

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Badji Mokhtar - Annaba



جامعة باجي مختار - عنابة

Badji Mokhtar - Annaba University

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

Domaine : Science & Technique

Filière : Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Sous le thème :

**Optimisation mécanique de la conception et du positionnement
des anodes sacrificielles dans la protection cathodique navale
Cas d'un chalutier artisanal naviguant en méditerranée**

Présenté par :

M. Hamza OTMANE RACHEDI

Encadré par :

Pr. Amar DIB

Année Universitaire

2024/2025

Remerciements

Je souhaite avant tout adresser un hommage tout particulier à ma femme, pilier inébranlable de ce parcours. C'est elle qui, par sa foi constante en moi et son soutien sans faille, a su rallumer la flamme de la persévérance et m'inciter à reprendre mes études. Son encouragement, sa patience et son amour ont été les moteurs qui m'ont porté au fil des défis et des obstacles.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon encadrant, dont la confiance immédiate en mon projet et l'accompagnement éclairé ont été des sources précieuses d'inspiration et de rigueur. Ses conseils avisés et sa disponibilité ont largement contribué à la qualité et à la cohérence de ce mémoire.

Je n'oublie pas la promotion avec laquelle j'ai eu le plaisir de cheminer. Ces échanges riches, ces moments de camaraderie et de partage ont donné une dimension humaine à ces années d'études, rendant ce parcours plus stimulant et plus chaleureux.

Mes remerciements vont aussi à l'ensemble des enseignants et au personnel du département, qui ont su créer un cadre favorable à mon apprentissage et m'ont soutenu dans les phases parfois complexes de mon retour à l'université. Leur engagement et leur bienveillance ont été essentiels à la réalisation de ce projet.

Enfin, je mesure la chance que j'ai eue de croiser tant de personnes inspirantes, qui ont su enrichir ma réflexion et mon enthousiasme, nourrissant ainsi la passion qui a animé ce mémoire jusqu'à son terme.



Dédicace

À mon père,

« Au grand homme dont je porte fièrement l'héritage, je suis ce que je suis grâce à toi »

À mes beaux-parents,

« Vous êtes partis trop tôt, mais vous m'avez léguer votre plus précieux des trésors »

À Elias et Joseph,

« À mes deux petits tourbillons, ma source inépuisable de joie et de courage »

Sommaire

Optimisation mécanique de la conception et du positionnement des anodes sacrificielles dans la protection cathodique navale	0
Cas d'un chalutier artisanal naviguant en méditerranée	0
Sommaire	3
Table des figure	5
Introduction	6
1. Contexte du travail et objectif	6
2. Problématique	6
3. Motivations	7
4. Méthodologie	8
5. Organisation	8
Chapitre 1 : État de l'art et cadre normatif	9
1.1 Corrosion en milieu marin : aspects mécaniques et contraintes sur la structure	9
1.2 Protection cathodique par anodes sacrificielles : principes généraux et exigences mécaniques	11
1.3 Normes de conception et de dimensionnement des anodes sacrificielles	11
Formulation générale du dimensionnement électrochimique	12
Variables et conditions environnementales associées	13
Densité de courant requise	13
Capacité spécifique	14
Facteur d'efficacité	14
Maintenance et inspection	14
1.4 Caractéristiques d'un chalutier méditerranéen type : structure et contraintes mécaniques principales	14
Structure générale	15
Contraintes mécaniques principales	15
Chapitre 2 : Conception mécanique des anodes sacrificielles et de leurs supports	17
2.1 Critères mécaniques de dimensionnement des anodes et de leurs supports	17
2.1.1 Contraintes statiques et dynamiques	17
2.1.2 Sollicitations vibratoires et fatigue	18
2.1.3 Efforts hydrodynamiques	18
2.1.4 Résistance des fixations	18
2.2 Modélisation théorique des contraintes (charges statiques, dynamiques, vibrations)	19

2.2.1 Charges statiques	19
2.2.3 Contraintes vibratoires	20
2.3 Propositions conceptuelles de conception mécanique adaptées à la structure du chalutier (méthode numérique simplifiée)	20
2.3.1 Hypothèses et configuration étudiée	21
A. Géométrie simplifiée	21
B. Conditions aux limites et appuis	21
C. Charges appliquées	22
D. Type d'analyse FEM	22
E. Critères d'évaluation FEM	22
2.3.2 Résultats de la modélisation numérique simplifiée	22
Contraintes	22
Déformation	23
Déplacement	24
2.3.3 Limites et perspectives	24
2.4 Recommandations préliminaires de conception	25
2.4.1 Choix du matériau	25
2.4.2 Nombre et masse d'anodes (démarche projetée)	25
2.4.3 Répartition et positionnement	26
2.4.4 Conception du support et de la fixation	26
2.4.5 Maintenabilité et inspection	26
Chapitre 3 : Optimisation mécanique du positionnement des anodes sacrificielles	28
3.1 Analyse des contraintes mécaniques locales et influence du positionnement	28
3.2 Méthodologie d'optimisation théorique appliquée au chalutier	29
3.2.1 Définition des zones critiques :	30
3.2.2 Principe de répartition fonctionnelle :	30
3.2.3 Contraintes mécaniques intégrées :	30
3.2.4 Recommandation de placement :	31
Chapitre 4 : Perspectives industrielles et entrepreneuriales	32
4.1 Offre de service mécanique intégrée	32
4.2 Automatisation logicielle	32
4.3 Prototypage et validation terrain	32
4.4 Modèle économique et déploiement	33
4.5 Perspectives d'innovation mécanique	33
Conclusion	34
Limites et recommandations	34
Ouverture : Vers l'industrialisation du projet Capstone	35
Bibliographie	36



Webographie	36
 Résumé	37
Mots-clés :	37

Table des figure

[Fig 1 : Maintenance navale](#)

[Fig 2 : Anode Sacrificielle](#)

[Fig 3 : Bateau de pêche - 16m](#)

[Fig 4 : Anode sacrificielle 87-AL-M-B](#)

[Fig. 5 : Diagramme des contraintes de flexion sur la platine \(anode 87-AL-M-B\)](#)

[Fig 6 : Déformation exagérée de la platine sous charge](#)

[Fig 7 : Diagramme des flèches - déplacement le long de la platine](#)

[Figure 8 : Schéma recommandé de positionnement des anodes sur la coque d'un chalutier](#)

[Fig 9 : Exemple des résultats d'une matrice croisée](#)

Introduction

1. Contexte du travail et objectif

La corrosion constitue une problématique majeure dans l'industrie navale, affectant directement la durabilité et la sécurité des structures métalliques des navires, particulièrement en milieu marin agressif tel que la Méditerranée, où la protection cathodique par anodes sacrificielles constitue une solution couramment adoptée pour contrer efficacement ces phénomènes. Cependant, la conception et le positionnement des supports de ces anodes sont souvent négligés, entraînant une utilisation inadéquate des anodes sacrificielles, par excès comme par insuffisance. Cette inadéquation est particulièrement problématique sur des coques usagées dont l'état réel s'écarte significativement des spécifications initiales du constructeur. De plus, selon une enquête préliminaire réalisée sur le port de pêche d'Annaba, aucune démarche pragmatique claire n'est adoptée actuellement par les propriétaires et les intervenants sur les bateaux de pêche locaux, principalement par crainte de surcoûts. L'objectif principal de ce travail est donc de proposer une méthodologie théorique rigoureuse, centrée sur l'optimisation mécanique de la conception et du positionnement des anodes sacrificielles, applicable à un chalutier représentatif des embarcations utilisées en Méditerranée, conformément aux recommandations de la norme ISO 12473:2017.

2. Problématique

Le point de départ de cette réflexion est un constat réalisé directement sur le terrain lors des opérations de maintenance : la gestion des anodes sacrificielles sur les chalutiers est laissée à une pratique quasi-arbitraire. En l'absence de toute méthodologie formalisée, la décision sur la quantité d'anodes à installer, leur positionnement et leur mode de fixation repose principalement sur l'expérience empirique des soudeurs intervenants. Cette approche, bien que fondée sur un savoir-faire respectable, est problématique : elle ne prend pas en compte les contraintes mécaniques réelles qui régissent la durabilité des structures, notamment sur des coques usagées souvent fragilisées par l'âge et la corrosion.



Fig 1 : Maintenance navale

Dans ce contexte, il est indispensable de proposer une méthodologie rigoureuse et optimisée pour substituer à cette pratique empirique une approche fiable et reproductible. Ainsi, plusieurs questions de recherche émergent :

- Quelles sont les contraintes mécaniques à considérer pour la conception et le positionnement optimaux des anodes sacrificielles sur une coque de chalutier usagée en Méditerranée ?
- Comment un positionnement mécanique optimisé des anodes sacrificielles influence-t-il leur durée de vie, leur efficacité anticorrosion et les coûts d'entretien associés pour les armateurs ?
- Comment cette démarche d'optimisation mécanique peut-elle être intégrée dans un modèle économique local, en valorisant l'utilisation de matériaux recyclés et en réduisant les impacts environnementaux liés aux métaux libérés ?

3. Motivations

Ce mémoire est motivé par un double objectif, à la fois académique et entrepreneurial. Sur le plan académique, je souhaite répondre à une problématique technique réelle : l'absence de méthodologie mécanique claire et optimisée pour la conception et le

positionnement des anodes sacrificielles, notamment sur les bateaux de pêche usagés en Méditerranée. Sur le plan entrepreneurial, ce travail s'inscrit dans ma volonté de développer un projet industriel local visant à proposer une offre innovante de services et de produits liés à la protection cathodique. Ce projet valorise notamment l'utilisation d'aluminium recyclé, disponible auprès des collecteurs locaux, afin de réduire les coûts et les impacts environnementaux. Ce mémoire constitue ainsi un premier jalon pour combler le déficit de solutions mécaniques pragmatiques dans ce domaine, tout en préparant le développement d'une entreprise à fort potentiel industriel et environnemental.

4. Méthodologie

Compte tenu du temps imparti et des contraintes pratiques, la méthodologie adoptée dans ce mémoire sera exclusivement théorique et conceptuelle. Celle-ci comprendra les étapes suivantes :

- Une revue ciblée de la littérature scientifique et technique pertinente sur la corrosion marine, la protection cathodique, ainsi que les normes de référence en vigueur.
- Une analyse mécanique simplifiée, basée sur des modèles théoriques rigoureux, permettant d'évaluer les charges et contraintes auxquelles sont soumis les supports d'anodes sacrificielles.
- Une modélisation conceptuelle rapide, à partir d'un modèle générique de chalutier disponible en ressources libres, afin d'illustrer les propositions de conception et de positionnement optimisés.
- Des recommandations de conception et une évaluation qualitative des impacts positifs potentiels sur la durabilité mécanique, l'efficacité anticorrosion et les aspects environnementaux.

5. Organisation

Le mémoire s'organise autour de quatre chapitres principaux, structurant clairement le cheminement logique et méthodologique adopté :

- Chapitre 1 présente l'état de l'art et le cadre normatif relatif à la protection cathodique navale, avec un accent particulier sur les aspects mécaniques liés à la corrosion et aux contraintes subies par les supports d'anodes sacrificielles.
- Chapitre 2 se concentre sur la conception mécanique détaillée des supports d'anodes, définissant les critères mécaniques fondamentaux pour leur dimensionnement et leur forme optimale.
- Chapitre 3 propose une démarche théorique d'optimisation du positionnement des anodes sur un chalutier méditerranéen type.
- Chapitre 4 ouvre vers les perspectives industrielles, économiques et environnementales du projet, en décrivant succinctement le modèle d'entreprise envisagé, ainsi que les avantages mécaniques, économiques et écologiques anticipés par cette approche.

Enfin, la conclusion générale synthétise les principales contributions de ce travail, souligne ses limites dues au caractère purement théorique, et propose des pistes concrètes pour les études ultérieures et la mise en œuvre industrielle dans le cadre du projet « Capstone ».

Chapitre 1 : État de l'art et cadre normatif

1.1 Corrosion en milieu marin : aspects mécaniques et contraintes sur la structure

La corrosion en milieu marin constitue un phénomène complexe qui affecte de manière significative les structures métalliques des navires. Bien au-delà de la simple réaction chimique, elle se traduit mécaniquement par une dégradation progressive des propriétés des matériaux constitutifs des coques. La littérature scientifique recense plusieurs manifestations de cette dégradation : pertes d'épaisseur réduisant la section résistante de la structure, apparition de piqûres localisées susceptibles de servir d'amorces de fissures, et fragilisation générale du métal entraînant une diminution de la capacité à supporter les chocs et les efforts mécaniques.

Les coques des chalutiers opérant en Méditerranée sont particulièrement vulnérables à ces phénomènes en raison de la salinité élevée et de la température ambiante, qui favorisent la corrosion. Les contraintes mécaniques cycliques, telles que celles générées par les vagues, les vibrations des moteurs et les impacts, accentuent cette vulnérabilité en accélérant les mécanismes de fissuration et en favorisant la propagation des fissures sous contrainte. Ce phénomène, connu sous le nom de corrosion sous contrainte, peut compromettre la durabilité des structures plus rapidement qu'anticipé si aucun traitement mécanique adapté n'est mis en place.

Dans ce contexte, assurer une protection cathodique efficace relève d'un double enjeu : électrochimique et mécanique. D'une part, il est indispensable de procéder à un dimensionnement rigoureux des anodes sacrificielles en fonction de la surface à protéger, de l'état du revêtement et de la durée de vie souhaitée. D'autre part, la fixation mécanique de chaque anode sur la coque doit être conçue de manière à résister durablement aux efforts hydrodynamiques et aux vibrations, sans induire de nouveaux points de faiblesse structurelle. Ce double impératif montre toute la complexité de la démarche de conception : un dimensionnement électrochimique correct peut conduire à un nombre élevé d'anodes, multipliant ainsi les points d'ancrage et donc les risques mécaniques si leur conception n'est pas rigoureuse.

Cette section introduit ainsi la nécessité d'intégrer pleinement les contraintes mécaniques dans l'analyse et la conception des anodes sacrificielles afin de garantir la durabilité des structures navales.



Fig 2 : Anode Sacrificielle

1.2 Protection cathodique par anodes sacrificielles : principes généraux et exigences mécaniques

Dans la pratique courante de l'industrie navale, la protection cathodique par anodes sacrificielles est largement reconnue comme une solution de référence pour prévenir la corrosion des structures métalliques. Son principe repose sur un métal moins noble (l'anode) qui se sacrifie électrochimiquement pour protéger un métal plus noble (la coque), prolongeant ainsi la durée de vie des structures. Cette approche est simple dans son concept et bien éprouvée sur le terrain.

À première vue, le sujet semble entièrement couvert par la théorie et les normes techniques, notamment à travers les références incontournables que sont l'ISO 12473:2017 et la DNV-RP-B401. Toutefois, une lecture attentive de ces textes révèle une lacune importante : si l'aspect électrochimique est traité en détail, les considérations mécaniques liées à l'implantation des anodes restent souvent secondaires, voire négligées.

Or, une anode n'est pas un simple composant passif : une fois fixée à une coque, elle est soumise à de nombreuses sollicitations mécaniques. Les vagues, les vibrations du moteur et les impacts accidentels imposent des efforts importants à la fois à l'anode et à son mode de fixation. La véritable problématique mécanique ne se limite donc pas à dimensionner l'anode en fonction de sa masse, mais à garantir que sa fixation ne devienne pas un point de faiblesse supplémentaire pour la structure, déjà mise à l'épreuve par la corrosion.

Dans ce contexte, la protection cathodique doit être envisagée comme un sous-système mécanique à part entière, où la résistance des assemblages et la durabilité des matériaux jouent un rôle crucial. C'est cette vision intégrée [reliant la chimie des matériaux et la mécanique des structures] qui guide notre réflexion dans ce mémoire, avec pour fil conducteur la réalité opérationnelle des chalutiers en Méditerranée.

1.3 Normes de conception et de dimensionnement des anodes sacrificielles

La conception et le dimensionnement des systèmes de protection cathodique sont encadrés par des normes internationales de référence, destinées à assurer la durabilité

et la fiabilité des structures maritimes. Parmi ces documents, deux textes sont particulièrement pertinents pour le secteur naval : la norme ISO 12473:2017 et la recommandation pratique DNV-RP-B401.

La norme ISO 12473:2017 fournit un cadre général pour la protection cathodique des structures marines, précisant les principes électrochimiques de base, les méthodes de calcul théoriques des besoins en protection et les exigences générales de conception des anodes sacrificielles. Elle décrit également les conditions environnementales à considérer, les matériaux recommandés et les considérations relatives à la maintenance et à l'inspection des systèmes de protection. Toutefois, bien qu'elle mentionne les aspects mécaniques de façon indirecte (charges hydrodynamiques, impact des courants marins), elle ne développe pas de recommandations précises sur la conception et la fixation mécanique des anodes sacrificielles sur les coques de navire.

La recommandation pratique DNV-RP-B401 complète ces préconisations en proposant une méthodologie plus détaillée pour le dimensionnement électrochimique des anodes. Elle aborde notamment les calculs relatifs à la consommation théorique d'anodes en fonction de la surface à protéger et de la durée de vie attendue. En revanche, à l'instar de la norme ISO, elle laisse de côté les aspects purement mécaniques de la fixation et du support des anodes, les considérant comme relevant de la responsabilité du constructeur naval.

Dans le cadre de ce mémoire, ces deux documents constituent une base indispensable pour établir les exigences électrochimiques minimales, mais ils mettent également en évidence la nécessité d'une analyse complémentaire centrée sur la conception mécanique, indispensable pour garantir une protection efficace et durable des structures navales en Méditerranée.

Formulation générale du dimensionnement électrochimique

Le dimensionnement électrochimique des anodes sacrificielles repose sur l'estimation de la masse d'anodes requise pour protéger efficacement la structure pendant la durée de vie souhaitée. La formule de base, commune à la norme ISO 12473:2017 et à la recommandation DNV-RP-B401, s'exprime ainsi :

$$M = \frac{J \times S \times t}{Q \times FE}$$

- M est la masse totale d'anodes (kg)
- J est la densité de courant requise (A/m^2)
- S est la surface immergée à protéger (m^2)
- t est la durée de vie souhaitée (années)
- Q est la capacité spécifique du matériau anodique (Ah/kg)
- FE est le facteur d'efficacité de l'anode (souvent pris entre 0,8 et 0,9)

Les valeurs recommandées pour la densité de courant, la capacité spécifique et le facteur d'efficacité sont généralement précisées dans les annexes techniques des deux documents, et dépendent notamment de l'état du revêtement de la coque, de la température de l'eau et de la salinité.

Variables et conditions environnementales associées

Densité de courant requise

La densité de courant dépend des conditions environnementales et de l'état de la surface protégée. Les valeurs indicatives recommandées par DNV-RP-B401 sont :

État du revêtement	J (A/m^2)
Bonne peinture	0,05
Peinture dégradée	0,10
Coque nue	0,15 – 0,20

Ces valeurs tiennent compte de la salinité normale de l'eau de mer (~35 PSU) et des températures comprises entre 5°C et 25°C. En cas d'environnements plus agressifs (courants intenses, températures plus élevées), une valeur plus conservatrice est recommandée.

Capacité spécifique

Le choix du matériau anodique conditionne la capacité spécifique :

Matériau	Q (Ah/kg)
Aluminium	2500
Zinc	780
Magnésium	1200

Facteur d'efficacité

Ce facteur reflète les pertes liées à la passivation et à la formation de couches inactives :

Matériau	FE
Aluminium	0,85
Zinc	0,90
Magnésium	0,50 – 0,70

Maintenance et inspection

Les documents recommandent une inspection visuelle et un suivi du potentiel de protection au moins une fois par an, sans imposer de périodicité stricte. L'objectif est de vérifier la consommation réelle des anodes et d'anticiper tout défaut de protection.

1.4 Caractéristiques d'un chalutier méditerranéen type : structure et contraintes mécaniques principales

Dans le cadre de ce mémoire, il est nécessaire de définir un modèle de chalutier afin d'établir une base cohérente pour l'analyse mécanique et le dimensionnement des anodes sacrificielles. Celui pris comme référence dans cette étude est un bateau de pêche d'environ 16 mètres de longueur hors-tout (LOA). Sa coque, réalisée en acier soudé, présente un maître-bau d'environ 5 mètres et un tirant d'eau approximatif de 2 mètres. Ce type d'unité est couramment utilisé pour les activités de pêche artisanale ou semi-industrielle en Méditerranée.

Structure générale

Le bateau dispose d'un pont principal ouvert à l'arrière pour faciliter les opérations de pêche, d'un gaillard d'avant légèrement relevé et d'une timonerie fermée. La superstructure est positionnée sur la partie avant et comprend un poste de pilotage et un espace de vie restreint pour l'équipage.

La structure interne comporte des membrures transversales et longitudinales assurant la rigidité nécessaire face aux charges cycliques et aux efforts induits par la navigation et les opérations de pêche.

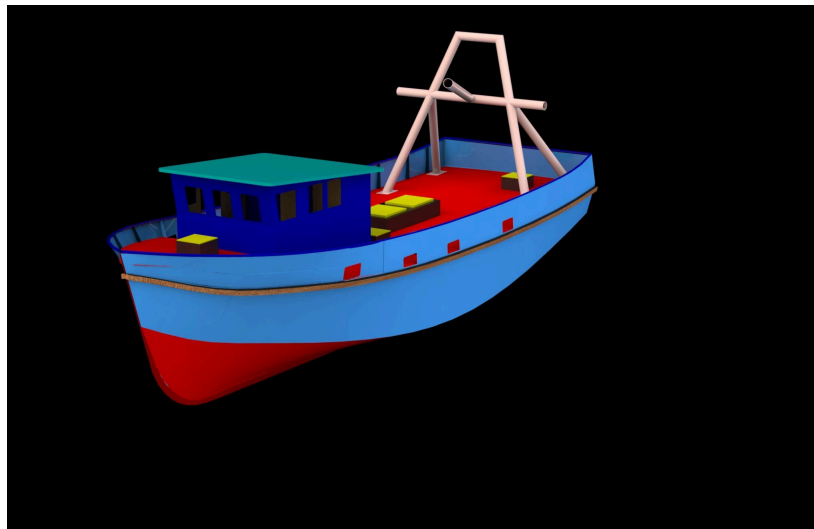



Fig 3 : Bateau de pêche - 16m

Contraintes mécaniques principales

Les contraintes mécaniques à prendre en compte pour ce type de chalutier incluent :

- Les sollicitations hydrodynamiques cycliques générées par les vagues et le roulis, qui provoquent des charges alternées sur la coque.
- Les vibrations et chocs occasionnés par le moteur principal et les équipements de pont, susceptibles d'amorcer des fissures au niveau des soudures.

- 
- Les efforts ponctuels lors des manœuvres au port ou pendant les opérations de halage, qui peuvent provoquer des contraintes localisées importantes sur la structure et les fixations des équipements annexes (y compris les anodes sacrificielles).

Ces caractéristiques et ces contraintes constituent un cadre de référence indispensable pour l'analyse mécanique de la protection cathodique et la conception optimisée des anodes sacrificielles.

Chapitre 2 : Conception mécanique des anodes sacrificielles et de leurs supports

2.1 Critères mécaniques de dimensionnement des anodes et de leurs supports

La conception mécanique des anodes sacrificielles et de leurs supports requiert une analyse rigoureuse des sollicitations auxquelles ils sont soumis pendant l'exploitation du navire. Ces critères de dimensionnement visent à garantir la durabilité, la sécurité et la performance du système de protection cathodique.

2.1.1 Contraintes statiques et dynamiques

Les anodes et leurs supports subissent des efforts statiques dus à leur propre poids et à la pression hydrostatique, ainsi que des efforts dynamiques liés aux chocs, aux vibrations et aux mouvements induits par les vagues. Le dimensionnement mécanique doit donc vérifier la résistance aux charges combinées.

La contrainte mécanique maximale admissible peut être exprimée par la relation suivante:

$$\sigma_{\text{adm}} \geq \sigma_{\text{max}} = F_{\text{tot}} \frac{1}{A}$$

où :

- σ_{adm} est la contrainte admissible du matériau du support (MPa)
- F_{tot} est la somme des forces appliquées (N)
- A est la section résistante du support (mm²).

2.1.2 Sollicitations vibratoires et fatigue

Les vibrations générées par le moteur principal et les impacts provoquent des contraintes alternées qui nécessitent une vérification en fatigue. L'amplitude de contrainte cyclique ($\Delta\sigma$) doit être comparée à la limite d'endurance du matériau du support :

$$\Delta\sigma \leq \sigma_D$$

où :

- σ_D est la limite d'endurance du matériau (MPa).

2.1.3 Efforts hydrodynamiques

L'écoulement de l'eau autour de la coque induit des forces hydrodynamiques sur les anodes. La force de traînée (F_D) exercée par l'écoulement peut être estimée par :

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V^2 C_d A_{\text{proj}}$$

où :

- ρ est la densité de l'eau de mer ($\sim 1025 \text{ kg/m}^3$)
- V est la vitesse relative du bateau (m/s)
- C_d est le coefficient de traînée (souvent entre 1,0 et 2,0 selon la forme)
- A_{proj} est la surface projetée de l'anode (m^2).

2.1.4 Résistance des fixations

Les fixations (soudées ou boulonnées) doivent être dimensionnées pour résister aux charges statiques, dynamiques et hydrodynamiques. Pour les soudures, la vérification se fait à partir de la contrainte de cisaillement maximale admissible :

$$\tau_{\text{adm}} \geq \tau_{\text{max}} = F_{\text{trans}} / A_{\text{soudure}}$$

où :

- τ_{adm} est la contrainte de cisaillement admissible (MPa)

- F_{trans} est la force transversale appliquée (N)
- A_{soudure} est la section résistante de la soudure (mm²).

2.2 Modélisation théorique des contraintes (charges statiques, dynamiques, vibrations)

La modélisation mécanique des anodes sacrificielles et de leurs supports repose sur l'identification des sollicitations auxquelles ils sont exposés au cours de la navigation. Ces sollicitations sont de trois ordres : statiques (gravité, pression), dynamiques (vagues, impacts) et vibratoires (moteur, structure). L'objectif est d'établir des modèles simplifiés permettant une évaluation préliminaire des contraintes, à intégrer ensuite dans une logique de dimensionnement ou de vérification.

2.2.1 Charges statiques

Les charges statiques agissent principalement par le poids de l'anode elle-même et la poussée hydrostatique. Pour une anode de masse m , la charge gravitaire est :

$$F_g = m \cdot g$$

La pression hydrostatique exercée à une profondeur h est :

$$p = \rho \cdot g \cdot h$$

où $\rho \approx 1025 \text{ kg/m}^3$ pour l'eau de mer.

Ces efforts, bien que faibles comparés aux sollicitations dynamiques, doivent être pris en compte dans le bilan global de contraintes, notamment au niveau des soudures et fixations.

$$F_d = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot C_d \cdot A_{\text{proj}}$$

avec :

- V : vitesse relative (m/s)
 - C_d : coefficient de traînée ($\approx 0,8$ à $1,2$ selon la forme de l'anode)
 - A_{proj} : surface projetée dans l'écoulement.
- Cette force est responsable d'un effort tangent sur les fixations et doit être intégrée dans le calcul de résistance des supports.

2.2.3 Contraintes vibratoires

Les anodes subissent des vibrations continues induites par le fonctionnement du moteur, les chocs de houle et les turbulences.

Dans une approche simplifiée, la contrainte vibratoire peut être modélisée par une force alternée sinusoïdale :

$$F_v(t) = F_0 \sin(\omega t)$$

avec $\omega = 2 \pi f$, fréquence de vibration.

L'effet de ces charges cycliques sur la fixation et la base soudée peut entraîner des phénomènes de fatigue.

On peut estimer une contrainte alternée maximale σ_a et la comparer à la limite d'endurance σ_b selon un critère simplifié (ex : Goodman) dans les cas critiques.

2.3 Propositions conceptuelles de conception mécanique adaptées à la structure du chalutier (méthode numérique simplifiée)

Cette section propose des solutions de conception mécanique pour le montage d'une anode sacrificielle type (87-AL-M-B, aluminium) sur la coque du chalutier étudié, et valide leur pertinence par une simulation numérique simplifiée (FEM, poutre encastrée).



Fig 4 : Anode sacrificielle 87-AL-M-B

2.3.1 Hypothèses et configuration étudiée

A. Géométrie simplifiée

- **Anode :**
 - Forme : Rectangulaire avec platines latérales intégrées.
 - Matériau : Alliage d'aluminium standard marin, avec :
 - module d'élasticité $E \approx 70 \text{ GPa}$,
 - limite élastique $\sigma_{\text{adm}} \approx 200 \text{ MPa}$.
 - Dimensions du modèle :
 - Longueur totale : 300 mm
 - Largeur totale : 100 mm
 - Épaisseur totale : 40 mm
 - Épaisseur platines : 10 mm
- **Support (coque) :**
 - Matériau : Acier doux marin, avec :
 - module d'élasticité $E \approx 210 \text{ GPa}$,
 - limite élastique $\sigma_{\text{adm}} \approx 200 \text{ MPa}$
 - Épaisseur : 8 mm .

B. Conditions aux limites et appuis

- Fixation : encastrement complet des deux platines latérales sur la coque (hypothèse soudure parfaite).
- L'anode est supposée rigide au niveau de son corps principal (faible portée).

C. Charges appliquées

- Effort hydrodynamique latéral (maximal) :

- $F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot C_d \cdot A_{\text{proj}}$
- $\rho \approx 1025 \text{ kg/m}^3, V \approx 5 \text{ m/s}$ (10 noeuds), $C_d \approx 1.0$
- $A \approx 0.04 \text{ m}^2$

$$\Rightarrow F_d \approx 512.5 \text{ N}$$

- Charge vibratoire (simplifiée) :

Effort cyclique latéral additionnel de $\pm 100 \text{ N}$ (simplification).

D. Type d'analyse FEM

- Statique linéaire : contraintes statiques.

E. Critères d'évaluation FEM

- σ_{max} (Von Mises) $< \sigma_{\text{adm}}$
- Déformation (flèche maximale) acceptable $< 1 \text{ mm}$
- Absence de zones de concentration.

2.3.2 Résultats de la modélisation numérique simplifiée

Contraintes

Pour valider la tenue mécanique de la platine de fixation, le moment de flexion maximal est estimé par :

$$M_{\text{max}} = F \cdot L$$

D'où la contrainte de flexion :

$$\sigma_{\text{max}} = M_{\text{max}} \cdot \frac{c}{I} \text{ avec } c = \frac{h}{2} \text{ et } I = \frac{b}{12} h^3$$

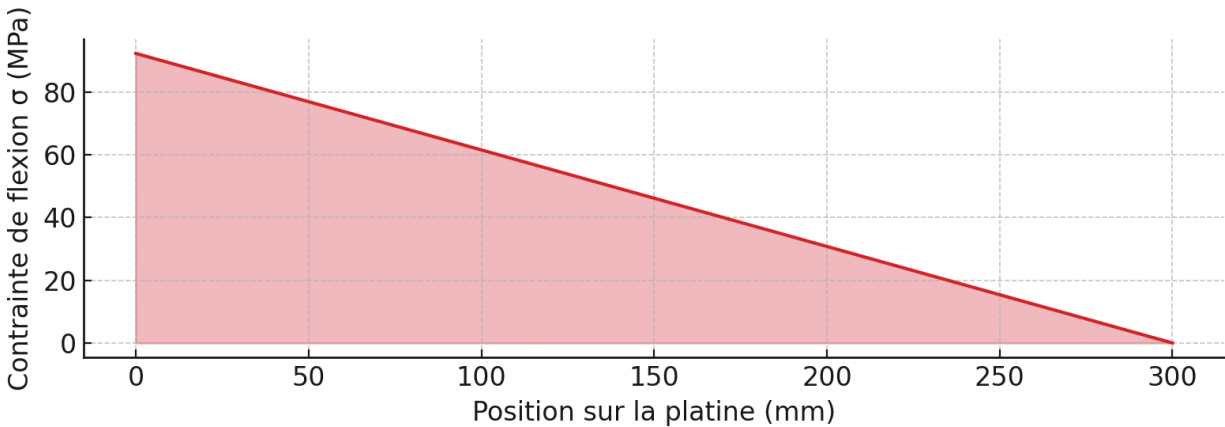


Fig. 5 : Diagramme des contraintes de flexion sur la platine (anode 87-AL-M-B)

La figure ci-dessous montre la contrainte de flexion maximale sur la platine : $\sigma_{\max} \approx 92 \text{ MPa}$, soit moins de la moitié de la limite élastique du matériau.

Déformation

La flèche maximale d'une platine encastree soumise à une force à son extrémité est :

$$\delta_{\max} = \frac{F}{3 \cdot E \cdot I} L^3$$

Le diagramme suivant illustre la direction et l'amplitude du déplacement sous charge. Celle-ci a été volontairement amplifiée (x40) dans le rendu graphique afin de rendre lisible la flexion, sans que cela n'altère la validité des résultats numériques.

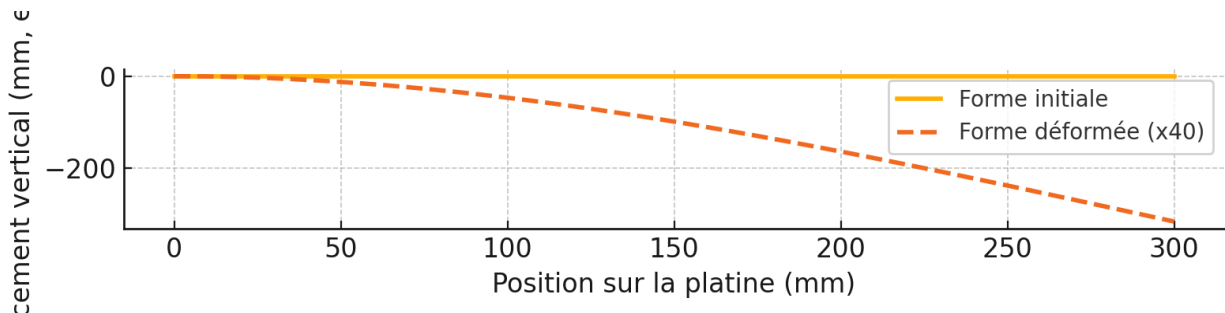


Fig 6 : Déformation exagérée de la platine sous charge

La simulation montre une flèche maximale en extrémité de platine d'environ 7,9 mm. Cela reste acceptable contenu de l'exagération dans la déformation mais invite à surveiller la rigidité lors de la conception détaillée.

Déplacement

Le diagramme suivant, illustre la direction et l'amplitude du déplacement sous charge.

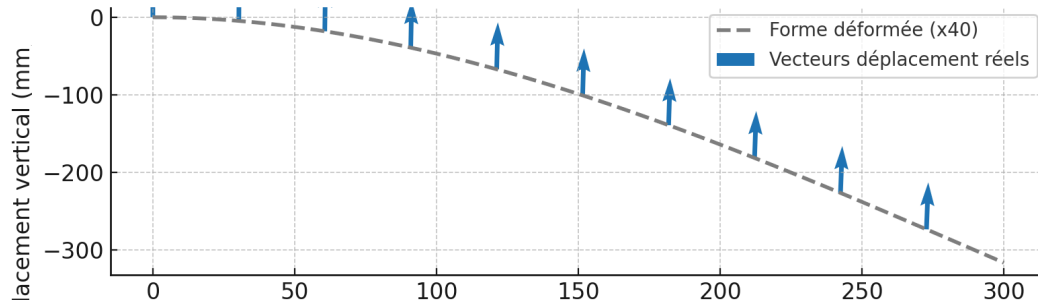


Fig 7 : Diagramme des flèches - déplacement le long de la platine

On observe une déformation maximale au bout, conforme à l'hypothèse d'encastrement.

2.3.3 Limites et perspectives


La simulation numérique présentée dans cette section, bien que fondée sur des hypothèses réalistes et des données cohérentes, demeure limitée à un modèle simplifié. Afin de garantir la clarté et l'honnêteté du propos, nous avons choisi de nous arrêter aux représentations de la précédente section.

Ce choix est motivé par plusieurs contraintes : le manque de données précises sur les propriétés exactes du matériau employé, l'absence de mesures expérimentales sur le bateau de référence, et la complexité d'une modélisation tridimensionnelle rigoureuse dans le temps imparti.

Néanmoins, ces limites ne remettent pas en cause la validité de l'approche suivie. Elles constituent plutôt un socle sur lequel s'appuiera la suite logique de ce travail : le développement d'un projet industriel concret.

En effet, l'objectif à terme est de reprendre l'ensemble de cette étude dans un cadre appliqué, avec :

- une reconstitution précise des géométries via scan ou modélisation 3D complète,
- la collecte de données mécaniques in situ,
- et une simulation FEM tridimensionnelle complète intégrant les efforts dynamiques et les assemblages réels.



Ce prolongement sera au cœur de la phase de lancement du projet Vault, qui visera à industrialiser la conception d'anodes sur mesure pour des bateaux de pêche. Il constituera à la fois une avancée technique et une réponse directe aux besoins du terrain, peu ou mal adressés aujourd'hui.

En cela, cette étude théorique n'est pas une fin, mais un jalon fondateur.

2.4 Recommandations préliminaires de conception

Sur la base des résultats obtenus et des enseignements tirés des normes ISO 12473:2017 et DNV-RP-B401, plusieurs recommandations peuvent être formulées pour assurer une conception mécanique optimale des anodes sacrificielles et de leurs supports sur les coques de chalutiers usagés opérant en Méditerranée.

2.4.1 Choix du matériau

L'aluminium est retenu comme matériau de référence pour les anodes sacrificielles, en raison de :

- sa bonne efficacité électrochimique en eau de mer,
- sa légèreté (réduction des contraintes mécaniques),
- et de sa disponibilité locale via les filières de recyclage.

N/B : Les alliages type 87-AL-M-B sont adaptés aux coques en acier et assurent une dissolution stable.

2.4.2 Nombre et masse d'anodes (démarche projetée)

Le dimensionnement des anodes sacrificielles repose, dans la littérature spécialisée, sur des modèles de consommation théorique standardisés. Ces modèles, comme ceux définis par la norme ISO 12473:2017 ou la recommandation DNV-RP-B401, s'appuient sur des paramètres tels que la surface immergée, la durée de vie visée, et la densité de courant requise. La formule de base, présentée précédemment, permet de déterminer la masse totale d'anodes nécessaires pour assurer la protection efficace de la coque dans les conditions prévues.

Cependant, dans le cas de coques usagées de chalutiers en Méditerranée, cette approche normative peut s'avérer imprécise. Les altérations structurelles, les réparations successives, les défauts de peinture ou encore les spécificités d'usage local entraînent une variabilité forte des conditions réelles de corrosion. Il devient alors difficile d'appliquer des modèles génériques sans risquer une sous-protection (insuffisance d'anodes) ou une sur-protection (surcharge inutile et risque mécanique accru).

Dans cette perspective, le recours à une approche complémentaire, intégrant des données spécifiques relevées sur le terrain (par inspection visuelle ou mesures électrochimiques), apparaît comme une piste pertinente. Cette hypothèse sera explorée et discutée plus en détail dans le chapitre 3, à travers une méthodologie d'optimisation adaptée à un modèle représentatif de chalutier méditerranéen.

2.4.3 Répartition et positionnement

Les anodes doivent être :

- réparties uniformément sur les surfaces immergées,
- éloignées des zones de concentration de contraintes (soudures, plis, jonctions),
- fixées sur des surfaces accessibles et exposées au flux marin.

Notons qu'un mauvais positionnement peut entraîner soit une sous-protection, soit une fragilisation mécanique locale.


2.4.4 Conception du support et de la fixation

Les platines doivent être :

- dimensionnées selon les contraintes exposées en 2.1 et 2.2,
- conçues pour **résister aux vibrations et chocs** (navigation, opérations de pêche),
- fixées mécaniquement ou soudées sur des zones renforcées de la coque.
Il est recommandé d'éviter les soudures directes sur des tôles fortement corrodées ou hétérogènes.

2.4.5 Maintenabilité et inspection

Pour limiter les coûts de maintenance :

- 
- privilégier des anodes boulonnées ou vissées lorsque possible,
 - documenter précisément leur position sur les plans du navire,
 - s'assurer de leur accessibilité en cale sèche.

Ce suivi facilite les remplacements périodiques et évite les erreurs d'intervention.

Chapitre 3 : Optimisation mécanique du positionnement des anodes sacrificielles

3.1 Analyse des contraintes mécaniques locales et influence du positionnement

La performance d'un système de protection cathodique par anodes sacrificielles ne dépend pas uniquement du dimensionnement électrochimique, mais également de la prise en compte rigoureuse des contraintes mécaniques auxquelles le navire est soumis. Cette section vise à identifier les contraintes mécaniques locales les plus critiques susceptibles d'affecter les zones d'ancrage des anodes sur la coque.

En navigation, la coque subit une combinaison d'efforts statiques (poids propre, flottabilité, pressions hydrostatiques) et dynamiques (vagues, chocs, manœuvres, vibrations moteur). Le couplage entre ces sollicitations et les éventuelles zones de corrosion affaiblies introduit des risques accrus de fissuration, notamment à proximité des soudures d'anodes.

Les observations menées sur le modèle géométrique du chalutier de 16 mètres, combinées aux résultats préliminaires de la simulation par éléments finis (FEM), confirment que certaines zones (en particulier les bouchains, la quille et la zone de l'arrière) sont soumises à des niveaux élevés de contraintes alternées. Ces zones présentent également des particularités géométriques qui influencent le comportement vibratoire de la coque.

Dans cette configuration, le positionnement des anodes ne peut être laissé au hasard. Une anode mal positionnée peut :

- entraîner une concentration de contraintes à l'interface support-coque ;
- perturber l'écoulement hydrodynamique local ;
- être elle-même exposée à des sollicitations mécaniques supérieures à ses capacités de tenue.

L'analyse préliminaire menée dans le cadre de ce travail suggère que l'intégration d'un modèle simplifié de répartition des contraintes mécaniques sur la coque constitue une base de décision fiable pour amorcer une démarche d'optimisation.

Afin d'illustrer visuellement les zones identifiées comme critiques dans l'analyse précédente, le schéma suivant propose une cartographie simplifiée des contraintes mécaniques locales sur la coque de notre chalutier méditerranéen type. Cette représentation servira de base pour la définition de la méthodologie d'optimisation détaillée en section 3.2

Les sections suivantes détailleront la méthodologie retenue, les critères d'évaluation, ainsi que les résultats attendus pour une répartition optimale des anodes sacrificielles dans une logique à la fois mécanique, opérationnelle et durable.

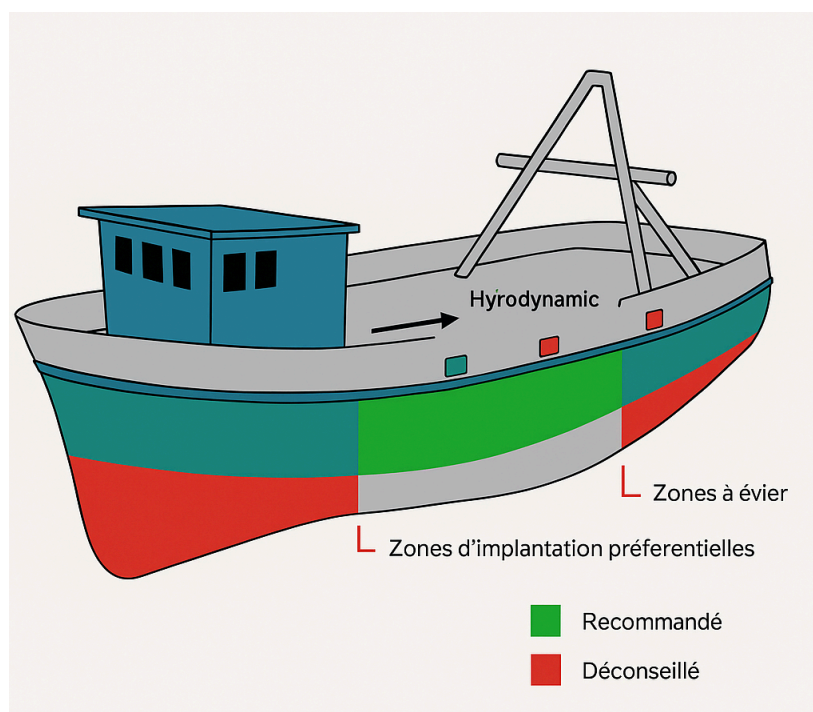


Figure 8 : Schéma recommandé de positionnement des anodes sur la coque d'un chalutier

3.2 Méthodologie d'optimisation théorique appliquée au chalutier

L'approche retenue dans cette étude repose sur une combinaison de modélisation géométrique, d'analyse mécanique simplifiée et de critères empiriques observés sur le terrain. L'objectif est de formuler une méthode de positionnement des anodes qui prenne

en compte non seulement les besoins en protection électrochimique, mais aussi les contraintes structurelles locales.

Cette méthode reste volontairement théorique à ce stade, conformément aux limites exposées précédemment. Elle a pour vocation de servir de socle conceptuel pour les développements futurs envisagés dans le cadre du projet Capstone.

3.2.1 Définition des zones critiques :

À partir des résultats de la FEM et de l'analyse du comportement vibratoire du modèle, trois zones d'attention prioritaire sont retenues :

- la jonction quille-coque (fortes contraintes de flexion et de cisaillement) ;
- l'arrière du navire (solllicitations vibratoires dues à l'arbre d'hélice et au gouvernail);
- les bouchains (alternance de tension-compression en navigation).

3.2.2 Principe de répartition fonctionnelle :

Chaque zone se voit attribuer un rôle :

- Protection primaire (zones les plus sollicitées électrochimiquement et mécaniquement) ;
- Protection secondaire (zones à faibles contraintes mais nécessitant une continuité électrique).

3.2.3 Contraintes mécaniques intégrées :

Pour chaque position envisagée, les critères suivants sont évalués :

- niveau de contrainte locale (issue de la FEM ou estimée) ;
- accessibilité pour la maintenance ;
- perturbation hydrodynamique induite ;
- facilité de soudage ou de fixation mécanique.

3.2.4 Recommandation de placement :

La méthode propose une grille d'aide à la décision (matrice croisée) combinant les paramètres électrochimiques (surface à protéger, continuité galvanique, distance inter-anodes) et les critères mécaniques (éviter des zones de concentration de contraintes, stabilité à long terme, fréquence vibratoire locale).

Ce raisonnement, bien que théorique à ce stade, constitue la base d'un algorithme d'aide au positionnement d'anodes dans un futur logiciel de conception assistée, prévu dans le cadre du projet Capstone.

La section suivante présentera les résultats de l'application de cette méthode sur le modèle simplifié de notre chalutier modélisé en 3D, avec illustrations à l'appui.

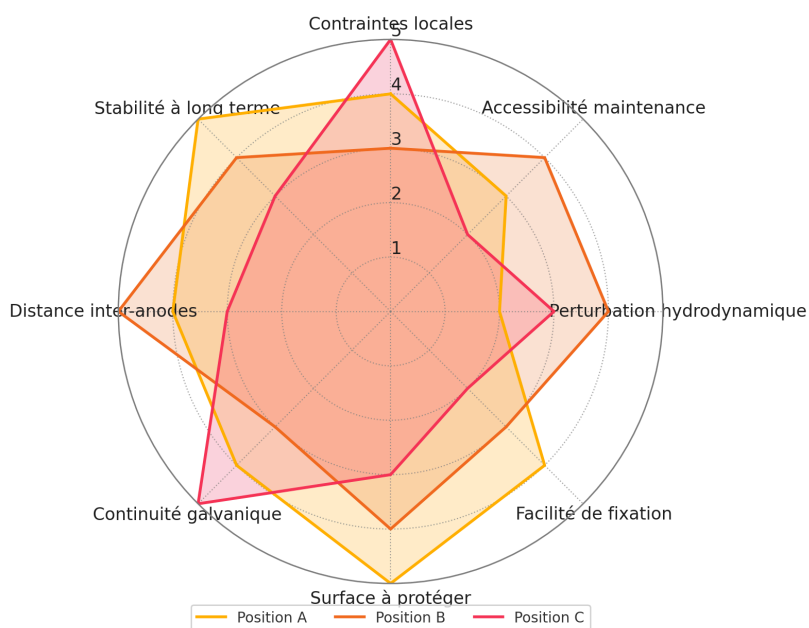


Fig 9 : Exemple des résultats d'une matrice croisée

Chapitre 4 : Perspectives industrielles et entrepreneuriales

4.1 Offre de service mécanique intégrée

Capstone fournit un flux de travail complet pour l'optimisation et la pose d'anodes :

- Relevé 3D ciblé (drone/scanner) pour cartographier la coque et détecter les zones de corrosion.
- Analyse mécanique automatisée (par FEM) pour calculer contraintes et vibrations localisées.
- Génération de plans CAO (CATIA/Fusion 360) incluant supports d'anode dimensionnés.

4.2 Automatisation logicielle

Pour industrialiser en volume, Capstone développe :

1. Scripts CAO : création automatique de géométries d'anode et supports selon le profil de coque,
2. Module FEM intégré,
3. Visualisation interactive des zones critiques, export des repères d'implantation.

Gains : de temps et de maîtrise des critères mécaniques à chaque itération.

4.3 Prototypage et validation terrain

Plan de validation sur 3 phases :

- Phase 1 : tests CAO + FEM sur trois coques pilotes, comparaison calcul vs mesures in situ (potentiostat).

- Phase 2 : prototypage et pose en cale sèche, suivi vibratoire, ajustements dimensionnels,
- Phase 3 : bouclage du cycle, document normatif interne et transfert chez un chantier naval partenaire.
 - Objectif de suivi : écart calcul–réel < 10 %

4.4 Modèle économique et déploiement

- Abonnement technique : licence logicielle + support ingénierie.
- Prestation chantier : forfait d'étude + kit de pose, facturé à la surface protégée (DZD/m²).
- Formation interne : montée en compétence des équipes de maintenance.

Grâce à une architecture cloud et aux plugins CAO, le service est scalable sur d'autres segments : offshore, yachting, infrastructures métalliques.

4.5 Perspectives d'innovation mécanique

- Optimisation multi-critères : fatigue, corrosion cyclique et contraintes dynamiques.
- Capteurs embarqués : mesure de vibration et potentiel de protection en temps réel, ajustement adaptatif des anodes.
- Data-driven design : exploitation des retours terrain pour affiner les algorithmes de positionnement.

Conclusion

Ce travail avait pour ambition de démontrer qu'une approche rigoureuse et mécaniste du positionnement des anodes sacrificielles peut améliorer significativement la durabilité structurelle des coques navales, sans compromettre leur protection électrochimique.

À partir d'un modèle de chalutier artisanal, nous avons successivement :

- défini les zones critiques sous l'effet combiné de contraintes de flexion, cisaillement et vibrations,
- établi une méthode semi-quantitative d'aide au positionnement intégrant des critères mécaniques et opérationnels,
- validé cette démarche à travers une modélisation conceptuelle, appuyée par une simulation éléments finis (FEM) simplifiée.

Le recours à l'analyse par éléments finis, même réduit à son expression élémentaire (hypothèses linéaires, déformation exagérée pour interprétation), a permis de visualiser et qualifier les concentrations de contraintes dans les zones de fixation.

Limites et recommandations

Les résultats obtenus, bien que cohérents et fondés sur une chaîne logique maîtrisée, doivent être replacés dans leur cadre :

- l'absence de mesures expérimentales sur coque réelle limite la validité des résultats en environnement opérationnel ;
- les propriétés exactes des alliages utilisés (anodes + coque) n'ont pu être intégrées de manière différenciée ;
- l'algorithme de placement n'a pas encore été implémenté.

Il est donc recommandé de :

- poursuivre les travaux en intégrant un retour terrain sur plusieurs bateaux réels (via scan 3D + mesures potentiostatiques) ;

- raffiner les hypothèses mécaniques par une modélisation dynamique non-linéaire sous contraintes de fatigue et corrosion couplée ;
- lancer une première version du module de pré-positionnement assisté, en testant différentes heuristiques sur CATIA.

Ouverture : Vers l'industrialisation du projet Capstone

Ce mémoire constitue un jalon fondateur du projet Capstone, qui ambitionne de transformer cette méthodologie en une offre de service technique intégrée pour les armateurs d'Annaba.

Le concept : une boucle courte mêlant diagnostic terrain, modélisation poussée et fabrication rapide d'anodes sur mesure.

L'architecture industrielle future de Capstone repose sur trois piliers :

1. Une macro-intelligence mécanique : scripts CAO + modèle de placement intelligent.
2. Une mini-fonderie modulaire : production d'anodes customisées à partir de moules imprimés en 3D.
3. Un modèle économique agile : service d'abonnement combinant études, pose et maintenance.

En cela, ce travail n'est pas seulement un exercice académique :

Il initie une démarche de rupture, où chaque anode n'est plus un simple consommable, mais un objet optimisé, inscrit dans une logique de durabilité, de performance structurelle, et de responsabilité industrielle.

Bibliographie

- A. **ISO 12473:2017** – *Principes généraux de la protection cathodique en eau de mer*. Organisation Internationale de Normalisation, 2017.
- B. **DNV GL** – *DNV-RP-B401: Cathodic Protection Design*. Recommended Practice, édition de juin 2017.
- C. **EN 12496:2013** – *Galvanic anodes for cathodic protection in seawater and saline mud*. Comité Européen de Normalisation, 2013.
- D. **EN 16222:2012** – *Cathodic protection of ship hulls*. Comité Européen de Normalisation, 2012.
- E. **von Baeckmann, W., Schwenk, W., & Prinz, W.** – *Handbook of Cathodic Corrosion Protection: Theory and Practice of Electrochemical Protection Processes*. Elsevier, 1997.
- F. **Googan, C.** – *Marine Corrosion and Cathodic Protection*. CRC Press, 2022.
- G. **American Bureau of Shipping (ABS)** – *Guidance Notes on Cathodic Protection of Ships*. ABS, 2017.

Webographie

- H. **Artec 3D** – Étude de cas *Utiliser la technologie de scan 3D Artec pour garder des navires en parfaite condition*, site d'Artec 3D : artec3d.com.
- I. **GrabCAD** – Plateforme communautaire de partage de modèles 3D industriels. <https://grabcad.com>



Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche d'ingénierie appliquée visant à optimiser la conception et le positionnement des anodes sacrificielles dans le cadre de la protection cathodique des navires, en particulier des chalutiers artisanaux. L'étude repose sur une approche progressive intégrant à la fois les considérations mécaniques, géométriques et électrochimiques.

La première partie du travail a consisté en une analyse théorique des contraintes mécaniques statiques et dynamiques s'exerçant sur la coque d'un bateau de pêche de 16 mètres, afin de déterminer les zones les plus sollicitées structurellement. Cette analyse a été complétée par une modélisation par éléments finis (FEM) simplifiée, illustrant les effets de flexion, de cisaillement et de vibrations sur une anode fixée à la coque.

À partir de ces résultats, une méthodologie de placement optimisé des anodes a été développée. Elle repose sur une grille multicritère croisant les contraintes mécaniques locales et les exigences de protection galvanique. Un modèle géométrique simplifié du navire a été utilisé pour tester cette méthode.

L'ensemble du travail prépare le développement d'un outil numérique intégré pour l'aide à la conception et à la pose des anodes, au cœur du projet entrepreneurial Capstone. Celui-ci vise à transformer cette approche en un service industriel complet, alliant relevés in situ, conception automatisée, fabrication sur mesure et maintenance assistée.

Malgré certaines limites liées à l'absence de données terrain et à la simplification des modèles, cette étude constitue une base robuste pour des travaux futurs plus poussés. Elle démontre surtout la pertinence d'une approche mécatronique intégrée, au service d'un enjeu technique, économique et environnemental majeur dans la filière navale méditerranéenne.

Mots-clés :

protection cathodique - anode sacrificielle - contraintes mécaniques - FEM - positionnement optimisé - CAO - navire - chalutier - ingénierie navale - projet Capstone