

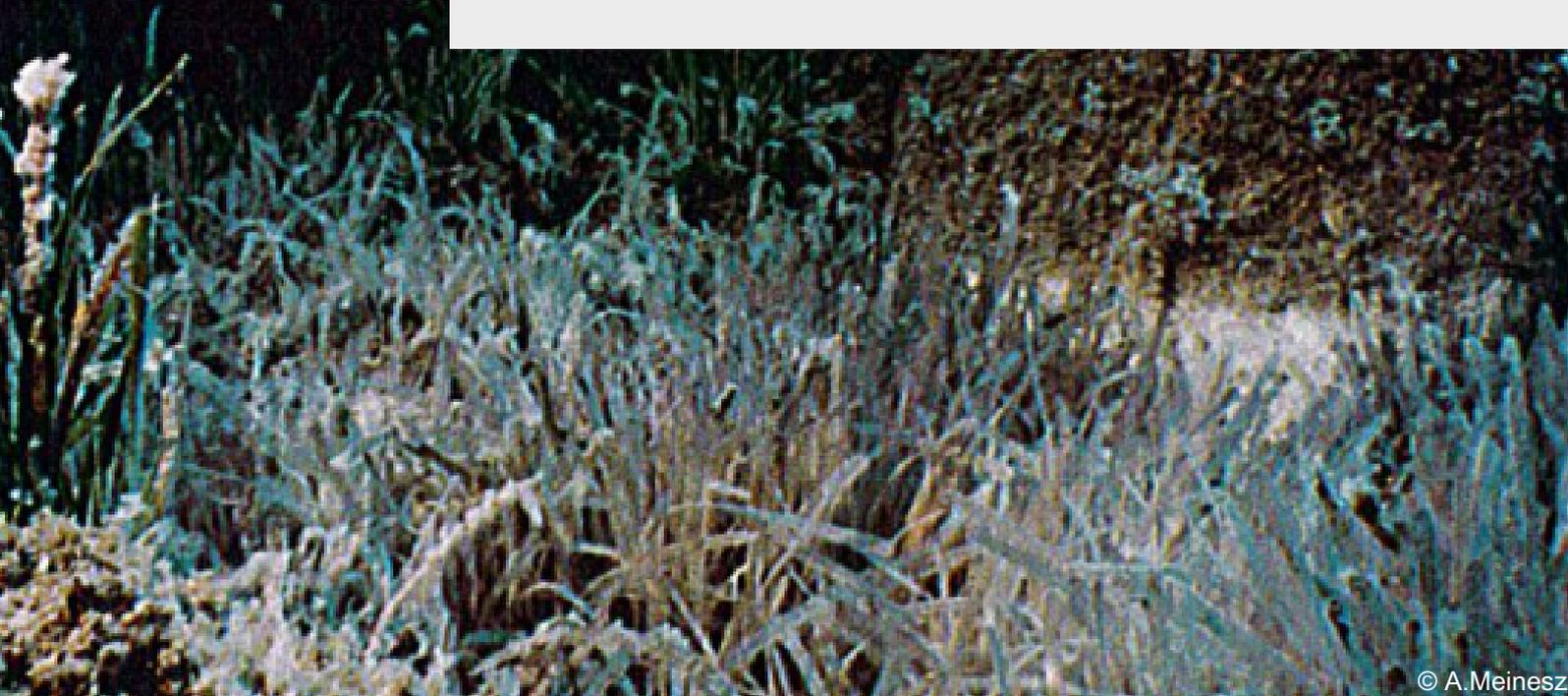


FACULTÉ DES SCIENCES
DE MONTPELLIER



Impact des pollutions alimentaires
accidentelles sur les écosystèmes
marins et propositions de
restauration de l'herbier *Posidonia
oceanica*: le cas du Fénès en 1996
dans la réserve des Bouches de
Bonifacio (Corse du sud)

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER
ANNÉE 2023



© A.Meinesz

Mémoire de Diplôme d'Université « Restauration écologique des petits
fonds marins côtiers »

Rédigé par : Juliette Roche

Sous la tutelle de : Gwenaëlle Delaruelle

Résumé

Le naufrage du Fénès il y a plus de 25 ans a eu un impact significatif sur les écosystèmes marins de la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio, en particulier sur l'herbier de posidonie. Les conséquences de cet accident sur l'environnement ont été étudiées pour évaluer l'ampleur des dommages. Ce mémoire se concentre sur les impacts du naufrage du Fénès sur les écosystèmes marins de la réserve, en mettant l'accent sur l'herbier de posidonie. Il examine également les mesures de dépollution et de réhabilitation qui ont été entreprises à l'époque pour atténuer les dommages.

La question de savoir quelles mesures de restauration supplémentaires pourraient être envisagées aujourd'hui pour restaurer de manière optimale les écosystèmes marins impactés par le naufrage du Fénès. Il met ainsi en évidence l'importance d'apprendre des événements passés pour améliorer la prévention des accidents maritimes et la gestion des crises, tout en préservant la biodiversité et la santé des écosystèmes marins.

The sinking of the Fénès more than 25 years ago had a significant impact on the marine ecosystems of the Bouches de Bonifacio Nature Reserve, in particular on the Posidonia meadow. The consequences of this accident on the environment were studied to determine the extent of the damage. This report focuses on the impacts of the Fénès shipwreck on the marine ecosystems of the reserve, with an emphasis on the Posidonia meadow. It also examines the restoration and rehabilitation measures that were initiated at the time to minimize the damage.

The question of what additional restoration measures could be considered today to optimally restore the marine ecosystems impacted by the sinking of the Fenes. It highlights the need to learn from past events to improve maritime accident prevention and crisis management, while preserving the biodiversity and well-being of marine ecosystems.

Sommaire

Introduction	1
Objectifs	2
I- Impact des pollutions accidentelles de naufrages sur les écosystèmes marins: éléments de contextes.....	2
I.1 Synthèse sur la pollution alimentaire des fonds marins dans le contexte actuel de la globalisation des échanges à l'échelle mondiale.....	2
I.1.1. Le rôle de la mondialisation dans la vulnérabilité de la navigation marine.....	2
I.1.2 Typologie des pollutions accidentelles marines.....	3
I.1.3 Recensement des accidents de pollution marine.....	3
I.2 Le naufrage du cargo Fénès dans une zone réglementée et protégée corse.....	3
I.2.1 Les Bouches de Bonifacio, un espace de protection transnationale de l'environnement dans un détroit international.....	3
I.2.2 Le rôle de protection de la réserve des Bouches de Bonifacio et ses réglementations.....	4
II- Le cas du Fénès: la gestion d'une crise pollution alimentaire au blé sur une réserve....	5
II. 1 Chronologie et gestion de crise du naufrage : étude des étapes et des décisions prises.....	5
II.1.1. Le naufrage et les prémices des répercussions suite à l'échouage.....	5
II.1.2 L'intervention du CEDRE : proposition de récupération du blé.....	9
II.1.3. Les complications de l'échouage soulignent l'urgence de la situation.....	10
I. 2 Mise en place d'un projet de gestion de la pollution alimentaire accidentelle : Atténuer l'impact de l'accident sur l'environnement marin.....	11
II.2.1. Les acteurs en jeu pour concevoir un projet de dépollution sans précédents auquel se référer.....	11
II.2.2. Les travaux de pompage du blé.....	11
II.2.3. Difficultés rencontrées lors des travaux de retrait du blé.....	13
II.3 Suivis des impacts de la pollution suite au naufrage du Fénès sur les écosystèmes marins.....	15
II.3.1 Acteurs impliqués et temporalité des suivis environnementaux.....	15
II.3.2 Suivis à court terme.....;	15
II.3.3. Suivi à moyen terme.....	16
II.3.4 Suivi à long terme.....	19

III. Potentiel de restauration d'un habitat prioritaire suite au naufrage du Fénès : l'herbier de posidonie.....	21
III. 1 Recolonisation naturelle de l'herbier de posidonie.....	21
III.1.1 Arrêt des pressions, la réapparition naturelle de <i>Posidonia oceanica</i> sur le site du naufrage.....	21
III.1.2 Une tentative de restauration écologique expérimentale sur le site du naufrage.....	21
III.2 Vers une restauration de l'herbier <i>Posidonia oceanica</i>	22
III.2.1 Objectifs d'un éventuel projet de restauration des herbiers sur le site du naufrage..	22
III.2.2 Localisation et périmètre du projet de restauration.....	23
III.2.3 Analyse du sédiment.....	23
III.2.4 Techniques de transplantation.....	23
III.2.5 Proposition de suivi scientifique.....	24
III.2.6 estimation d'un budget.....	25
III.2.7 Les acteurs concernés.....	25
III.3. Perspectives : des contraintes et réticences au projet.....	25
Conclusion.....	27
Bibliographie:.....	28
Sitographie.....	29

Table des illustrations

Figure 1 : Photographie du Fénès 26/09/1996	1
Figure 2 : Localisation de la réserve naturelle des Bouches de Bonifacio	2
Figure 3 : Schéma de la localisation des fuites de gasoil et de grain du navire Fénès.....	7
Figure 4 : Photographie situation du blé octobre 1996	8
Figure 5 : schéma risque de fracture du Fénès 26/09/1996.....	9
Figure 6 : Photographie du 25/10/1996, Arrière du Fénès.....	10
Figure 7 : Carte de chantier.....	12
Figure 8 : Photographie pompage du blé du Fénès zone I	12
Figure 9 : Photographies extrait des travaux de pompage.....	13
Figure 10 : Photographie A. Meinesz 25/10/1996.....	14
Figure 11 : Photographies du retrait du château arrière du Fénès 3 mai 1997.....	14
Figure 12 : Photographie épave disloquée du Fénès mission du 2 au 6 avril 1997	15
Figure 13 : Photographie de l'herbier mort 31/05/1996.....	16
Figure 14 : Cartographie de synthèse du secteur d'échouage. Identification de la zone A.....	17
Figure 15 : Cartographie spécifique des zones d'étude I et III. Identification de la zone B.....	18
Figure 16 : Cartographie de la biocénose du secteur d'échouage.....	19
Figure 17 : Zones d'études - Zone I et Zone III.....	20
Figure 18 : Illustrations de la zone I – partie nord.....	22
Figure 19 : Photographie : A. Meinesz, 1/05/1997 <i>Pinna Nobilis</i>	26
Figure 20 : Photographie A. Meinesz, 1/05/1997 Gorgone.....	26

Tableaux

Tableau 1: Déroulé des évènements suite au naufrage du Fénès.....	6
-------------------------------------------------------------------	---

Introduction

Dans la nuit du 25 septembre 1996, le cargo Fénès, un céréalier de 86 m de long et 12,4 m de large, arborant le pavillon panaméen, était en transit dans les eaux territoriales corses lorsqu'il a heurté un récif à cause de conditions météorologiques difficiles. Son naufrage est survenu dans les Bouches de Bonifacio (Corse, France), près des îles Lavezzi, dans une zone protégée et classée réserve naturelle depuis 1982.

En déversant 2 650 tonnes de blé dans la réserve, et notamment sur l'herbier de posidonie, ce naufrage a eu des conséquences tragiques pour l'environnement marin. En effet, les produits pétroliers et la cargaison de denrées alimentaires répandus lors du naufrage, ainsi que la destruction de la coque du navire, ont entraîné une pollution du milieu avec des effets à long terme sur la biodiversité et la santé des écosystèmes. Cette réserve est connue pour abriter les écosystèmes parmi les plus riches et les plus diversifiés de la Méditerranée, dont un écosystème endémique, l'herbier de Posidonie. La posidonie a des rôles écologiques importants (Campagne et al., 2015) comme par exemple la production de matière première et de nourriture, son rôle d'habitat, de frayère et de nurserie pour 25 % des espèces marines, la protection du littoral contre l'érosion, la production d'oxygène, la séquestration du carbone, puisqu'elle capte 10 % du carbone de l'eau et ralentit les effets du changement climatique, la fixation des fonds meubles et la limitation de la turbidité, ... De ces rôles écologiques découlent une quantité de services dont les hommes bénéficient sur le maintien de la pêche, du tourisme, des loisirs, de l'éducation et de la recherche par exemple. Cet événement a suscité une prise de conscience accrue de la nécessité de protéger les zones maritimes sensibles et de renforcer les mesures de prévention des accidents et de gestion des crises pour préserver la biodiversité et la santé des écosystèmes marins.

Ce mémoire intitulé "Impact des pollutions alimentaires accidentelles sur les écosystèmes marins et propositions de restauration de l'herbier *Posidonia oceanica*: le cas du Fénès en 1996 dans la réserve des Bouches de Bonifacio (Corse du sud)" est le fruit d'un entretien avec Alexandre Meinesz (professeur de biologie à l'université de Nice Sophia Antipolis et également président du Comité scientifique de la Réserve naturelle des Lavezzi-Cerbicale et membre du comité de pilotage du projet de Parc Marin international des Bouches de Bonifacio lors du naufrage du Fénès) et d'une synthèse bibliographique réalisée à partir de dix-sept documents fournis par Jean-Michel Culioli, chef du service Espaces Protégés de l'Office de l'Environnement de la Corse et membre du conseil scientifique référent présent lors du naufrage. Ces documents sont d'une grande importance car ils apportent des informations essentielles à la compréhension des enjeux du naufrage du Fénès en 1996. En effet, presque aucune information sur ce naufrage n'est disponible sur Internet, ce qui rend l'apport de ces documents d'autant plus précieux. Leur synthèse permet ainsi de mieux comprendre les impacts de la pollution alimentaire accidentelle sur les écosystèmes marins et de proposer des solutions pour la restauration des habitats impactés.



Figure 1 : Photographie du Fénès 26/09/1996 © J.M Cottalorda

Objectifs

Le naufrage du Fénès s'est déroulé il y a plus de 25 ans sur un vaste herbier de posidonie, dans une zone marine protégée. Dans quelle mesure le naufrage du Fénès en 1996 a-t-il impacté les écosystèmes marins de la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio et notamment l'herbier de posidonie ? Comment les mesures de restauration et de réhabilitation ont-elles été mises en place pour minimiser les dommages environnementaux causés par l'accident ? Avec le recul, quelles mesures de restauration auraient-elles pu être mises en place aujourd'hui ?

Pour y répondre, nous examinerons dans un premier temps les divers types de pollution accidentelle des fonds marins. Nous analyserons leur origine et leur fréquence afin d'illustrer l'impact important de cette pression sur la biodiversité marine.

Dans une deuxième partie, nous nous concentrerons sur une étude de cas spécifique : le naufrage du Fénès. Nous analyserons les conséquences écologiques de cet événement et observerons l'évolution de la situation dans les années qui ont suivi, tout en évaluant les mesures de restauration et de réhabilitation entreprises pour minimiser les dommages environnementaux causés par cet accident. Cette section est fondée sur une synthèse bibliographique fournie par J.M. Culioli ainsi qu'un entretien avec Alexandre Meinez.

Pour conclure, nous proposerons une solution technique et opérationnelle de restauration écologique de l'herbier de posidonie sur le site du naufrage. Nous listerons succinctement quelques techniques existantes de restauration de l'herbier de posidonie, en évaluant leur efficacité et leur faisabilité sur notre zone d'étude. Enfin, nous formulerons des recommandations pour améliorer les pratiques de restauration et aider à restaurer les herbiers de posidonie affectés par le naufrage.

I- Impact des pollutions accidentelles de naufrages sur les écosystèmes marins : éléments de contextes.

I.1 Synthèse sur la pollution alimentaire des fonds marins dans le contexte actuel de la globalisation des échanges à l'échelle mondiale.

I.1.1. Le rôle de la mondialisation dans la vulnérabilité de la navigation marine

La mondialisation a considérablement augmenté les échanges commerciaux entre les pays, provoquant une augmentation de la fréquence des navires dans les eaux du monde entier avec le transport de plus de 10 milliards de tonnes de marchandises solides et liquides à travers les mers du monde par an (1). Malheureusement, cela a également entraîné une augmentation du nombre d'accidents, y compris des naufrages, qui peuvent avoir des conséquences désastreuses pour les écosystèmes marins et les populations locales. Les accidents de navires peuvent avoir de multiples causes cependant, la concentration accrue de navires dans certaines zones maritimes peut également jouer un rôle important en augmentant les risques de collision et d'impact sur les écosystèmes. De plus, le développement des échanges commerciaux a également conduit à un accroissement du volume et de la diversité des cargaisons transportées par les navires, ce qui peut étendre le risque de pollution en cas d'accident. Par exemple, un naufrage de navires transportant des produits chimiques peut entraîner une pollution chimique importante des eaux et des écosystèmes marins. La mondialisation a ainsi contribué à l'accroissement des risques d'accidents de navires, y compris des naufrages, et a également augmenté la portée et l'impact des conséquences pour les écosystèmes marins.

(1) Walker, T., Adebambo, O., Del, M., Feijoo, A., Elhaimer, E., Hossain, T., Johnston Edwards, S., Morrison, C., Romo, J., Sharma, N., Taylor, S., Zomorodi, S., 2018. Environmental Effects of Marine Transportation

I.1.2 Typologie des pollutions accidentelles marines

Les principales pollutions pouvant survenir suite au naufrage d'un cargo transportant des produits alimentaires sont les suivantes :

1. **Pollution par les hydrocarbures** : Si le cargo contient des produits pétroliers en plus des denrées alimentaires, le naufrage peut entraîner une fuite d'hydrocarbures qui contaminera les eaux et les écosystèmes marins. Les hydrocarbures sont des substances toxiques pour les organismes marins et peuvent avoir des effets néfastes à long terme sur les écosystèmes.
2. **Pollution par les produits alimentaires eux-mêmes** : Si un navire cargo transporte des produits alimentaires tels que des céréales, des huiles alimentaires ou même des fruits, il est possible que ces denrées se déversent dans l'eau et contaminent les écosystèmes marins, dégradant ainsi la qualité de l'eau et du substrat. La matière organique déversée peut se décomposer et consommer de l'oxygène, ce qui peut causer une mauvaise qualité de l'eau et de l'anoxie, un manque d'oxygène, qui peut affecter la survie des organismes marins.
3. **Pollution par les produits chimiques** : Les cargos transportant des produits alimentaires peuvent également contenir des produits chimiques tels que des pesticides ou des fertilisants, qui peuvent contaminer les écosystèmes marins en cas de naufrage.
4. **Pollution par les débris** : Les naufrages de cargos peuvent entraîner la dispersion de débris dans l'eau, tels que des morceaux de coque ou de la cargaison. Ces débris peuvent endommager les écosystèmes marins en perturbant les habitats naturels des organismes marins et en créant des risques pour la navigation (2).

I.1.3 Recensement des accidents de pollution marine

Le CEDRE (le centre de Documentation, de Recherche et d'Expérimentations sur les pollutions accidentelles des eaux) est une organisation française qui aide en cas de pollution marine. Elle fournit des données sur les accidents et les incidents les plus significatifs qui ont provoqué des pollutions réelles ou des menaces de pollution le long des côtes françaises. Seuls 28 accidents de transports de matières autres que les hydrocarbures ont été recensés en Méditerranée depuis quarante ans (de 1970 à 2010) (3). Des incidents de ce type se sont produits par le passé, comme l'échouement du cargo *Infiniti* en 1995 sur le récif corallien du parc marin de Curaçao, où 400 tonnes de riz ont été déversées. Environ 8 500 m² de récifs coralliens ont été détruits dans la zone de dépôt du riz, sans tenir compte des effets intermédiaires dans la zone touchée. Il a été reconnu que si une action rapide avait été menée pour enlever le riz, la plupart des dommages observés auraient pu être évités.

I.2 Le naufrage du cargo *Fénès* dans une zone réglementée et protégée corse.

I.2.1 Les Bouches de Bonifacio, un espace de protection transnationale de l'environnement dans un détroit international.

Les Bouches de Bonifacio sont situées entre la Corse et la Sardaigne et représentent une zone de navigation à haut risque en raison de sa position stratégique pour les navires qui circulent entre l'ouest et l'est de la Méditerranée, augmentant ainsi les risques de collision, de percuter des rochers en se rapprochant des côtes et ainsi de pollution en cas d'accident. Chaque année, plus de 4.000 navires empruntent le détroit des bouches de Bonifacio. Selon le ministère de l'Écologie, 10 % de ces bateaux transportent des matières dangereuses pour l'environnement, notamment des hydrocarbures. La Sardaigne, en face de cette zone, est particulièrement préoccupée par les risques de pollution marine en cas d'accident de navire.

(2) Kerambrun, L. (2006). Reconnaissance de sites pollués par des hydrocarbures: Guide opérationnel rédigé par le CEDRE.

(3) Girin M. et Mamaca E., Pollutions chimiques accidentelles du transport maritime, 2010

Les deux îles ont renforcé leur collaboration pour prévenir les risques de pollution et surveiller les navires qui circulent dans cette zone. Des accords de coopération ont été signés pour améliorer la coordination des opérations de sauvetage en cas d'accident et renforcer les mesures de prévention de la pollution marine.

Dans les années 90, la France et l'Italie, avec le soutien de la Communauté européenne, ont travaillé ensemble pour mettre en place un mécanisme commun de protection environnementale dans les Bouches de Bonifacio. Cette initiative a été formalisée en 1992 par la Déclaration d'Aoste, signée par les ministres de l'environnement français et italien, qui prévoyait la création d'une réserve marine internationale dans cette région.

Dans ce cadre juridique international, l'Italie a créé en 1994 le Parc national de l'archipel de la Maddalena, dans la partie sarde du détroit et la France le Parc Marin International des Bouches de Bonifacio (PMIBB) en 1999. Sa superficie correspond à l'ensemble de la réserve des Bouches de Bonifacio. Depuis sa création, le parc a mis en place des réglementations pour protéger la faune et la flore marine, parmi lesquelles :

- La mise en place de zones de protection renforcée pour les mammifères marins, les oiseaux et les poissons.
- L'interdiction de la pêche professionnelle de la langouste rouge.
- L'interdiction d'ancrage dans certaines zones pour éviter la destruction des herbiers de posidonie.
- L'encadrement de la pratique de la plongée sous-marine avec l'obligation d'être accompagné par un guide.

En 2020, de nouvelles mesures ont été mises en place pour renforcer la protection du parc telles que :

- L'interdiction de la circulation des bateaux à moteur dans certaines zones du parc.
- L'instauration de zones de mouillage réglementées pour éviter la destruction des fonds marins.

Ces réglementations ont pour objectif de protéger la biodiversité marine tout en assurant un développement économique durable de la région.

1.2.2 Le rôle de protection de la réserve des Bouches de Bonifacio et ses réglementations

La réserve naturelle des îles Lavezzi, visant à protéger une partie de l'archipel des îles Lavezzi, a été classée en 1982 pour une superficie de 36 hectares. Elle a ensuite été intégrée en 1999 dans la réserve naturelle des Bouches de Bonifacio, qui est désormais la plus grande réserve naturelle de France métropolitaine avec une superficie de 80 000 hectares marins et terrestres, couvrant cinq communes. La réglementation en vigueur dans la réserve en 1996, au moment du naufrage du navire Fénès, comprenait plusieurs dispositions, notamment :

- Des zones de protection renforcée, où la pêche était interdite ou limitée, pour protéger les habitats et les espèces les plus sensibles ;
- Des restrictions sur les engins de pêche autorisés pour prévenir les dommages causés aux habitats marins ;
- Des restrictions sur la circulation des navires, en particulier les navires à passagers et les navires transportant des produits dangereux ;
- Des règles de gestion des déchets pour prévenir la pollution marine ;
- Des mesures de surveillance et de suivi de l'état de l'environnement pour évaluer l'efficacité des mesures de protection et adapter la réglementation si nécessaire.

La réglementation de la Réserve naturelle des Bouches de Bonifacio a évolué au fil des années pour mieux protéger l'environnement marin et s'adapter aux changements socio-économiques. Aujourd'hui, la réserve comprend des zones de Protection Renforcée s'étendant sur 12 300 hectares, ainsi que des zones de Non-Prélèvement sur 1 130 hectares (Figure 2).

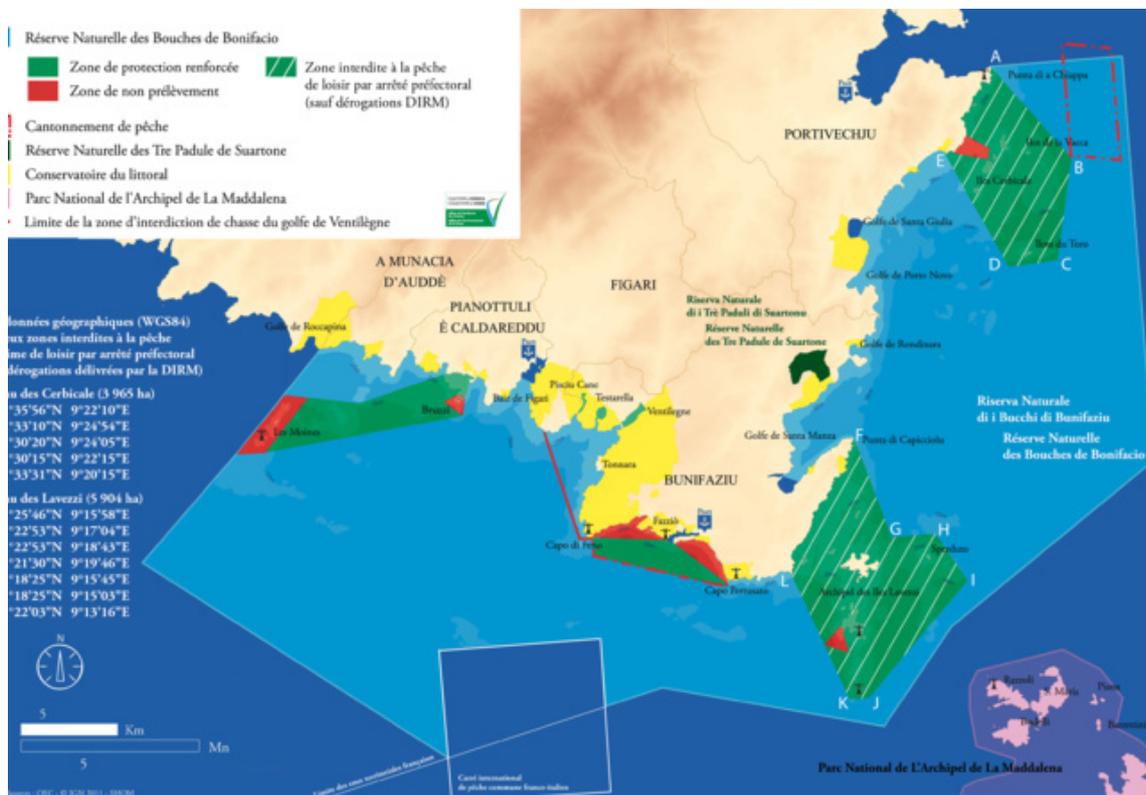


Figure 2: Localisation de la réserve naturelle des Bouches de Bonifacio © Office de l'environnement de la Corse

II- Le cas du Fénès: la gestion d'une crise pollution alimentaire au blé sur une réserve

II. 1 Chronologie et gestion de crise du naufrage : étude des étapes et des décisions prises

II.1.1. Le naufrage et les prémices des répercussions suite à l'échouage

Le déroulement des événements consécutifs au naufrage du Fénès a été synthétisé à partir de documents bibliographiques, offrant un aperçu complet des dates et des événements. Ces informations sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Déroulé des événements suite au naufrage du Fénès

Date	Evenement
25/09/1996	<ul style="list-style-type: none"> 1h30 du matin : Naufrage du cargo céréalier Fénès au îles Lavezzi Intervention de la gendarmerie de Bonifacio ainsi que le conservateur de la réserve naturelle des Îles Lavezzi-Cerbicale (M. Panzani) pour opérer aux premiers constats. Arrivée de l'équipe scientifique de Nice-Sophia Antipolis Les Navires italiens ont posé un barrage anti -pollution de 200 m autour du navire, afin d'empêcher la diffusion d'une nappe de gasoil. Action inefficace.
26/09/1996	<p>Première plongée de l'équipe scientifique qui révèle quatre fissures sous le bateau : une à bâbord et trois à tribord. Le blé se déposait sur les rochers et à bâbord sur les herbiers de <i>Posidonia oceanica</i>. L'équipe scientifique opéra ses premières recommandations transmises au COM-PC POLMAR et au CEDRE.</p>

Date	Evènement
2/10/1996	CEDRE a donné son avis sur les risques potentiels de l'immersion du blé du Fénès en mer. Le P&1 Club 1 a confirmé la réalisation des études nécessaires pour retirer la marchandise du navire, et que le projet de récupération serait lancé sous peu. Cependant, A. Meinesz a exprimé ses réserves quant aux risques de dispersion du blé au large.
10/1996	<ul style="list-style-type: none"> • Conformément aux prévisions de l'équipe scientifique, le navire s'est fracturé en deux lors de la première tempête survenue du 16 au 18 octobre 1996. Le blé s'étend sur 1 ha et commence à se décomposer. Les débris du Fénès jonchent le sol. • Fin octobre : Les tempêtes d'automne ont étendu cette couche de blé sur une surface plus large de 5 à 6 hectares, avec trois zones de concentration identifiées. Ces zones sont appelées zone I, II et III, avec une épaisseur de blé allant de 50 cm à 2 m.
14/11/1996	Réunion CEDRE : étaient présents la mairie de Bonifacio, le groupe technique français du projet de parc marin international des Bouches de Bonifacio, le COM et le Ministère de l'Environnement. Un mode opératoire a été proposé pour l'enlèvement du blé et les dernières modalités pratiques du chantier ont été finalisées.
28/11/1996	Arrivée sur site de la barge et de l'équipement nécessaires au pompage du blé.
4/12/1996	<ul style="list-style-type: none"> • Début des opérations de pompages, sous le contrôle scientifique des responsables de la Réserve naturelle des îles Lavezzi. • Rapidement l'équipe de travail remarque la présence de sulfure d'hydrogène (H₂S) dû à la décomposition du blé. Les travaux sont suspendus.
27/12/1996	Reprise des travaux après l'arrivée du matériel de protection (masque, gants, filtre et protection facile, etc.)
13/01/1997	Clôture du chantier. Les couches de blés étaient inférieures à 40 cm et il fut considéré que plus des 2/3 de la cargaison de blé avaient été retirés.
10/04/1997 10/05/1997	<ul style="list-style-type: none"> • Les tôles ont été retirées plus tard, à la suite des tempêtes d'hiver. Ces travaux ont été exécutés avec succès entre le 10 avril et le 10 mai 1997. • L'armateur a demandé une autorisation pour ré immerger les débris en mer, mais celle-ci lui a été refusée. Finalement, les débris ont été emportés vers un chantier naval en grec.
16/06 au 30/06 1997	L'ancien laboratoire d'ichtyologie de l'Université Montpellier a effectué une mission aux îles Lavezzi pour évaluer l'impact de la pollution par le blé sur l'ichtyofaune.
01/1998	J.M Culioli a évalué l'impact de l'échouage du navire Fénès sur l'environnement global de la Réserve Naturelle des îles Lavezzi, qui avait jusqu'alors été principalement étudié pour son impact sur l'ichtyofaune.
2012	<ul style="list-style-type: none"> • Une étude a été réalisée pour examiner comment les posidonies et les cystoseires ont pu se rétablir dans la zone touchée par l'échouage du navire Fénès, conformément au plan de gestion de la réserve marine. • Les conclusions de l'étude ont souligné l'importance de la mise en œuvre de mesures de restauration ciblées pour les habitats les plus touchés.

Le 25 septembre 1996 à une heure et demie du matin un cargo céréalier transportant du blé, le Fénès, fait naufrage en cœur de réserve des îles Lavezzi, entre la cala Lazarina et la cala au sud ouest des Lavezzi. Il transportait 2650 tonnes de blé. Il a d'abord touché un rocher puis a dérivé sur une dizaine de mètres avant de toucher définitivement deux autres rochers. Quelques mètres cubes de blé se sont échappés tout de suite du bateau, profitant d'une légère brèche. Ils se sont répandus sur le fond, c'est-à-dire entre 3 et 8 m de profondeur. La gendarmerie de Bonifacio ainsi que le conservateur de la réserve naturelle des îles Lavezzi-Cerbicale (M. Panzani) ont opéré aux premiers constats. L'équipe scientifique du laboratoire environnement marin littoral de l'université de Nice-Sophia Antipolis connaissait très bien le site de l'échouage grâce à plusieurs études antérieures. Le substrat du site d'échouage était formé par un affleurement rocheux de granite et un herbier dense de *Posidonia oceanica*. Cet herbier était présent sous forme de touffes denses au sein de larges cuvettes sableuses entre les anfractuosités de la roche. Les scientifiques se sont rendus le jour-même sur les lieux du naufrage. L'équipage du Fénès était toujours à bord et la météo était mauvaise, la situation globale était donc critique. Dans cette même journée, les navires italiens ont posé un barrage anti-pollution de 200 m autour du navire, pour empêcher la diffusion d'une nappe de gasoil qui s'échappait du bateau, mais cette dernière s'est montrée inefficace. Le gasoil apparaissait en dehors du barrage porté par le courant vers la rive et n'empêchait donc pas sa diffusion.

Le lendemain du naufrage, l'équipe scientifique a organisé une première plongée dont les objectifs étaient les suivants :

- Mesurer la surface couverte par le blé et observer les écosystèmes alentours;
- Évaluer la quantité de gasoil qui s'échappait du navire
- Évaluer les autres impacts du naufrage, et notamment les roches brisées par la coque du navire;

Les premières observations in situ ont montré que le blé s'écoulait par quatre fissures du bateau : une à bâbord et trois tribord. Le blé se déposait sur les rochers et à bâbord sur les herbiers de *Posidonia oceanica*. Dans les zones intertidales (menacées par les produits flottants) se trouvaient des espèces rares et menacées comme la patelle ferrugineuse (*Patella ferruginea*), des algues brunes *Cystoseira compressa* et *Cystoseira amentacea var. stricta* et des algues rouges calcaires comme *Lithophyllum lichenoides*.

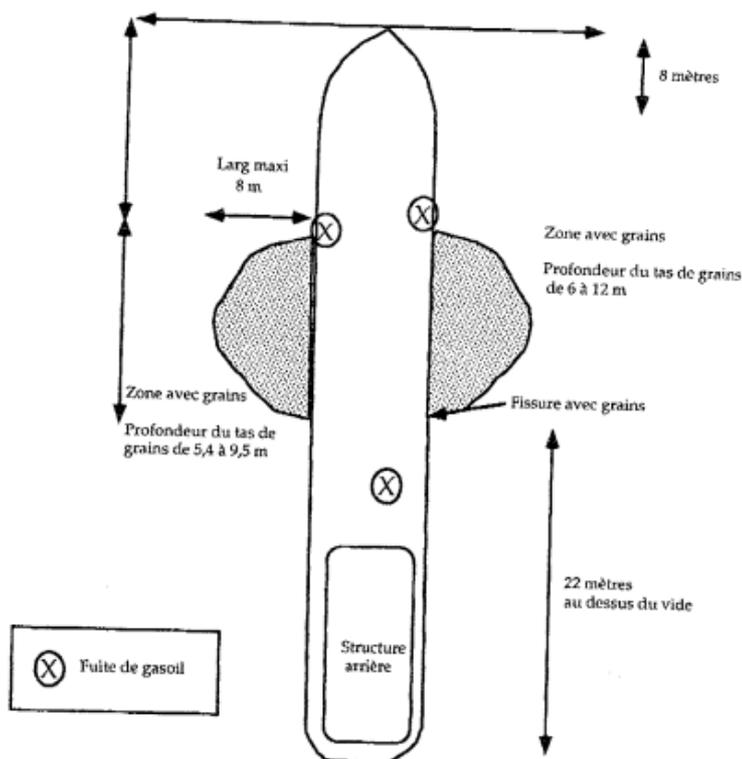


Figure 3: Schéma de la localisation des fuites de gasoil et de grain du navire Fénès © Laboratoire Environnement marin et littoral

Dès cet instant, l'équipe scientifique émettait des réserves quant à la potentialité d'une dispersion au large du blé. En effet, Il était signalé que la société ayant conditionné le blé à Port la Nouvelle avait utilisé un insecticide huileux (le PERIGRAIN) à hauteur de 318 litres pour 2 650 tonnes de blé. Répandre ce blé dans la mer avec cet insecticide pouvait potentiellement nuire à la vie marine. En réalité le chargement de blé français destiné à l'aide alimentaire en Albanie n'avait pas été chargé avec 250 litres de pesticides bioaccumulables comme annoncé, mais seulement 15 kg de pesticides biodégradables pour éviter les poussières et prévenir l'infestation par des charançons. Les accusations initiales sont donc infondées et il n'y avait pas d'urgence ni de preuve de pollution au départ, bien que des mesures devaient être prises.

Les recommandations du 26/09/1996 à 11h30 faites par l'équipe scientifique étaient les suivantes :

- Retirer le blé restant dans le bateau au plus vite car ils craignaient qu'aux prochaines tempêtes le bateau ne se brise et libère le blé. L'impact de la dégradation du blé était une source d'inquiétude pour les scientifiques.
- Retirer le gasoil de la soute pour éviter qu'il ne se répande dans le milieu.
- Enlever toute matière susceptible d'être toxique pour le milieu marin en prévision de la dislocation du bateau. (4)

Les scientifiques s'accordaient sur le fait que la destruction des peuplements sous-marins de la réserve des Lavezzi par le blé échappé du Fénès était une atteinte majeure au milieu marin depuis la création de la réserve.

Ce premier constat et les recommandations ont été transmis au COM-PC POLMAR (Le dispositif POLMAR (POLLutions MARines) Terre est une mesure pour lutter contre les pollutions marines par hydrocarbures sur le littoral français) et au CEDRE.

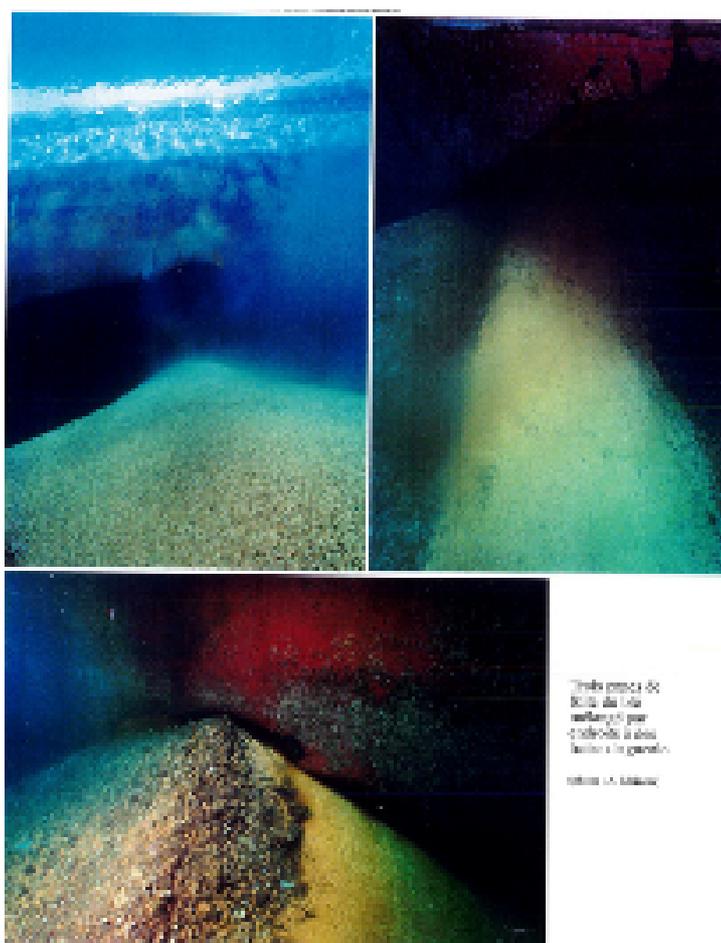


Figure 4: Photographie situation du blé octobre 1996 © A.Meinesz

(4) Meinesz A, J-M Cottalorda, M. Braun, D.Chiaverini, J.M Culioli et J-P Panzani, 1996, Impact de l'échouage du N/V Fénès sur l'environnement dans la Réserve naturelle des îles Lavezzi. Ed. LEML UNSA/ Réserve naturelle des îles Lavezzi-Cerbicale, 34 pp.

II.1.2 L'intervention du CEDRE : proposition de récupération du blé

Le 2 octobre 1996, soit une semaine après le naufrage et après réception des premiers rapports et recommandations des scientifiques, le CEDRE a envoyé un fax proposant son avis sur les risques éventuels liés à l'immersion du blé du Fénès dans une zone à déterminer. Selon le CEDRE, le blé sain, non souillé par le gasoil, soit environ 1000 tonnes, devait être pompé et immergé dans des zones à déterminer ou vendu à terre pour sauvetage. Le blé souillé pourrait être incinéré à Bonifacio. Le P&1 Club* a confirmé que toutes les études nécessaires étaient en cours pour retirer la marchandise du navire échoué sur le fond et qu'une suceuse serait utilisée pour réaliser ce travail. Le projet de récupération du blé devait rapidement être lancé et pour une durée estimée entre dix et quinze jours, selon la météo et le temps mis pour retirer le gasoil. Ainsi, les premiers déversements au large devaient avoir lieu moins de 15 jours après le naufrage. Selon le CEDRE, tant que le blé était exempt de pollution et destiné à un usage alimentaire, son immersion dans les Bouches de Bonifacio ne présentait aucun risque pour la faune et la flore, à condition qu'il soit préalablement testé en laboratoire et immergé dans une zone hors de la réserve, à une profondeur supérieure à cinquante mètres.

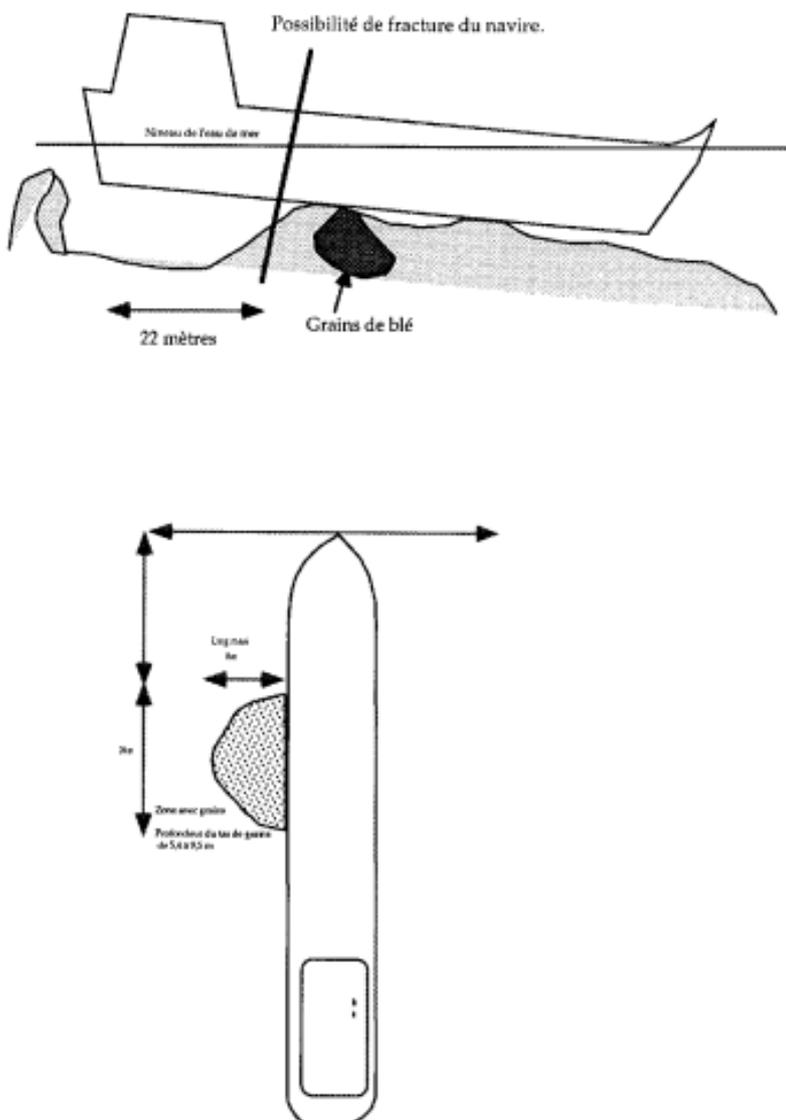


Figure 5: schéma risque de fracture du Fénès 26/09/1996 © Laboratoire environnement marin et littoral

*P&1 Club (Protection and Indemnity Club), est une organisation qui fournit des assurances maritimes aux propriétaires de navires. Il offre une assurance responsabilité civile pour les dommages causés aux tiers, tels que les passagers, les travailleurs portuaires ou les autres navires)

Le lendemain de l'émission de l'avis du CEDRE, le président du comité scientifique M. Meinesz adressait au CEDRE ses réticences quant au choix de répandre le blé au large. Il préférerait une incinération à terre. Les personnes impliquées ont eu du mal à se mettre d'accord sur la manière de traiter le blé et l'eau souillée, qui seraient pompés à raison de 8 à 10 fois le volume du blé. Ils ont discuté des options telles que l'égouttage sur place, le rejet en mer ou le transport à terre pour être incinérés dans un centre respectant les normes environnementales. Cependant, le trajet routier de Bonifacio à Corte a compliqué les choses. Après une réunion interministérielle et une analyse de l'impact écologique global, les scientifiques et le ministère de l'Environnement ont finalement convenu de la réimmersion en mer, hors du périmètre de la réserve, du blé non contaminé par du gasoil. Des normes opératoires ont été élaborées pour éviter de déverser plus d'un kg de blé par m² de fond, cette solution étant considérée comme la moins nocive.

La compagnie de renflouage était volontaire pour sortir le Fénès et le conduire au port cependant il est recommandé d'obtenir une astreinte juridique à cette opération. En effet, plus elle tarde à être menée et plus les problèmes de dislocation avec les tempêtes hivernales seront importants. Il est rappelé que cette opération doit servir d'exemple en matière de gestion de crise, de pollution et d'avertir les assureurs et armateurs sur les conséquences que peut avoir la navigation dans cette zone. L'armateur prend en charge les travaux et les suivis scientifiques dans leur intégralité.

Du 28 septembre au 16 octobre, seul le carburant fut pompé. L'armateur avait décidé de récupérer le bateau en colmatant les fissures.

II.1.3. Les complications de l'échouage soulignent l'urgence de la situation

Conformément aux prévisions de l'équipe scientifique, le navire s'est fracturé en deux lors de la première tempête survenue du 16 au 18 octobre 1996. Dans le rapport d'inspection, il était mentionné que le blé recouvrait alors 1 ha et que des débris du bateau étaient présents sur les fonds. De plus, il commençait à se décomposer. Tout peuplement couvert par le blé était mort, "brûlé". Le blé en décomposition était alors considéré comme une pollution massive pour le milieu. En effet, la décomposition du blé entraînait une pollution organique extrêmement nuisible pour le milieu, qui se déplaçait lors de chaque tempête et causait la destruction de nouveaux peuplements, amplifiant ainsi la pollution dynamique dans le temps. *Posidonia oceanica* était déjà détruite sur plusieurs centaines de mètres carrés. Il était donc impératif de tout mettre en œuvre pour limiter cette pollution en retirant le blé du milieu marin dès que possible (5).

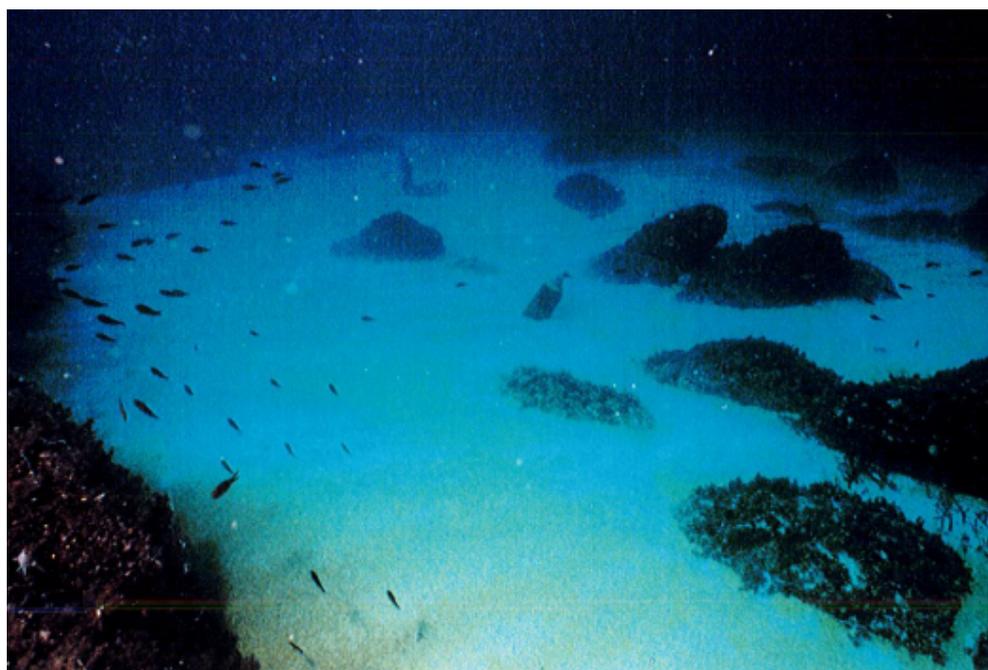


Figure 6: Photographie du 25/10/1996, Arrière du Fénès, étendue de blé où seules quelques roches émergent ©A.Meinesz

(5) Meinesz, A., Carvalho, N., Chiaverini, D., Culioli, J-M., Panzani, J-P. (1996). Rapport pour la réserve naturelle des îles Lavezzi : Impact du NV/Fénès sur l'environnement dans la réserve naturelle des Lavezzi un mois après son échouage. Date de publication : 30/10/1996.

Réglementation de la partie marine de la Réserve : *Le rejet ou l'immersion dans la mer, ainsi que le dépôt sur le domaine public maritime d'eaux usées, de résidus ou de détritiques de quelque nature que ce soit, sont interdits.*" (Décret n 82-7 du 6 janvier 1982 portant création de la Réserve naturelle des îles Lavezzi (Corse du Sud) Chapitre III Article 21)

II. 2 Mise en place d'un projet de gestion de la pollution alimentaire accidentelle : Atténuer l'impact de l'accident sur l'environnement marin

II.2.1. Les acteurs en jeu pour concevoir un projet de dépollution sans précédents auquel se référer

Lors de la réunion du 14 novembre 1996 avec le CEDRE, soit près de deux mois après le naufrage, la situation a été éclaircie. Après les premières constatations, il a été convenu que les autorités et l'armateur devaient assumer la responsabilité du nettoyage du site et celle de l'évaluation de l'impact environnemental, qui s'étendrait de décembre 1996 à janvier 1997. Plusieurs réunions ont été organisées en novembre 1996 pour discuter de l'échouage et de la pollution du site. Les réunions ont été initiées par la mairie de Bonifacio, le groupe technique français du projet de parc marin international des Bouches de Bonifacio, le COM et le Ministère de l'Environnement. Le CEDRE a été chargé de la gestion de l'échouage et a organisé deux réunions avec d'autres organismes et administrations concernés à Toulon. Un mode opératoire a été proposé pour l'enlèvement du blé et les dernières modalités pratiques du chantier ont été finalisées. Une réunion opérationnelle a eu lieu le 20 novembre avec l'armateur pour discuter des détails techniques de l'opération. La barge et l'équipement nécessaires sont arrivés sur le site le 28 novembre.

Au cours de ces réunions, les participants ont montré leur scepticisme quant à l'utilisation du terme "pollution" pour parler du blé. A la question, "y'a-t-il pollution ?", l'équipe scientifique affirme que "Il y a un effet un recouvrement par le blé, qui étouffe et prive de lumière la faune et la flore du fond. A cet effet s'ajoute une pollution organique due à la putréfaction progressive du blé. Une telle situation correspond à la définition d'une pollution par le GESAVP (Groupe d'Experts sur les Aspects Scientifiques des Pollutions Marines des Nations Unies). Cet impact touche entre autres des espèces protégées, dont la phanérogame *Posidonia oceanica* (Posidonie). Nous pouvons ainsi rappeler dans cet encadré qu'une pollution est définie comme ceci : "L'introduction par l'homme, directement ou indirectement, de substances ou d'énergie dans l'environnement marin, qui se traduit par des effets nuisibles mesurables sur cet environnement. (6)"

II.2.2. Les travaux de pompage du blé

Les travaux ont commencé le 4 décembre 1996 sous le contrôle scientifique des responsables de la Réserve naturelle des îles Lavezzi. Chaque jour, la Réserve et l'entreprise Tsaviris (entreprise spécialisée dans les opérations de sauvetage en mer mandatée pour la réalisation des travaux) étaient tenues de signer un rapport de chantier (procès verbal). Malgré la recommandation de retirer le chargement en blé du Fénès au lendemain du naufrage en prévision des tempêtes, cette mesure n'a pas été mise en place assez rapidement : Le 20 octobre, en raison de la dislocation progressive du navire, l'intégralité de la cargaison s'est retrouvée sur les fonds marins, recouvrant une surface estimée à plus d'un hectare autour de l'épave. La couche de blé mesurait entre 50 cm et 2 m d'épaisseur, et les tempêtes d'automne ont amplifié l'impact du blé sur des surfaces plus importantes (5 à 6 hectares), avec trois zones de concentration identifiées autour de l'épave appelées zone I (zone initiale), II (zone sud est) et III (zone sud ouest).

Les travaux de pompage du blé ont été réalisés à l'aide d'une pompe (1 200 m³/h). Le blé a été égoutté et stocké sur une barge (une pleine barge étant estimée par la réserve naturelle et le CEDRE à 250 T de blé mouillé, il n'existe pas de PV de chantier après le PV n°3 du 6/12/1996), puis immergé en mer à des fonds supérieurs à 300 mètres.

(6) Zaher Massoud. Directeur scientifique de l'IFREMER Pollution des Océans, in "Problèmes d'environnement" Ed Lavoisier Tec et Doc. 1996.

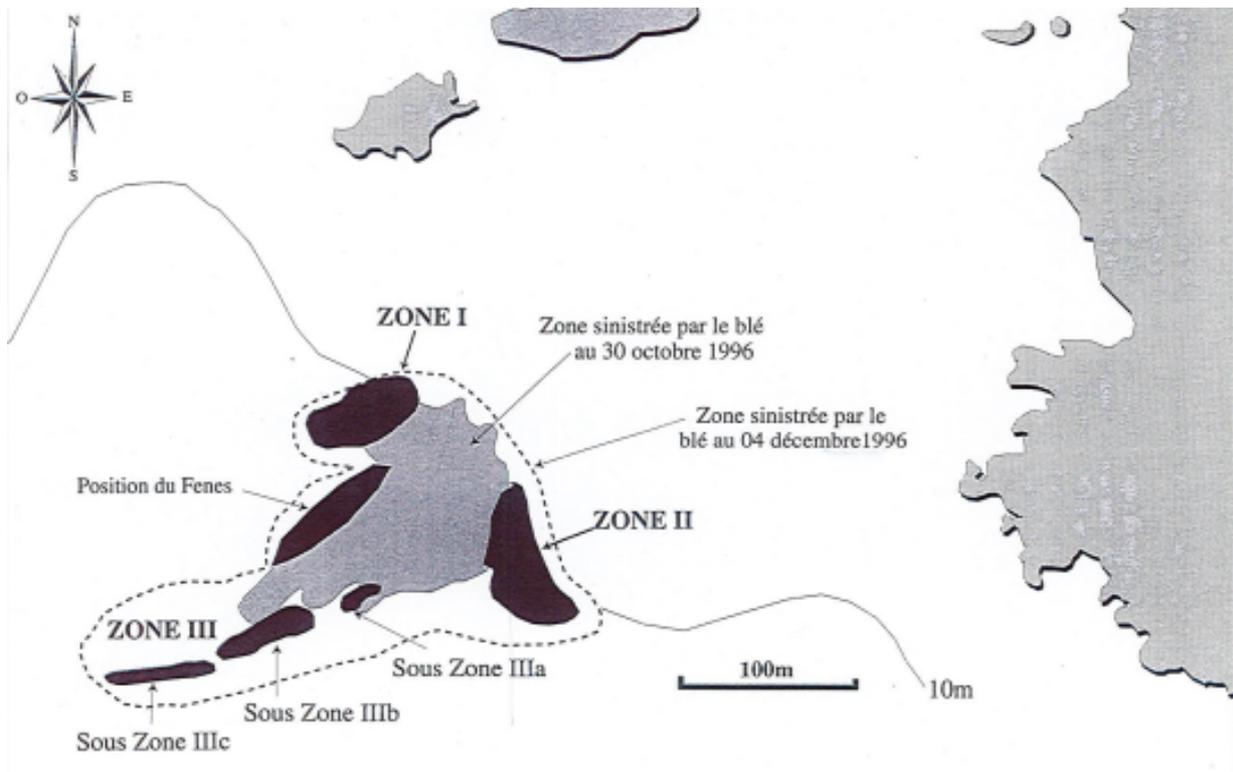


Figure 7 : Carte de chantier réalisée à partir des plongées du 02-03/12/1996, positionnement des trois zones entièrement recouvertes par le blé. Sources : Impact de l'échouage du M/V Fénès sur l'environnement de la Reserve naturelle des îles Lavezzi 3eme rapport. © Laboratoire Environnement Marin Littoral Université de Nice-Sophia Antipolis



Figure 8 : Photographie pompée du blé du Fénès zone I © J.M Culioli

Extrait des travaux :



Stockage de blé du *Fenes* sur une barge, en haut. Opération de rejet du blé au large, en bas.
(Photos : C.E.D.R.E.)



Figure 9: Photographies extrait des travaux de pompage © CEDRE

II.2.3. Difficultés rencontrées lors des travaux de retrait du blé

Très rapidement, les plongeurs travaillant sur le site ont observé une attaque superficielle de leurs ceintures de plongée et le personnel travaillant sur la barge a subi des nausées, des vomissements et des irritations en raison des fortes émanations d'hydrogène sulfuré (H_2S) liées à la fermentation du blé. Les concentrations d'hydrogène sulfuré mesurées dans l'air ambiant étaient suffisamment élevées (jusqu'à 20 ppm) pour que les autorités décident de suspendre provisoirement les travaux de récupération du blé. A. Meinesz du comité scientifique, biologique et plongeur scientifique sur place dès le premier jour fait part de son témoignage "Un autre constat surprenant. En plongeant mon bras dans le blé, j'ai senti qu'il était chaud. Quelques filets de bulles s'élevaient vers la surface. Le blé avait commencé à fermenter et à dégager de l'hydrogène sulfuré ! Le blé allait stériliser ce qu'il recouvrait et l'épave allait se disloquer un peu plus à chaque tempête (7)." Ainsi, en plus de la pollution alimentaire causée par le blé, il y avait également la présence de sulfure d'hydrogène entraîné par sa décomposition.

(7) Meinesz, Protéger la biodiversité marine, chapitre "les atteintes au milieu marin" (P 142), 2021



Figure 10 : Photographie A.Meinesz 25/10/1996, apparition de filaments blanchâtres dûs à la dégradation du blé

Les travaux ont repris le 27 décembre 1996 une fois que du matériel de protection fut apporté (masque, gants, filtre et protection facile, etc.) et que le chantier pouvait ainsi se dérouler en sécurité. Il s'est terminé définitivement le 13 janvier 1997 soit plus de trois mois après l'accident. Les couches de blés étaient inférieures à 40 cm et il fut considéré que plus des $\frac{2}{3}$ de la cargaison de blé avaient été retirés.

En ce qui concerne les tôles qui jonchaient le sol, les travaux ont été planifiés bien plus tard, à la suite des tempêtes d'hiver. Ils ont été exécutés avec succès entre le 10 avril et le 10 mai 1997. L'armateur a demandé une autorisation pour ré-immérer les débris en mer, mais celle-ci lui a été refusée. Finalement, les débris ont été emportés vers un chantier naval en grec.

Retrait du château arrière du *Fenes*.
(Photos : J.-M. Culioli, le 3 mai 1997)

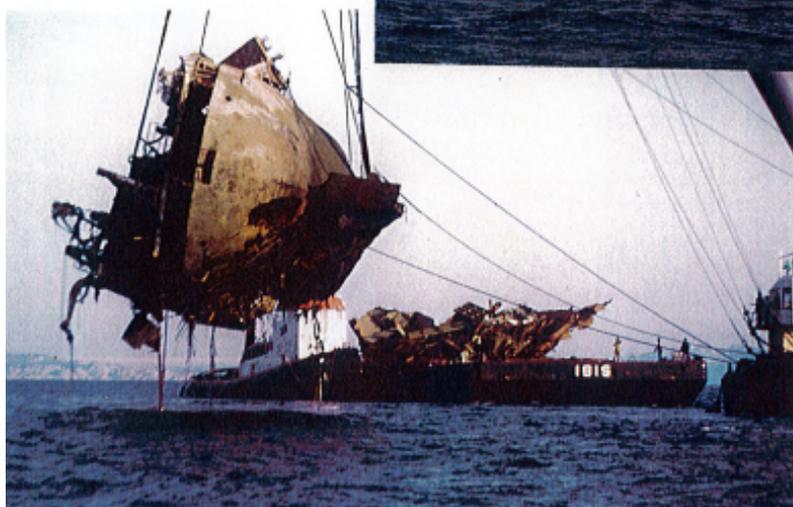


Figure 11: Photographies du retrait du château arrière du Fénès 3 mai 1997 © J.M Culioli

II.3 Suivis des impacts de la pollution suite au naufrage du Fénès sur les écosystèmes marins

Plusieurs mois après le naufrage, la pression sur le milieu marin a été largement réduite grâce aux opérations de retrait du blé et des tôles du navire présentées dans les paragraphes précédents. Des suivis à court, moyen et long terme de l'impact de la pollution accidentelle par le blé ont été mis en place.

Le suivi à court terme a eu lieu neuf mois après le naufrage et se centre sur l'ichtyofaune. Le suivi à moyen terme a eu lieu un an et demi après le naufrage et est une première évaluation globale des impacts de la pollution au blé sur la réserve naturelle des îles Lavezzi. Le suivi à long terme (2012) « retour sur site » vise à analyser la recolonisation naturelle des herbiers *Posidonia oceanica* et cystoseires.

II.3.1 Acteurs impliqués et temporalité des suivis environnementaux

Le suivi de l'impact de la pollution accidentelle sur la faune et la flore macroscopiques a été confié au laboratoire d'environnement marin de l'Université de Nice, en collaboration avec la Préfecture Maritime et le Ministère de l'Environnement. Le conseiller scientifique de la réserve a dirigé ces travaux. Le CEDRE s'est quant à lui chargé du suivi de la dégradation du blé restant et de l'évolution bactériologique de la zone touchée, compte tenu des dégagements massifs d'hydrogène sulfuré causés par la fermentation du blé et la multiplication de bactéries sulfato-réductrices. Plusieurs temporalités de suivi ont été mises en place : à court, moyen et long terme après le naufrage, dont les principaux résultats sont synthétisés ci-après.

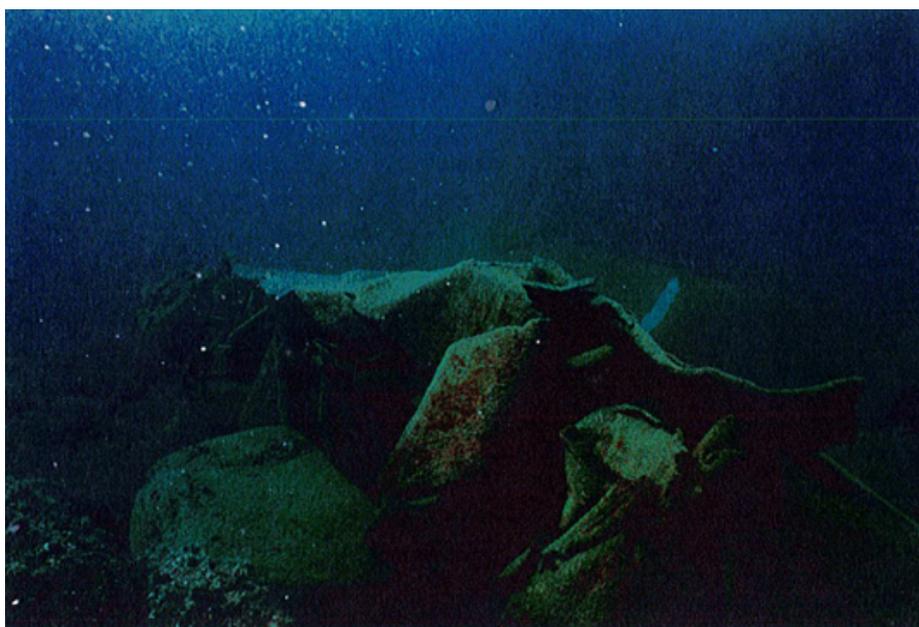


Figure 12 : Photographie épave disloquée du Fénès mission du 2 au 6 avril 1997 © A.Meinesz

II.3.2 Suivis à court terme

Moins de neuf mois après le naufrage (du 16 au 30 juin 1997), une mission a été effectuée aux îles Lavezzi par l'ancien laboratoire ichtyologie de l'Université Montpellier. Elle avait pour objectif l'estimation de l'impact de la pollution par le blé sur l'ichtyofaune. 165 points fixes de 100 m² chacun ont été étudiés durant les 15 jours de mission, répartis sur deux sites géographiques :

- « I Becchi », site non pollué localisé au sud de Lavezzi, qui a servi de référence pour comparer les données avec les observations de missions antérieures et détecter d'éventuelles variations interannuelles. Les deux biotopes prospectés à « I Becchi » étaient les roches infralittorales et les herbiers à *Posidonia oceanica*.

- La "Cala di Chiorneri", site touché par la pollution, où sept secteurs ont été inspectés. Ils comprenaient des roches infralittorales et de l'herbier à *Posidonia oceanica* présentant différents états : 1) biotopes encore couverts de blé, 2) biotopes sans blé mais toujours "brûlés" (le blé avait disparu mais les effets de la pollution étaient visibles, tels que la destruction de la faune et de la flore épilithiques, ainsi que l'herbier mort), 3) les secteurs qualifiés de "sains" dont les biotopes étaient situés dans la zone polluée mais sans signes apparents de destruction. Le nombre de points fixes étudiés dépendait de la surface disponible pour chaque type de secteur. Par exemple, pour l'herbier "brûlé", une seule zone d'étude d'une surface égale ou supérieure à celle d'un point fixe a été trouvée (8).

Il est conseillé de procéder à des suivis à plus long terme pour détecter les perturbations de la diversité et de la densité de la faune ichthyologique. Cependant, même à ce stade intermédiaire, des observations ont révélé une nette diminution de la densité de poissons dans les zones d'herbiers par rapport aux rochers. Cette diminution peut être attribuée à plusieurs facteurs, notamment la présence de blé qui peut réduire la richesse spécifique des espèces dans les zones touchées, ainsi que la dégradation du milieu due à la fermentation du blé, qui peut être toxique et avoir un effet repoussant sur la faune marine. Ces hypothèses seront vérifiées lors des suivis mis en place jusqu'en 2012.



Figure 13 : Photographie de l'herbier mort 31/05/1996 © A.Meinesz

Plus d'un an après le naufrage, les experts de la réserve naturelle chargés des suivis antérieurs ont constaté une certaine stabilité des épaisseurs de blé dans les zones précédemment brûlées, avec des épaisseurs allant de 20 à 40 cm, par rapport à des épaisseurs allant de 120 à 200 cm pendant les saisons du printemps et de l'été. Ensuite, une dégradation rapide de ces masses de blé a été constatée, et la fermentation du blé s'est arrêtée en août 1997 (CEDRE). Avant cette date, la toxicité du sulfure d'hydrogène empêchait les poissons comme les oblades et les bogues de se nourrir des masses de blé polluées qui jonchaient le fond marin. Cependant, leur intervention a significativement contribué à la diminution de ces masses de blé, ce qui a aidé à résorber la pollution. Finalement, après les tempêtes de l'hiver 97/98, les dernières traces de blé ont disparu (9).

II.3.3. Suivi à moyen terme

En janvier 1998, soit un an et demi après le naufrage, J.M Culioli, a réalisé une première évaluation de l'impact de l'échouage du navire Fénès sur l'environnement global de la Réserve Naturelle des îles Lavezzi afin de compléter les suivis qui étaient jusqu'alors uniquement axés sur l'ichtyofaune. Deux zones appelées « zone A » (Figure 15) et « zone B » (Figure 16) ont été définies pour réaliser ce suivi. La zone B correspond en grande partie à la zone baptisée « zone I » pendant le pompage du blé.

(8) Rapport intermédiaire de la mission FENES 97 T (16 juin - 30 juin 1997) par Tomasini J.A., Collart D., Culioli J.M. & Fuchon

(9) Culioli, J-M, 1998. Première évaluation de l'impact de l'échouage du navire Fenes sur l'environnement de la réserve naturelle des îles Lavezzi & perspectives de suivis scientifiques. Association de Gestion des Réserves naturelles des îles Lavezzi et Cerbicales

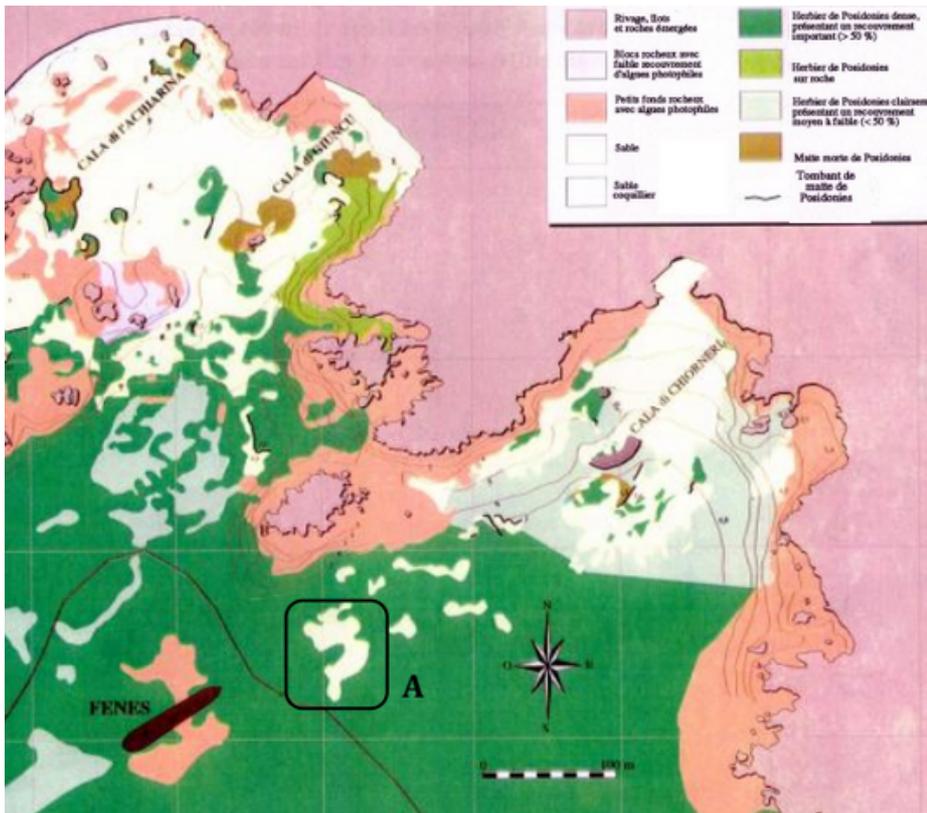


Figure 14 : Cartographie de synthèse du secteur d'échouage. Identification de la zone A (© Meinesz et al., 1997)

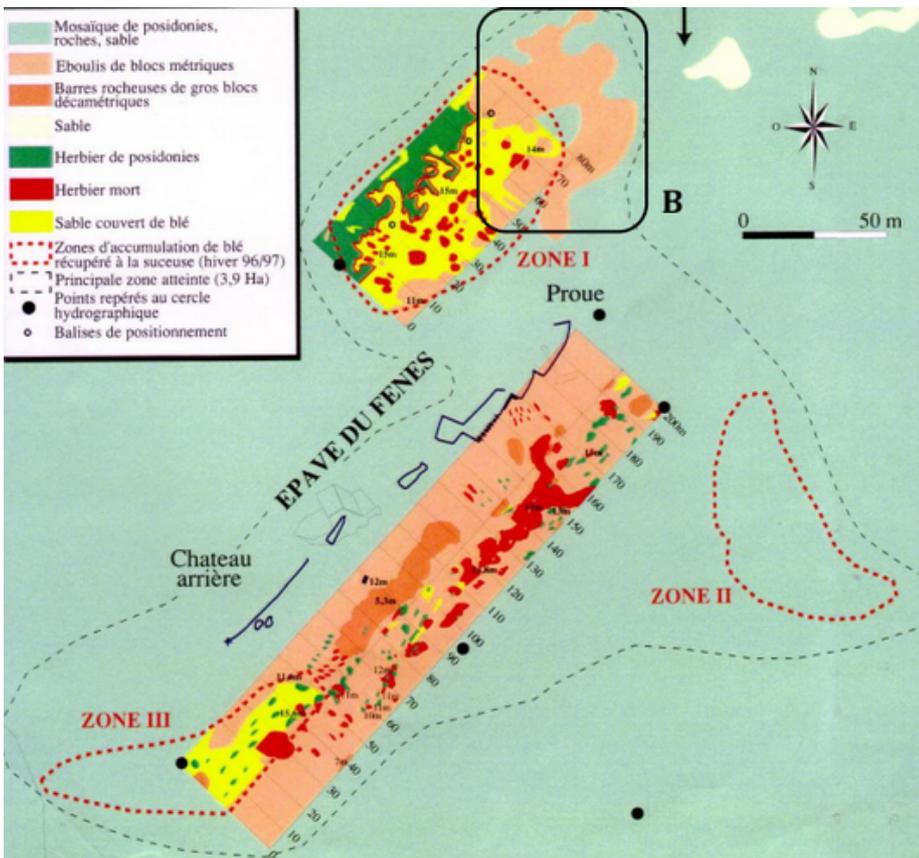


Figure 15 : Cartographie spécifique des zones d'étude I et III. Identification de la zone B (© Meinesz et al., 1997)

Les fonds marins proches de l'emplacement du naufrage se situent à des profondeurs de 6 à 12 mètres. Cependant, le blé s'est répandu dans des vallées sous-marines situées à plus de 200 mètres de l'épave, atteignant même des profondeurs de plus de 20 mètres en certains endroits. Le LEML-UNSA* a mené quatre missions d'évaluation des impacts de l'échouage entre février et mai 1997. La principale difficulté pour cartographier les biocénoses de la zone du naufrage et des alentours était la présence de blé (en recouvrant les fonds, la reconnaissance des différents substrats était compliquée) ainsi que sa fermentation qui rendait l'eau trouble, empêchant alors une distinction précise des biocénoses. Les observations, réalisées sur deux zones rectangulaires, ont montré les résultats suivants. :

- La zone A, située au nord de l'épave, mesurait 80 m x 40 m et correspondait à une cuvette de sable avec des touffes denses de Posidonie et des reliefs rocheux environnants. Après le déversement de blé, la zone a été complètement recouverte, détruisant environ 173 m² de Posidonies. Les herbiers et les rochers bordant la cuvette ont été englués de matière blanche, entraînant la mort des gorgones fixées sur les parois verticales des roches ;
- La zone B, se situait le long de l'épave, mesurait 200 m x 40 m et abritait, entre les blocs rocheux, quelques touffes de Posidonie, sauf à l'extrémité sud-ouest où se trouvait une petite vallée sous-marine avec du blé. Les touffes de Posidonies situées dans les parties profondes des reliefs rocheux étaient mortes, mais celles fixées au sommet de monticules rocheux ont été épargnées.

En ce qui concerne l'ichtyofaune, les comptages effectués par J.M. Culioli ont confirmé les observations précédentes : il a été observé des changements significatifs dans le comportement, la structure des populations et la densité des peuplements de poissons observés après le naufrage. Les poissons étaient rares au-dessus des masses de blé sur rocher ou herbier, et dans les zones d'herbiers totalement détruites par le blé. La présence de blé a réduit la diversité des espèces, principalement dans les zones d'herbiers et de rochers où le blé est encore présent.

Cependant, la présence de blé a favorisé le développement de micro-organismes, pouvant ainsi initier une nouvelle chaîne trophique et offrant un milieu de bonne qualité pour les poissons sur son autre bordure. Il serait utile d'étudier la réapparition des populations de poissons sur le biotope rocheux et de surveiller l'établissement possible de nouveaux rapports de dominance interspécifique. A ce stade, il est conseillé de réaliser un suivi régulier pour évaluer l'impact de la pollution organique sur les populations de poissons, les espèces fixes de la faune marine et les mollusques sédentaires protégés, tels que la *Pinna nobilis*. Ce suivi permettra également d'observer la reconstitution de ces populations et de suivre leur évolution(10).

En ce qui concerne l'aspect bactériologique : les dégagements d'hydrogène sulfuré sur le site au moment des travaux ont suscité une étude scientifique entreprise par le CEDRE afin de comprendre la pollution bactériologique du Fénès. Les analyses ont montré que le blé fermentait à cause d'une microflore anaérobie sulfato-réductrice. Cette étude a nécessité cinq campagnes de prélèvements sur le site entre décembre 1996 et avril 1998.

*Le LEML-UNSA est le Laboratoire d'Etudes Méditerranéennes sur le Long Terme de l'Université Nice Sophia Antipolis, une organisation de recherche scientifique basée en France. Suite au naufrage du Fénès en 1996, le LEML-UNSA a participé aux études scientifiques menées pour évaluer les impacts environnementaux du naufrage sur la réserve.

(10) Tomasini, J.A., Collart, D., Culioli, J.M., & Fuchon. (1997). Rapport intermédiaire de la mission Fenes 97 T (16 juin - 30 juin 1997).

Dans la zone d'échouage, des teneurs importantes d'hydrogène sulfuré ont été observées, ainsi que la présence d'écheveaux blanchâtres qui pourraient correspondre à des développements massifs de bactéries sulfo-oxydantes. La production métabolique d'hydrogène sulfuré par la microflore anaérobie sulfato-réductrice a des effets toxiques sur les plantes, les animaux et les humains. Cette étude a fait l'objet d'une publication présentée au congrès de la Commission Internationale pour l'Exploration Scientifique de la mer Méditerranée à Dubrovnik en juin 1998, et le rapport final était prévu pour le second semestre 1998.

Pour conclure la synthèse, J.M Culioli préconise de mettre en place rapidement des suivis de l'impact du blé sur l'ichtyofaune, sur les populations échinodermes, sur la zone côtière et la faune terrestre.

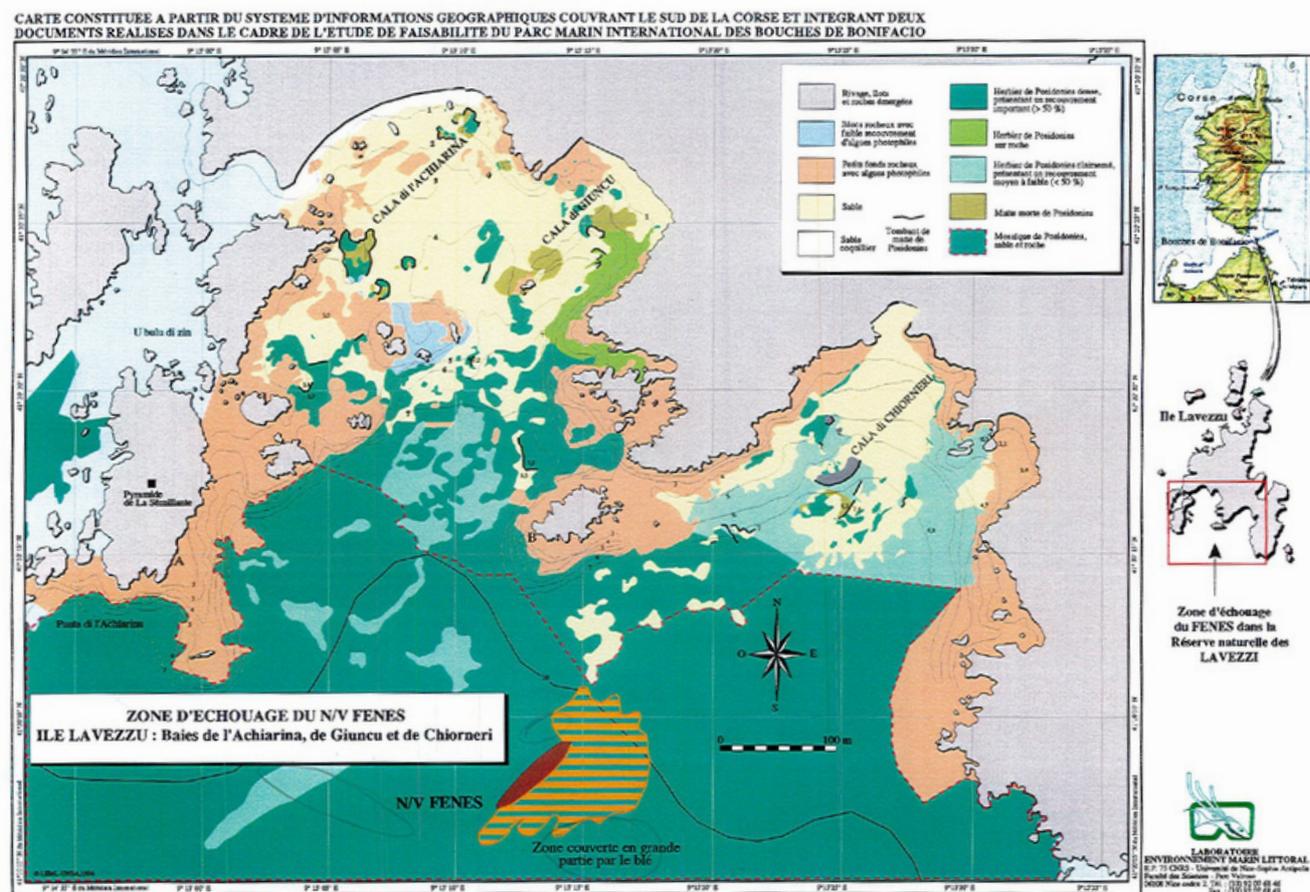


Figure 16 : Cartographie de la biocénose du secteur d'échouage (© Meinesz et al., 1997)

II.3.4 Suivi à long terme

En 2012, une étude "retour sur site" a examiné comment les posidonies et les cystoseires ont pu se rétablir dans la zone touchée, conformément au plan de gestion de la réserve marine. L'étude sur l'état des communautés végétales de la zone impactée par l'accident du Fénès a révélé les résultats suivants, qui ont été regroupés en deux zones correspondant au zonage des suivis scientifiques de 1998 (Figure 18). Il convient de noter que la zone II n'a pas été identifiée car les impacts sur l'environnement étaient minimes.

- **La zone I** comporte des touffes d'herbiers éparses et quelques faisceaux isolés au sud, avec une vitalité moyenne. Au centre, une zone d'herbier de posidonie s'étend sur une matrice surélevée avec une bonne densité de faisceaux et une vitalité améliorée. Au nord, la partie ouest a un herbier continu tandis que la partie à l'est est caractérisée par un fond de sédiment meuble avec des faisceaux déchaussés et une matrice affaiblie. Des individus de *Pinna nobilis* et une tache de *Cymodocea nodosa* sont également observés.

- **La Zone III** est caractérisée par un substrat dur et un herbier de posidonie prédominant au sud. Au sud, les herbiers sont en bon état avec des feuilles longues et un épiphytisme modéré. Dans la partie centrale, il y a un substrat dur avec des barres rocheuses et des blocs, et une communauté d'espèces présente, avec un couvert végétal dominé par des cystoseires et des taches d'herbiers de posidonie. Au nord, le substrat est rocheux avec une forte présence d'un couvert algal dominé par des cystoseires, et les taches d'herbiers de posidonie sont moins importantes. Des débris métalliques couverts d'organismes sont visibles sur le fond, peut-être des résidus de l'épave du Fénès

Les principaux résultats de ce suivi à long terme, soit plus de quinze ans après le naufrage, montraient que les herbiers de posidonie avaient commencé à se rétablir sur les zones I et II, avec des signes de recolonisation plus facilement observables sur substrat meuble que sur substrat dur.

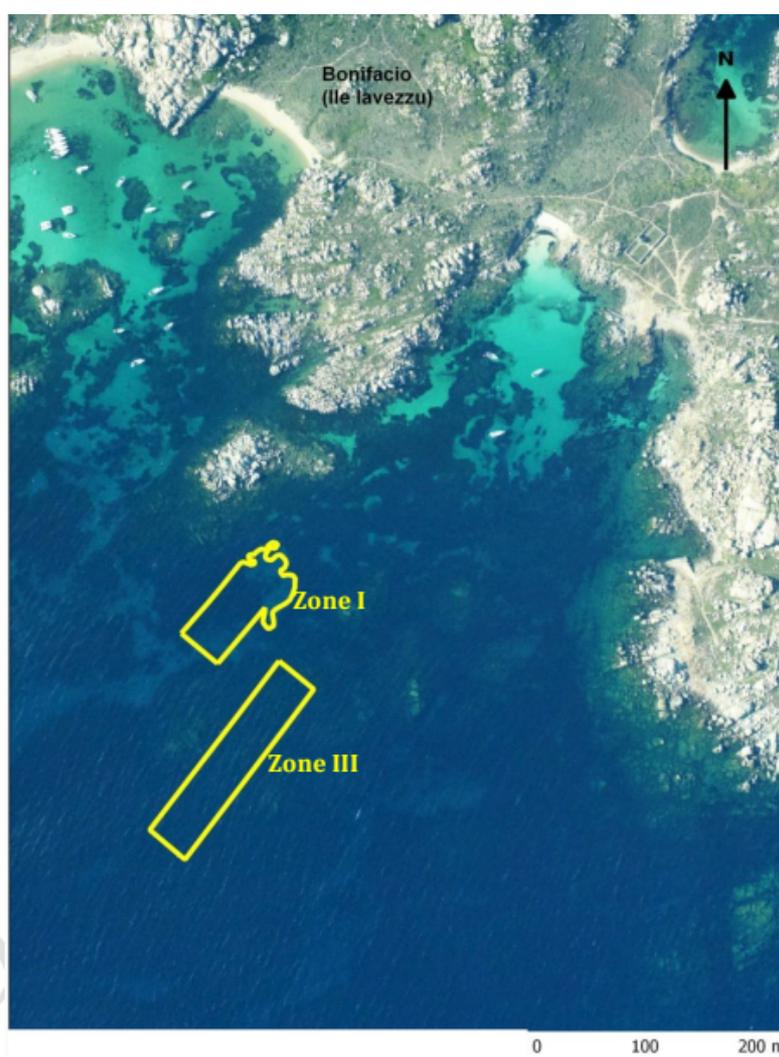


Figure 17 : Zones d'études - Zone I et Zone III © SINTINELLE – Etudes en Environnement 2012

Les principaux résultats de ce suivi à long terme, soit plus de quinze ans après le naufrage, ont montré que les herbiers de posidonie avaient commencé à se rétablir sur les zones I et II, avec des signes de recolonisation plus facilement observables sur substrat meuble que sur substrat dur. Cependant, la résilience des herbiers restait limitée. Les populations algales, notamment les cystoseires, avaient recolonisé l'espace perdu après la dégradation du milieu et s'étaient rétablies de manière satisfaisante. L'actualisation de la cartographie des biocénoses indiquait une résilience du milieu, mais une étude spatiale plus détaillée aurait été nécessaire. En effet, des problèmes au niveau de la concordance des cartographies de 1996--1997 et la réalité du terrain en 2012 posaient un problème d'interprétation.

La mobilité naturelle du sédiment, vraisemblablement accrue par la disparition d'une partie de l'herbier présent sur la zone à cause du naufrage, le rendait susceptible de masquer certaines portions du substrat dur (Meinesz et al., 1997). Toutefois, les écarts cartographiques des différentes biocénoses étaient suffisamment importants pour chercher d'autres éléments d'explication, notamment du point de vue technique(10). Il aurait été nécessaire de poursuivre le suivi des herbiers de posidonie et des populations de cystoseires avec des outils cartographiques adaptés tels que des photographies de drone de haute qualité, des balises fixées ou des outils de positionnement acoustique sous-marin. Une approche de type balisage aurait également été plus adaptée pour évaluer la recolonisation des populations de cystoseires et herbiers de posidonies, et leur retour à la normale.

Enfin, de nouveaux travaux ont révélé que la durée de résidence du blé a affecté la survie des herbiers, qui peuvent être détruits ou asphyxiés (ils se dégradent mais continuent de se reproduire voir de s'étendre). Au-delà d'une certaine durée, le manque de lumière tue l'herbier. Si le blé a été dispersé ou retiré avant d'atteindre le seuil létal, cela a réduit l'impact sur les herbiers (Leoni et al., 2007). Cette information est déterminante pour mettre en place des actions de dépollution rapide lors d'un prochain accident alimentaire.

III. Potentiel de restauration d'un habitat prioritaire suite au naufrage du Fénès : l'herbier de posidonie

Cette partie présente des solutions techniques et opérationnelles de restauration écologique de l'herbier de posidonie pour le site du naufrage et formule des recommandations pour améliorer les pratiques de restauration.

III. 1 Recolonisation naturelle de l'herbier de posidonie

III.1.1 Arrêt des pressions, la réapparition naturelle de *Posidonia oceanica* sur le site du naufrage

La réapparition naturelle des herbiers de *Posidonia oceanica* est peu courante et requiert un état de référence ainsi qu'une modification des conditions environnementales. Ce suivi est souvent effectué suite à une destruction locale ou à une amélioration globale de l'environnement. Pour suivre ce phénomène, deux approches sont utilisées : l'installation de repères fixes tels que des balises et le suivi de la croissance des faisceaux plagiotropes à l'aide de la l'épidochronologie (J.M Culioli 1998).

La reconstitution naturelle des écosystèmes contenant des herbiers de posidonie peut prendre un temps considérable après la fin des causes de leur destruction. Le front d'herbier à *P. oceanica* ne se propage en moyenne que de 3 à 4 cm par an (Meinesz et Lefèvre, 1984).

III.1.2 Une tentative de restauration écologique expérimentale sur le site du naufrage

Dans la première évaluation de l'impact du naufrage réalisée par J.M Culioli (1998), il annonçait la mise en place d'une étude pour évaluer la faisabilité de la réimplantation de *Posidonia oceanica* dans les zones sableuses au niveau des mattes mortes des touffes détruites par le blé. Cette tentative de restauration consiste à réimplanter 9 touffes d'herbier indépendantes, qui seront réparties dans trois zones sableuses où l'herbier a été détruit. Chaque touffe de 2x2 devra être constituée de 200 boutures de trois faisceaux minimum, selon une méthode brevetée par l'Université de Nice qui consiste à utiliser des boutures plagiotropes récoltées en profondeur et à les fixer à un tuteur. Cette méthode a été utilisée avec succès au Golfe de Juan (Alpes Maritimes) en 1993 (Molenaar et Meinesz, 1991).

(10) Vela A., Buron K., Monville I., 2012. Etat des communautés végétales de la zone impactée par l'accident du Fénès (Lavezzi, réserve naturelle des bouches de Bonifacio) – Contrat Sentinelle & OEC 33p.

La faisabilité de la transplantation sera testée en contrôlant neuf touffes chaque année pendant les deux années suivantes, avec un décompte des boutures et des faisceaux. L'objectif est d'atteindre un minimum de 80 % de boutures survivantes et de doubler le nombre total de faisceaux des boutures survivantes après deux ans afin d'évaluer le coût éventuel de la restauration globale du site. Cette tentative de restauration expérimentale n'a pas eu lieu à ce jour, aucun résultat n'a été publié (comm. Pers., Alexandre Meinesz, 2021).

III.2 Vers une restauration de l'herbier *Posidonia oceanica*

III.2.1 Objectifs d'un éventuel projet de restauration des herbiers sur le site du naufrage

L'objectif de ce projet de restauration de l'herbier de posidonie serait de restaurer les fonctions écologiques altérées dans une zone affectée par une pollution accidentelle de sulfure d'hydrogène (N₂S) due à la décomposition du blé, en transplantant des herbiers de posidonie. Cette transplantation d'herbiers de posidonie viserait à rétablir la fonction écologique de l'herbier dans cette zone dégradée par le naufrage du Fénès. Ce projet s'inspirerait de la terminologie proposée par Charles-François Boudouresque et Alexandre Meinesz (2006) : "On parle de renforcement des populations quand on relâche ou replante des individus d'une espèce menacée dans une région d'où elle n'a pas disparu, mais où ses effectifs sont considérés comme trop bas(11)".



Figure 18 : Illustrations de la zone I – partie nord © SINTINELLE – Etudes en Environnement (2012)

(11) Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinesz A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L. (2006). Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*.

III.2.2 Localisation et périmètre du projet de restauration

D'après les données bibliographiques collectées, ainsi que les résultats des suivis écologiques antérieurs effectués sur le site du naufrage, il serait cohérent d'utiliser le zonage préétabli par l'équipe scientifique pour maintenir une continuité dans les suivis. En conséquence, la zone I nord semble la plus appropriée pour la restauration des herbiers de posidonies en raison de son état de dégradation avancé par rapport aux autres zones (cf.II.3.4). La sélection de cette zone tient compte de la profondeur, qui doit être inférieure à celle des zones de récolte, du substrat, de préférence la matte morte, de la distance par rapport à la zone de récolte, ainsi que de la protection contre le mouillage. Cependant, il est recommandé de réaliser une plongée supplémentaire pour évaluer avec précision l'état des herbiers et déterminer la zone la plus adaptée pour la transplantation, car le dernier suivi remonte à il y a 11 ans (Figure 19). La localisation de la zone de restauration potentielle est présentée sur la Figure 18.

III.2.3 Analyse du sédiment

Avant toute chose, il serait nécessaire d'effectuer une analyse des sédiments sous-marins ayant subi une pollution accidentelle au sulfure d'hydrogène (N₂S) causée par la décomposition du blé :

- Prélever des échantillons de sédiments: il sera question de veiller à ce que les échantillons soient prélevés à différentes profondeurs et à différents endroits pour obtenir une représentation complète de la zone touchée.
- Analyser des sédiments en laboratoire : Il serait intéressant d'effectuer une analyse granulométrique pour déterminer la distribution de la taille des particules dans les échantillons de sédiments ainsi que la teneur en matières organiques afin d'évaluer l'impact de la pollution accidentelle sur la qualité du sédiment.
- Ces analyses pourraient aider à déterminer les zones où le blé a le plus affecté le fond marin et où nous pourrions envisager une transplantation de *P. oceanica*.

Une fois que la présence ou l'absence de N₂S aura été confirmée comme garantie de la viabilité de la transplantation de posidonie, nous serions en mesure de proposer une méthode adéquate.

III.2.4 Techniques de transplantation.

Dans le cadre du programme IZOMARE, les recherches bibliographiques ont montré que *Posidonia oceanica* a fait l'objet de nombreuses études de transplantation (Andromède Océanologie (2023), le rapport final du projet IZOMARE - Inventaire des zones marines côtières nécessitant des actions de restauration écologique et du paysage a été réalisé en collaboration avec l'Agence de l'eau). L'objet de ce mémoire n'est pas de faire une synthèse bibliographique sur les techniques de transplantation d'herbier existantes mais plutôt de proposer un protocole mis en place par la réserve après le naufrage. Mais que cela reste discutable. Au cours d'un échange téléphonique en mars 2023, A. Meinesz a souligné un paramètre qui s'est révélé déterminant dans ses projets de restauration : planter les boutures sur des fonds plus profonds que ceux où elles ont été récoltées.

On remarquera donc qu'il serait préférable de prélever les boutures sur un herbier vivant à proximité, car cela permet de connaître précisément leur provenance (profondeur) et de déterminer le nombre de faisceaux par bouture ainsi que le type de rhizomes (plagiotropes ou orthotropes). Ces informations seraient à retenir pour optimiser les conditions de la réimplantation (12).

(12) Aurélie Prunier, 2022, La transplantation des herbiers à *Posidonia oceanica*

1. *Posidonia oceanica* est une espèce protégée et le prélèvement de boutures, qu'elles proviennent de boutures flottantes ou d'un herbier naturel, est strictement interdit et soumis à des autorisations spécifiques. Pour obtenir des informations ou des autorisations en France, il est nécessaire d'établir des dossiers auprès de la Direction régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) et de la Direction Départementale des Territoires et des Mers (DDTM).
2. La saison optimale pour la transplantation des boutures plagiotropes est le printemps, avec un taux de survie de 92 % après trois ans, tandis que pour les boutures orthotropes, la saison idéale est l'automne, avec un taux de survie de 45 %. Cette différence de saison s'explique par le rôle de la température de l'eau dans le processus de cicatrisation des plaies des rhizomes (Meinesz et al. 1992).
3. Dans la continuité de l'étude de faisabilité proposé par J.M Culioli (1998), nous appliquerions le protocole la surface de la zone I- nord. Sous réserve d'une plongée de contrôle pour établir la surface réelle de la transplantation, nous baserions notre protocole sur 2500 m². Si chaque touffe de 2 mètres sur 2 est constituée de 200 boutures de 3 faisceaux minimum (13), cela représente une densité de 100 boutures/m². Pour couvrir une surface de 2500 m², il faudrait donc un total de 250 000 boutures (=100 boutures x 2500 m²). Nous appliquerons la méthode brevetée par l'Université de Nice, qui consiste à utiliser des boutures plagiotropes récoltées en profondeur et à les fixer à un tuteur. Il faudrait donc également prévoir 250 000 tuteurs pour accompagner les boutures.
4. Les boutures seraient récoltées sur l'herbier vivant en plongée sous-marine (Molenaar, H. 1992), en respectant un espacement minimal de 2 mètres entre chaque transplant pour préserver l'herbier existant.
5. Les touffes pourraient être transplantées sur un géotextile en fibre végétale. Une étude réalisée en 2021 sur l'utilisation de tapis dégradables sur la matre morte aux îles Capo Carbonara et Elba Island s'est avérée économiquement avantageuse et temporellement efficace. Ils permettent la restauration rapide de vastes zones d'herbiers de *P. oceanica* dégradés, sans nécessiter de structures permanentes. Cette approche facilite l'ancrage des boutures et des plantules en imitant les mécanismes naturels d'autorégulation de la plante, tout en favorisant la colonisation d'autres organismes benthiques, contribuant ainsi à la restauration des structures de l'écosystème(14). Ce type de structure peut être bénéfique pour la croissance des plantes, en particulier dans les zones côtières où les vagues et le vent peuvent être forts comme aux îles Lavezzi. Les boutures seraient fixées à l'aide d'agrafes biodégradables.

III.2.5 Proposition de suivi scientifique

Un suivi annuel, sur cinq ans minimum, serait préconisé et consisterait à :

- Évaluer la survie :
 1. Compter le nombre de boutures et de faisceaux dans chaque touffe;
 2. Évaluer le taux de survie des boutures et leur capacité à s'étendre (colonisation, taille moyenne des feuilles, couverture, densité biomasse (si possible))
- Évaluer l'efficacité de la restauration :
 1. Comparaison de l'état initial et de l'état final de la zone de transplantation (densité de posidonies, diversité d'espèces, etc.)
 2. Évaluation des fonctions écologiques restaurées (production primaire, stockage de carbone, habitat pour les espèces marines, etc.)

Évaluation de la stabilité du site et de la résilience des posidonies transplantées

(13) J.M Culioli, "Première évaluation de l'impact de l'échouage du navire Fénès sur l'environnement de la Réserve Naturelle des îles Lavezzi et perspectives scientifiques", janvier 1998.

(14) Piazza L, Acunto S, Frau F, Atzori F, Cinti MF, Leone L, Ceccherelli G. Environmental Engineering Techniques to Restore Degraded *Posidonia oceanica* Meadows. Water. 2021

- Gestion adaptative :

1. Réajustement de la méthode de transplantation si nécessaire

Mesures de gestion pour maintenir et restaurer les fonctions écologiques de la zone de transplantation.

III.2.6 estimation d'un budget

Entre 2017 et 2019, un projet de restauration de Posidonie a été mené dans l'Aire Marine Protégée (AMP) de Capo Carbonara et sur l'Île d'Elbe en Italie, couvrant une surface de 1 000 m², pour un coût total de 100 000 €. Ces coûts comprennent 10 jours de travail, avec 35 000 € alloués aux coûts du matériel, 15 000 € pour la collecte des boutures et 50 000 € pour le repiquage. Un projet similaire, nommé RenforC, a été réalisé dans la baie de Balistra en Corse entre 2021 et 2023, pour restaurer la Posidonie sur une surface d'environ 900 m², avec un coût total estimé à 80 000 €. Enfin, le projet REPIC mené depuis 2019 sur Golfe Juan et Beaulieu-sur-Mer, et qui devrait se terminer en 2024, prévoit la restauration d'une surface de 12 m² pour un coût estimé à 2 500 €, soit 210 000 € pour 1 000 m². Il convient de noter que ces coûts n'incluent pas les frais liés au suivi scientifique post-transplantation. En se basant sur ces études, pour restaurer 2 500 m², on estime un coût compris entre 230 000 € (RenforC) et 520 000 €, qui inclue le suivi scientifique et dépendent de facteurs tels que la profondeur de la zone de réimplantation et la provenance des boutures (15).

III.2.7 Les acteurs concernés

Le projet de restauration écologique du site du naufrage du Fénès impliquerait une collaboration entre plusieurs acteurs. Le maître d'œuvre et le maître d'ouvrage seraient responsables de la mise en œuvre du projet. Des financeurs soutiendraient financièrement cette initiative, tandis que des partenaires de recherche et d'assistance contribueraient à la mise en place et au suivi scientifique du projet.

III.3. Perspectives : des contraintes et réticences au projet

Selon les résultats du suivi écologique, il y a eu un impact notable sur 8 hectares dont une atteinte sévère sur 3,9 hectares avec, entre autres, destruction de 2 500 m² d'herbiers de posidonies (16). Bien que l'impact soit significatif, il reste relativement limité par rapport à la superficie totale de la réserve marine, qui s'étend sur 10 000 hectares. Cette situation peut inciter à la mise en place d'un projet de restauration écologique pour contribuer à la régénération de cette zone touchée, qui reste relativement modeste. Cependant un certain nombre de contraintes sont à prendre en compte.

Lors d'un échange téléphonique avec A. Meinesz, il m'a exprimé sa réserve quant à la restauration de la posidonie, considérant notamment son coût et les nouvelles lois de protection des espèces qui pourraient empêcher la réimplantation à partir de boutures récupérées, ou même de graines. Dans son livre Protéger la vie marine (2021), il souligne l'existence de conventions nationales de protection des espèces, tout en faisant remarquer que seulement une dizaine d'espèces sont réellement protégées selon la loi. Selon lui, il serait plus judicieux de protéger les espaces plutôt que les espèces, car peu de personnes, même naturalistes, sont capables de différencier les différentes espèces. En somme, il estime que la transplantation de posidonie semble complexe et craint que la législation s'y oppose pour les îles Lavezzi.

(15) Andromède Océanologie, 2023 (Andromède Océanologie (2023), le rapport final du projet IZOMARE - Inventaire des zones marines côtières nécessitant des actions de restauration écologique et du paysage a été réalisé en collaboration avec l'Agence de l'eau) + comm. Pers., Delaruelle, 2023.

(16) J.M Culioli Première évaluation de l'impact de l'échouage du navire Fénès sur l'environnement de la Réserve Naturelle des îles Lavezzi et perspectives scientifiques, janvier 1998.

Par ailleurs, il aurait pu être envisagé d'autres restaurations d'écosystèmes que celle de l'herbier de posidonie. En effet, de nombreux organismes ont souffert de la dégradation du blé comme des gorgones blanches, des oursins et des holothuries (Culioli, 1998). Les prairies de cystoseires ont été détruites au niveau des stations couvertes par le blé (Meinesz et al., 1996).



Figure 19 : Photographie : A. Meinesz, 1/05/1997, *Pinna nobilis* morte dans une zone couverte par le blé



Figure 20 : Photographie A. Meinesz, 1/05/1997, Gorgone couverte par un dépôt blanchâtre provenant du blé en décomposition

Conclusion:

Le naufrage du cargo Fénès en 1996 dans la Réserve Naturelle des Bouches de Bonifacio a eu des conséquences tragiques sur l'environnement marin, en particulier sur l'herbier de posidonie, un écosystème endémique de grande importance écologique. Cet événement a mis en évidence la nécessité de renforcer les mesures de prévention des accidents et de gestion des crises dans les zones maritimes protégées afin de préserver la biodiversité et la santé des écosystèmes marins.

La pollution causée par le déversement de la cargaison de blé et les produits pétroliers a eu des effets durables sur la biodiversité et les fonctions écologiques de la réserve. Cependant, il est encourageant de constater que des mesures ont été prises rapidement pour limiter la pollution et réparer les dommages causés. La jurisprudence établie en France, qui a contraint le pollueur à assumer les coûts de dépollution, constitue un exemple inédit de responsabilisation des acteurs impliqués dans de tels accidents.

Il est essentiel de poursuivre les efforts en matière de gestion durable des écosystèmes marins, en accordant une attention particulière à la prévention des accidents et à la restauration des habitats endommagés. Des mesures telles que la création de couloirs de navigation, l'augmentation des contrôles des navires, l'utilisation de techniques de restauration appropriées et la rapidité d'action peuvent contribuer à minimiser les risques de catastrophes écologiques et à favoriser la résilience des écosystèmes marins.

Bibliographie:

A. Meinesz, J-M Cottalorda, M. Braun, D. Chiaverini, J.M Culioli, et J-P Panzani. (1996). Impact de l'échouage du N/V Fenes sur l'environnement dans la Réserve naturelle des îles Lavezzi. Ed. LEML UNSA/ Réserve naturelle des îles Lavezzi-Cerbicale, 34 pp.

A. Meinesz. (2021). Protéger la biodiversité marine, chapitre "les atteintes au milieu marin".

A. Meinesz, J. de Vaugelas, J-M. Cottalorda, D. Chiaverini, J-P. Panzani, J.-M. Culioli, et P. Peschet. (1997). Impact de l'échouage du M/V Fénès sur l'environnement de la Réserve naturelle des îles Lavezzi, 3eme rapport. Ed. Laboratoire Environnement Marin Littoral Université de Nice-Sophia Antipolis, 50 pp.

A Meinesz. (2019-2020). Mer vivante édition 2019-2020, rédacteur en chef A. Meinesz.

A. Meinesz, N. Carvalho, D. Chiaverini, J.-M. Culioli, et J.-P. Panzani. (1996). Impact du N/V Fenes sur l'environnement de la Réserve Naturelle des Lavezzi un mois après l'échouage. Ed. Laboratoire Environnement Marin Littoral – Université de Nice-Sophia Antipolis.

A. Prunier. (2022). La transplantation des herbiers à *Posidonia oceanica*, mémoire de recherche.

Boudouresque C.-F., G. Bernard, P. Bonhomme, E. Charbonnel, G. Diviacco, A. Meinesz, G. Pergent, C. Pergent-Martini, S. Ruitton, et L. Tunesi. (2006). Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica*. Ramoge, 197 pp.

CEDRE. (1997). Bulletin d'information n°9 1er semestre 1997, Les dispersants.

Culioli, J.-M. (1998). Première évaluation de l'impact de l'échouage du navire Fenes sur l'environnement de la réserve naturelle des îles Lavezzi & perspectives de suivis scientifiques. Association de Gestion des Réserves naturelles des îles Lavezzi et Cerbicale.

Girin M. et Mamaca E. (2010). Pollutions chimiques accidentelles du transport maritime.

Leoni V., A. Vela, P. Pasqualini, C. Pergent-Martini, et G. Pergent. (2007). Effects of experimental reduction of light and nutrient enrichments (N and P) on seagrasses: a review. Aquatic Conserv: Mar. Freshw.

Marchand M., P. Le Guerroue, F. Jacq, et B. Fily. (1998). Accident du Fenes : aspects bactériologiques et chimiques de la fermentation du blé en milieu marin. Congrès du CIESM, Dubrovnik (Croatie) 1-8 juin 1998.

Piazzini L., S. Acunto, F. Frau, F. Atzori, M.F. Cinti, L. Leone, et G. Ceccherelli. (2021). Environmental Engineering Techniques to Restore Degraded *Posidonia oceanica* Meadows. Water.

Plan de gestion de la Réserve naturelle des Bouches de Bonifacio pour la période de 2007 à 2011.

Préservation et conservation des herbiers à *Posidonia oceanica* Boudouresque C.F., Bernard G., Bonhomme P., Charbonnel E., Diviacco G., Meinez A., Pergent G., Pergent-Martini C., Ruitton S., Tunesi L. (2006).

Protocole de prélèvement-transplantation de *Posidonie oceanica*. (2021). Direction départementale des territoires et de la mer des Bouches-du-Rhône. Récupéré sur https://www.bouches-du-rhone.gouv.fr/content/download/39539/224215/file/02_Protocole_prelev-transplant_Posidonie_Frioul_BIAM_2021.pdf

Tomasini, J.A., D. Collart, J.M. Culioli, et F. Ruchon. (1997). Rapport intermédiaire de la mission Fenes 97 T (16 juin - 30 juin 1997).

Tomasini J.A., D. Collart, J.M. Culioli, et F. Ruchon. (mars 1998). L'échouage du NN Fenes: impact sur l'ichtyofaune dans la Réserve naturelle des Îles Lavezzi (rapport préliminaire). Direction scientifique : J.P. Quignard.

Vela A., K. Buron, I. Monville. (2012). État des communautés végétales de la zone impactée par l'accident du Fenes (Lavezzi, réserve naturelle des bouches de Bonifacio) – Contrat Sentinelle & OEC 33p.

Walker T., O. Adebambo, M. Del, A. Feijoo, E. Elhaimer, T. Hossain, S. Johnston Edwards, C. Morrison, J. Romo, N. Sharma, S. Taylor, et S. Zomorodi. (2018). Environmental Effects of Marine Transportation.

Zaher Massoud. (1996). Pollution des Océans, "Problèmes d'environnement". Ed Lavoisier Tec et Doc.

Sitographie:

Site du CEDRE, Le problème des produits alimentaires, Fénès, dernière modification le 14/10/2002. <https://wwz.cedre.fr/Ressources/Accidentologie/Accidents/Fenes>