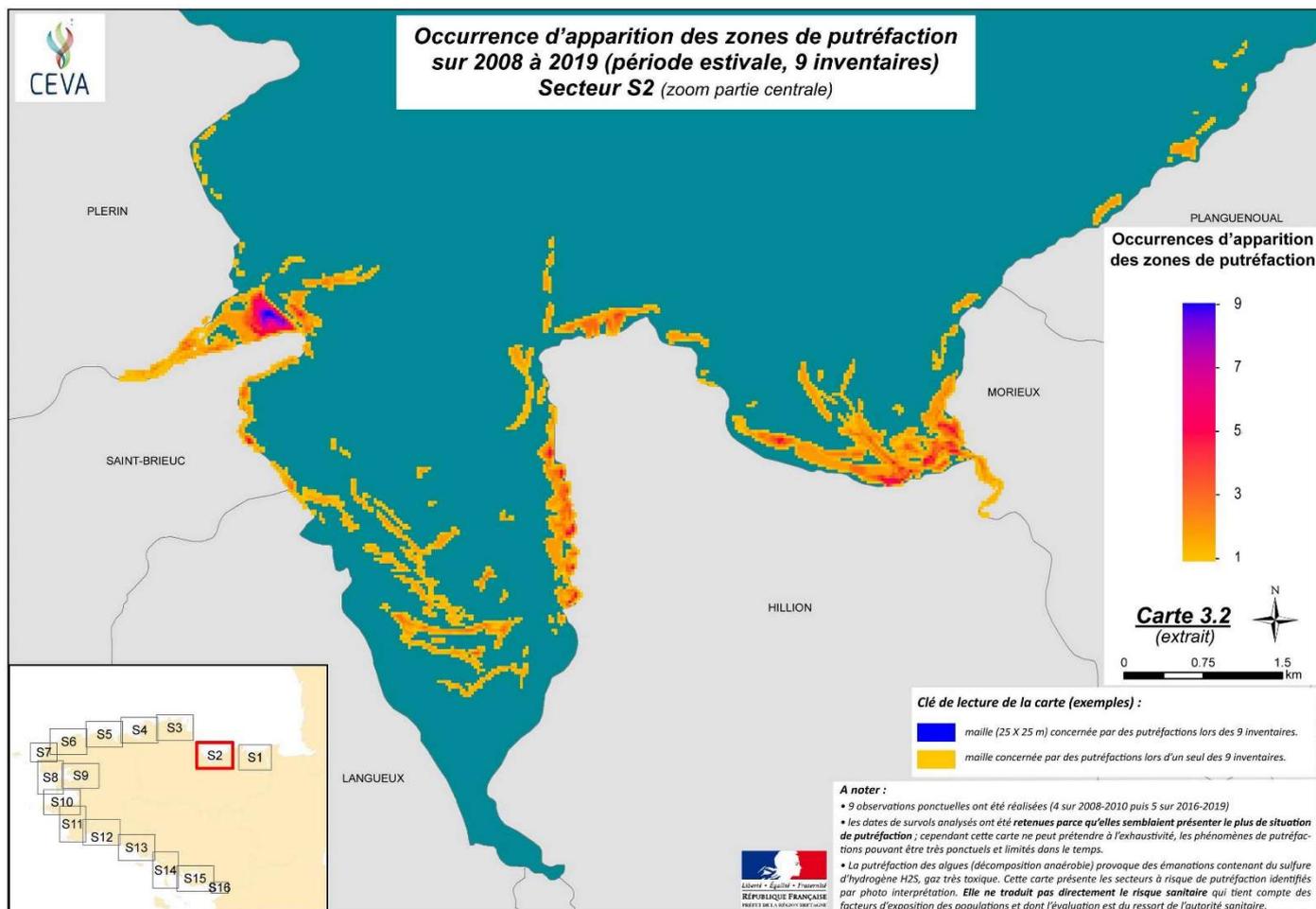


Figure 9 : Exemple de carte d'occurrence d'apparition des zones de putréfaction établie à partir de données d'inventaires de la période 2008 à 2019 : détail du secteur S2 (fond de baie de Saint Brieuc).



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 H₂S 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 vertes³ : 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 H₂S). La pré-existence de soufre dans le milieu est favorable à la production d'H₂S : la production en H₂S 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).

Eutrophisation¹ : 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 H₂S (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 côtières⁵.

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

⁵ 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	16
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 :.....	17
Figure 4 : Répartition des dépôts putréfiants par type sur les périodes 2008-2010 et 2016-2019.....	24
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).	27
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).....	28
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.....	29
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).	30
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 Briec).	31

Liste des tableaux

Tableau 1 : Synthèse des mesures de concentration en H ₂ 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 ⁻³ (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 ⁻³ (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 ⁻³ (200 ppm)	> 10 minutes	symptômes neurologiques : céphalées, vertiges, nystagmus, désorientation, troubles de la coordination, nausées, vomissements, asthénie intense
dès 350 mg.m ⁻³ (250 ppm)	-	œdème pulmonaire lésionnel de survenue retardée (dans 4 à 16 % des cas)
dès 700 mg.m ⁻³ (500 ppm)	plusieurs minutes d'exposition	- signes neurologiques constants avec possibilité de coma - troubles cardiovasculaires : hypotension, tachycardie, troubles du rythme cardiaque, ischémie du myocarde...
dès 1 400 mg.m ⁻³ (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)