

ARTICLE

Diffusion des systèmes de diagnostic à distance pour navires: une analyse économique et de gouvernance fondée sur un modèle multi-agents

Ilia Maslov, ORCID: 0000-0001-6105-9979, ilia.maslov@chubb.com^a and Gerasimos Theotokatos, ORCID: 0000-0003-3547-8867, gerasimos.theotokatos@strath.ac.uk^b

^aChubb European Group SE, Paris, France; ^bMaritime Safety research Centre, Department of Naval Architecture, Ocean & Marine Engineering, University of Strathclyde, Glasgow, United Kingdom

ARTICLE HISTORY

Compiled April 22, 2026

ABSTRACT

Les systèmes numériques de diagnostic à distance offrent un mécanisme potentiel permettant d'étendre la couverture des inspections entre les visites réglementaires, mais l'adoption à l'échelle des flottes des systèmes de monitoring et de diagnostic à distance demeure limitée en raison d'incitations mal alignées et de frictions de financement. Cette étude vise à développer une approche de modélisation multi-agents afin de quantifier les conditions technologiques, financières et institutionnelles dans lesquelles la diffusion de systèmes de diagnostic à distance soutenus par les sociétés de classification devient économiquement viable pour les armateurs et socialement souhaitable. L'approche intègre (i) un modèle multi-agents représentant l'hétérogénéité des anticipations des armateurs, les effets de réseau et l'appui institutionnel, (ii) un taux de défaillance et d'incident de flotte couvrant à la fois les pannes dépendantes de l'âge et les incidents liés à l'erreur humaine indépendants de l'âge, et (iii) une analyse coûts-bénéfices tenant compte de structures d'investissement alternatives financées soit par l'armateur, soit par le fournisseur. Les résultats montrent que les stratégies d'abonnement financées par le fournisseur génèrent systématiquement un retour sur investissement positif, permettant une adoption quasi complète du système de diagnostic en moins de dix ans, tandis que dans le cas d'investissements en capital financés par l'armateur, les valeurs actuelles nettes demeurent négatives et la diffusion s'enraye. L'alignement des structures de financement, du soutien institutionnel et de la capacité d'installation est nécessaire à une diffusion efficace des systèmes de diagnostic. Il s'agit de la première étude consacrée à l'évaluation multi-agents des technologies numériques de sécurité dans le transport maritime, apportant des recommandations opérationnelles aux armateurs, aux fournisseurs technologiques, aux décideurs publics et aux assureurs, tout en renforçant la résilience de la chaîne logistique maritime.

Version française de diffusion professionnelle fondée sur un manuscrit académique soumis.

Auteur correspondant: Ilia Maslov

1. Introduction

1.1. *Équilibre du report*

Le risque opérationnel dans le transport maritime est souvent géré au moyen de deux leviers : les investissements dans l'excellence opérationnelle et le transfert du risque résiduel vers les marchés de l'assurance. Les produits d'assurance adaptés comprennent les garanties de responsabilité envers les tiers (P&I), la responsabilité du transporteur, l'assurance corps et machines, ainsi que la perte d'exploitation. Néanmoins, les facteurs de risque suivants restent souvent sans couverture : pénalités contractuelles fondées sur la performance et la disponibilité technique prévues dans les chartes à temps, immobilisations potentielles par le contrôle de l'État du port (PSC), suspensions de classe, atteintes à la réputation et autres pertes non assurées (Allianz Commercial 2025; Osler 2025). Dans cet environnement, les armateurs arbitrent rationnellement entre la prévention et la modernisation immédiates, d'une part, et les pénalités et pertes attendues, d'autre part.

(Yang et al. 2018) ont proposé une modélisation du PSC comme un jeu stratégique dans lequel les armateurs choisissent leur effort de maintenance tandis que les autorités réglementaires déterminent l'intensité des inspections. Sous des paramétrisations réalistes, l'équilibre est mixte, avec une non-conformité partielle lorsque la probabilité de détection et le niveau des sanctions ne compensent pas le coût des mesures préventives. En pratique, ce report se manifeste souvent par des stratégies de fonctionnement jusqu'à la panne pour des équipements critiques embarqués, dont les modes de défaillance sont difficiles à détecter lors des inspections de routine. Lorsque les pénalités attendues et les pertes internalisées sont inférieures au coût de l'action corrective, le report devient rationnel du point de vue privé (Annexe A). Les marchés d'assurance souples (Osler 2025) peuvent en outre renforcer cette stratégie de report en amortissant le risque machine et en réduisant les incitations des armateurs à investir de manière proactive.

Les enjeux de cette stratégie sont illustrés par des événements à fort impact. La collision en 2024 entre le DALI et le pont Francis Scott Key a mis en évidence une absence de données enregistrées pour la période critique, compliquant la reconstitution des défaillances électriques en cascade et des actions de l'équipage (National Transportation Safety Board 2024). Bien que la technologie existe, les armateurs ne sont pas systématiquement incités à investir dans la prévention ni à partager les données industrielles avec les contreparties et les autorités. Les résultats expérimentaux montrent également que lorsque le maintien d'un état d'exploitation sûr dépend de l'atteinte d'un seuil collectif d'investissement, les groupes échouent fréquemment à l'atteindre et se stabilisent à la place dans un équilibre plus risqué (Milinski et al. 2008).

1.2. *Systèmes de diagnostic à distance et lacunes de gouvernance*

Bien qu'une grande variété de systèmes de diagnostic à distance embarqués et à terre soient déjà disponibles sur le marché (assistance à distance des fabricants d'équipements d'origine, plateformes de performance de flotte, etc.), les visites de classification exploitent rarement leurs flux continus de données de manière structurée. Les lignes directrices (International Maritime Organization (IMO) 2023) ne mentionnent pas l'utilisation des données industrielles dans le cadre des visites ; cette utilisation est évoquée comme une possibilité dans (International Association of Classification Societies (IACS) 2022), sans exigences techniques spécifiques. L'interprétation des

données industrielles demeure complexe. Du point de vue des sociétés de classification, Liang et al. (2024) mettent en évidence cette lacune en examinant les techniques maritimes de pronostic et de gestion de l'état de santé (PHM, Prognostics and Health Management) — notamment le monitoring conditionnel, le diagnostic et le pronostic de panne, l'estimation de la durée de vie résiduelle utile et l'aide à la décision en maintenance — et en étudiant la manière dont ces approches sont actuellement reflétées dans les règles et normes de classification. Leur revue, centrée principalement sur DNV et ABS, montre que si les techniques PHM progressent rapidement, leur intégration formelle dans les cadres de visite et de conformité reste limitée. Ils soulignent également plusieurs difficultés liées aux données pour les sociétés de classification — notamment l'intégrité et la qualité des données, la dérive conceptuelle, les modifications des systèmes et des configurations, la dérive des données, la dégradation des capteurs, les enjeux de cybersécurité et de sécurité des données, ainsi que la nécessité d'un monitoring continu, de mises à jour et de recalibrages — autant d'éléments qui compliquent l'utilisation fiable des résultats PHM à des fins d'assurance et de conformité. Les principales différences entre les notations numériques ou intelligentes des sociétés de classification sont résumées dans le Tableau 1.

Des éléments empiriques issus de la gestion des infrastructures portuaires suggèrent que des diagnostics continus fondés sur les données peuvent contribuer aux objectifs d'assurance dans les environnements maritimes. Par exemple, (Castillo et al. 2024) montrent que des indices d'état des actifs dérivés de données issues de capteurs à haute fréquence permettent une détection plus précoce des anomalies et des interventions plus efficaces que les approches fondées sur des inspections périodiques pour les portiques de quai. Bien qu'appliqué à des équipements portuaires plutôt qu'aux navires, ce travail illustre comment l'augmentation de la densité informationnelle permise par une surveillance continue peut compléter les régimes formels de visite pour les actifs maritimes critiques du point de vue de la sécurité.

Une autre complexité tient au fait que la répartition des responsabilités peut dépendre de l'accès aux journaux d'événements et de leur interprétation ; même lorsque cet accès est accordé, par exemple après un incident, l'effort d'expertise nécessaire pour relier la diligence de l'opérateur aux jeux de données peut être prohibitif (Domenighini 2024). Néanmoins, les flux continus de données industrielles offrent des représentations rapides, structurées et lisibles par machine du comportement des systèmes, évitant une grande partie des pertes d'information inhérentes aux rapports narratifs d'incident (Goerlandt and Liu 2024).

Les enseignements tirés des déploiements de l'Internet des objets dans les ports intelligents indiquent en outre que, sans cadres explicites de gouvernance des données — couvrant la qualité des données, la gestion de leur cycle de vie et la responsabilité — les flux continus de données industrielles ne peuvent pas soutenir de manière fiable la prise de décision opérationnelle ni les fonctions d'assurance (Gao et al. 2024).

Certaines références des sociétés de classification relatives à la conformité fondée sur les données tendent à se concentrer sur les systèmes intégrés de passerelle ou sur les visites annuelles des systèmes de positionnement dynamique (DP) (Det Norske Veritas AS (DNV) 2025a).

Dans le même temps, l'association professionnelle du secteur de l'énergie a introduit le terme *data-centric evidence* pour les essais des systèmes DP (Oil Companies International Marine Forum (OCIMF) 2016).

Les notations DNV NAUTConnect (DNV 2022) et BV NR690 Data-Centric (Bureau Veritas Marine & Offshore 2024b) se distinguent fondamentalement des autres notations numériques ou intelligentes délivrées par les sociétés de classification (DNV,

ClassNK, ABS, BV et CCS). Alors que la plupart des notations pour navires intelligents visent à démontrer des capacités numériques et à faciliter la préparation des visites ou la maintenance conditionnelle, NAUTConnect et NR690 instaurent un modèle formel de gouvernance portant sur les données elles-mêmes. NAUTConnect et NR690 définissent la manière dont les navires, les systèmes de monitoring et de diagnostic à distance, ainsi que les fournisseurs de diagnostic, peuvent être évalués et certifiés, de sorte que la détection d’anomalies et les preuves de performance soutiennent de manière effective la classification, la conformité réglementaire et les relations contractuelles. Selon NR690, les fonctions de diagnostic ne sont pas limitées aux seuls systèmes de passerelle ni à leurs fabricants (comme dans le cas de NAUTConnect de DNV), mais sont confiées à des prestataires de diagnostic certifiés opérant dans un cadre défini de confiance et de responsabilité, applicable à tout système critique d’automatisation choisi. La note de règle de classification NR690 de Bureau Veritas (Data-Centric Evaluation) (Bureau Veritas Marine & Offshore 2024b) constitue ainsi une extension du concept introduit par la notation NAUTConnect de DNV (DNV 2022).

La mise en œuvre du cadre NR690 réduit le coût de transaction de la confiance en normalisant la fourniture de preuves et l’audit, permettant aux affréteurs et aux autorités de s’appuyer sur une conformité binaire, tandis que les armateurs développent une confiance propre à leur flotte au moyen d’indicateurs mesurables de fiabilité, par exemple le temps moyen entre pannes (MTBF) pour un équipement critique donné. Des règles de classification similaires à NR690 peuvent devenir des instruments de gouvernance susceptibles de déplacer les incitations du report vers la prévention, en augmentant la probabilité de détection et en valorisant une efficacité de détection vérifiée. Les flux fonctionnels de données définis dans le cadre de NR690 sont illustrés à la Figure 1. Cette étude porte sur les systèmes conformes à NR690 qui correspondent à des systèmes de monitoring et de diagnostic à distance pour les équipements critiques des navires, et qui sont approuvés par la société de classification pour l’acquisition et l’échange cybersécurisés de données industrielles, ainsi que pour leur utilisation dans la gouvernance du suivi des défaillances, incidents et signaux précurseurs conformément à la *SOLAS*, Chapitre I, Partie B, Règle 11(c), et aux dispositions contractuelles de reporting.

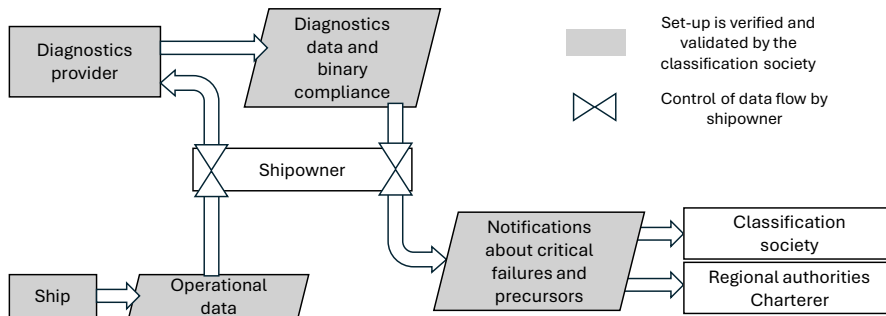


Figure 1.: Flux fonctionnel de données pour une solution conforme à NR690.

1.3. Positionnement dans la littérature

Comprendre la diffusion des nouvelles technologies dans le secteur du transport maritime suppose de replacer les décisions d’adoption dans des systèmes socio-techniques

plus larges. Rogers (2003) a mis en évidence l'influence de l'avantage relatif perçu, de la compatibilité, de la complexité, de la possibilité d'expérimentation et de l'observabilité sur les trajectoires d'adoption au sein des réseaux sociaux. Des études ultérieures ont étendu ces idées à des contextes sectoriels spécifiques, montrant comment les mécanismes de gouvernance et l'hétérogénéité des acteurs influencent l'adoption (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019; Chica, Rivas Hermann, and Lin 2023; Xuan, Liu, and Wang 2024; Okushima 2015). Les recherches sur les transitions socio-techniques soulignent que le changement technologique est enchâssé dans des structures institutionnelles, marchandes et comportementales, ce qui nécessite des politiques coordonnées pour soutenir les transitions vers une mobilité durable (Geels 2022).

La modélisation multi-agents (ABM) occupe une place centrale dans l'étude de ces dynamiques, car elle permet de représenter des acteurs hétérogènes interagissant sous rationalité limitée, sous l'effet des réseaux et des interventions de gouvernance (Rand and Stummer 2021). Les modèles multi-agents ont été mobilisés pour analyser les effets de pairs dans la diffusion de la mobilité partagée (Okushima 2015), les frictions et incitations structurant l'adoption de la blockchain dans le transport maritime (Nguyen, Chen, and Du 2023), ainsi que les déterminants comportementaux de l'adoption des technologies propres chez les armateurs (Xuan, Liu, and Wang 2024).

Lopolito, Morone, and Taylor (2013) ont montré comment la convergence des anticipations, la formation des réseaux et l'apprentissage agissent comme des mécanismes mutuellement renforçants qui déterminent si des niches d'innovation émergentes se stabilisent ou se dissolvent. La discussion précédente met en évidence que la diffusion dépend non seulement des performances techniques, mais aussi de l'apprentissage social, de l'alignement des croyances et des dispositifs de gouvernance.

Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla (2019) ont appliqué cette compréhension des dynamiques de diffusion présentée par Lopolito, Morone, and Taylor (2013) à la décarbonation du transport maritime en modélisant l'adoption de la technologie des rotors Flettner — un système de propulsion assistée par le vent pour les navires commerciaux. Il a été montré qu'une information imparfaite et des incitations dissociées peuvent ralentir l'adoption même lorsque les technologies sont rentables. Ces résultats, ainsi que la modélisation des incitations ciblées présentée dans (Chica, Rivas Hermann, and Lin 2023), soulignent le rôle crucial des effets de démonstration et de la coordination entre acteurs dans l'accélération de l'adoption.

Des études récentes (Ji et al. 2025; Hong et al. 2025; Yang et al. 2024; Yan, Wang, and Zhen 2023) se sont intéressées à l'efficacité du contrôle par l'État du port (PSC) et ont montré que des méthodes fondées sur les données et la théorie des jeux peuvent améliorer l'allocation de ressources d'inspection limitées. En particulier, il a été montré qu'une planification coordonnée des inspections entre ports surpasse les stratégies conventionnelles en exploitant les informations relatives aux mouvements des navires et les complémentarités de capacité d'inspection (Yan, Wang, and Fagerholt 2022). Des revues approfondies et des travaux de modélisation indiquent également que les cadres de sélection des navires reposent principalement sur les déficiences historiques, les antécédents de détention et des caractéristiques statiques des navires, ce qui conduit à des profils de risque mis à jour uniquement lors d'événements d'inspection discrets (Yan, Wang, and Peng 2022). En complément de cette littérature, des résultats empiriques récents montrent que les inspections PSC à distance peuvent partiellement atténuer les lacunes de contrôle et maintenir l'efficacité réglementaire dans des conditions contraintes, comme durant la pandémie de COVID-19 (Wang et al. 2025).

Cependant, ces approches confirment également de manière implicite que l'efficacité du PSC demeure limitée par la fréquence des inspections et les contraintes

d'échantillonnage (sélection partielle des éléments inspectés à bord). Plutôt que de remplacer les modèles d'inspection PSC fondés sur le risque, le cadre proposé les complète en augmentant la densité d'information entre les inspections.

La présente étude examine comment les systèmes de diagnostic à distance soutenus par les sociétés de classification et les cadres de gouvernance des données peuvent accroître la couverture effective des inspections entre les visites réglementaires, déplaçant ainsi les incitations d'une conformité réactive vers une gestion préventive des risques.

Des travaux antérieurs ont étudié les leviers organisationnels et institutionnels favorisant l'adoption de technologies numériques embarquées, y compris l'automatisation logicielle visant à améliorer la conformité et la sécurité (Karakas 2025). Cependant, on sait encore peu de choses sur la manière dont des leviers numériques orientés vers la sécurité se diffusent dans des régimes réglementaires fondés sur l'inspection, caractérisés par des visites peu fréquentes, des bénéfices externalisés et des incitations mal alignées.

Alors que les études sur la résilience portuaire soulignent l'importance du monitoring et des technologies numériques pour le maintien de la continuité opérationnelle (Urciuoli and Hintsä 2021), elles se concentrent largement sur des systèmes centrés sur le port. Une attention moindre a été portée à la manière dont les technologies de diagnostic au niveau du navire peuvent agir comme mécanismes facilitateurs en réduisant les perturbations liées à la sécurité qui se propagent aux opérations portuaires (Tsoulfas 2025).

La présente étude répond directement à l'appel récent formulé dans la littérature de gouvernance maritime (Yuen et al. 2025) en faveur d'analyses d'intégration socio-technique centrées sur la transformation numérique. L'étude modélise explicitement la manière dont les infrastructures technologiques (diagnostic à distance), les comportements organisationnels (anticipations et coordination des armateurs) et les cadres réglementaires (règles de classification, régimes d'inspection et subventions) interagissent pour influencer les résultats d'adoption.

1.4. *De la réponse aux incidents à la prévention : objectif de l'étude*

Cette étude vise à développer une approche de modélisation multi-agents afin de quantifier les conditions technologiques, financières et institutionnelles dans lesquelles la diffusion de diagnostics à distance soutenus par les sociétés de classification devient rationnelle du point de vue privé pour les armateurs et socialement souhaitable. Un modèle intégré est proposé, combinant (i) une diffusion multi-agents représentant l'hétérogénéité des anticipations des armateurs, les effets de réseau et l'appui institutionnel, (ii) une analyse coûts-bénéfices fondée sur des structures d'investissement alternatives financées soit par l'armateur, soit par le fournisseur, et (iii) un taux de défaillance et d'incident de flotte couvrant à la fois les pannes dépendantes de l'âge et les incidents liés à l'erreur humaine indépendants de l'âge. L'approche de modélisation est illustrée à travers le cas d'usage de systèmes de diagnostic à distance conformes à la note de règle de classification NR690 (Bureau Veritas Marine & Offshore 2024b). Du point de vue des systèmes de transport, le diagnostic à distance fonctionne comme une technologie d'inspection augmentant les capacités, en accroissant la couverture effective des inspections sans augmentation proportionnelle des ressources réglementaires.

La question de recherche suivante est posée : "dans quelles combinaisons d'efficacité de détection, de financement (CAPEX supporté par l'armateur vs. abonnement financé par le fournisseur) et de soutien de gouvernance (subventions temporaires d'OPEX

conditionnées à l’usage, effets de réseau institutionnels via la société de classification), l’adoption d’un système de diagnostic à distance conforme à NR690 devient-elle rationnelle du point de vue privé et socialement souhaitable ?”

Cette étude contribue à la sécurité fondée sur les données en combinant le modèle de diffusion multi-agents développé avec la modélisation des taux de défaillance et d’incident (Annexe B). L’originalité de cette étude repose sur trois contributions principales : (a) un modèle multi-agents est développé afin de représenter la diffusion des systèmes de diagnostic à distance, en intégrant des frictions de financement réalistes et des réseaux institutionnels ; (b) les enseignements issus des jeux d’inspection appliqués aux décisions préventives sont explicités, faisant apparaître une condition transparente de report sur laquelle les décideurs publics peuvent agir au moyen des paramètres de détection et de sanction (Annexe A) ; (c) les profils de risque à l’échelle de la flotte relatifs aux pertes non assurées, incluant les incidents liés à l’erreur humaine combinés aux défaillances, sont mis en évidence.

2. Contexte et fondements théoriques

2.1. *Décisions des armateurs*

Les fondements microéconomiques de la prise de décision des armateurs en matière d’investissements de sécurité ont été formalisés par Yang et al. (2018), qui ont modélisé le choix entre maintenance proactive et maintenance réactive comme un problème d’optimisation sous contraintes. Lorsque la sanction attendue en cas de non-conformité et la probabilité d’inspection sont toutes deux faibles, les dépenses consacrées aux mesures de sécurité demeurent limitées. Ce résultat est renforcé par l’environnement réglementaire dans lequel évoluent les armateurs, au sein duquel la conformité est définie au travers de visites et d’inspections périodiques. Les dispositifs continus d’assurance mis en œuvre par l’armateur lui-même ne sont pas transparents. Les inspections externes, notamment les visites annuelles des sociétés de classification et les contrôles par l’État du port (PSC), sont intrinsèquement limitées par des contraintes d’échantillonnage, de portée et de durée. La déclaration volontaire des défauts, telle que prescrite par la SOLAS, Chapitre I, Partie B, Règle 11(c), est soumise à la même logique économique : les acteurs rationnels ont peu d’incitation à signaler des anomalies lorsque la probabilité et l’ampleur des sanctions sont faibles. Dans ce contexte, le report des opérations de maintenance peut devenir un choix économiquement plausible, même lorsqu’il affaiblit la redondance des systèmes et les marges de sécurité.

Les implications systémiques d’un tel report ont été illustrées par l’accident précédemment mentionné impliquant le porte-conteneurs *Dali*. Les investigations préliminaires suggèrent que des anomalies techniques non résolues n’ont pas été pleinement détectées ni traitées avant le départ, selon National Transportation Safety Board (2024). L’enquête préliminaire a initialement identifié des défaillances d’alimentation électrique comme principaux facteurs causaux. Ces premiers constats ont ensuite été confirmés et approfondis dans l’enquête finale du Board du NTSB, qui a fourni une analyse complète des déficiences des systèmes électriques et de contrôle en cause (National Transportation Safety Board (NTSB) 2025). Cet événement montre comment une couverture d’inspection limitée, ainsi que l’absence de diagnostics à distance fréquents et de dispositifs de reporting, peuvent se traduire par des conséquences catastrophiques tant pour l’industrie que pour la société. L’Annexe F présente l’impact préventif potentiel de l’application au porte-conteneurs *Dali* d’un cadre NR690 fondé

sur la détection et la gouvernance des données.

Les secteurs de l'énergie ont depuis longtemps reconnu les limites des inspections menées par le PSC et les sociétés de classification.

L'Oil Companies International Marine Forum (OCIMF) a mis en place le *Ship Inspection Report Programme* (SIRE) Oil Companies International Marine Forum (OCIMF) (2025), puis ultérieurement l'*Offshore Vessel Inspection Database* (OVID) Oil Companies International Marine Forum (OCIMF) (2019), afin de compenser les insuffisances de couverture et de fréquence des inspections statutaires et de classification. Ces dispositifs ont créé des mécanismes de monitoring fondés sur le marché visant à accroître les probabilités d'inspection et de détection des défauts. En l'absence de tels programmes, la conformité demeurerait largement symbolique ; pour un armateur rationnel confronté à des visites peu fréquentes et à des sanctions modestes, l'incitation à investir dans une sécurité proactive reste minimale.

Les initiatives de l'OCIMF démontrent que, sans programmes d'inspection crédibles et suffisamment denses, la conformité réglementaire seule exerce un effet comportemental limité. Des cadres de diagnostic à distance tels que le NR690 de Bureau Veritas Marine & Offshore (2024b) peuvent être interprétés comme une amélioration technologique des inspections, en fournissant des flux réguliers de données susceptibles de compléter les régimes d'inspection statutaires et les auto-audits de l'industrie, lesquels reposent sur un échantillonnage (sélection partielle des éléments inspectés) décidé par l'inspecteur de la société de classification présent à bord.

Accroître la fréquence d'échantillonnage ainsi que la couverture des inspections, sans imposer de charges opérationnelles excessives, nécessite une transformation structurelle des modes de collecte de l'information. La numérisation offre un tel mécanisme. Selon NR690, des diagnostics à distance réguliers transforment la détection des défauts, en la faisant passer d'un processus d'échantillonnage à faible fréquence à une évaluation à haute fréquence de la conformité fondée sur des flux de données industrielles. Cette transformation augmente les probabilités d'inspection (P_i et P_d dans la formulation microéconomique de l'Annexe A), déplaçant l'équilibre économique du report vers une maintenance proactive. Cette approche est particulièrement pertinente pour les flottes à forte valeur journalière ou technologiquement avancées — notamment celles utilisant des carburants alternatifs, la navigation autonome ou la propulsion nucléaire. Des résultats empiriques issus du transport maritime conteneurisé confortent cette interprétation, indiquant que les efforts de numérisation sont principalement limités par la capacité financière et les attentes réglementaires, plutôt que par la seule disponibilité technologique (Yuen et al. 2024).

Des résultats connexes issus des opérations des terminaux maritimes indiquent que les comportements de conformité sont fortement influencés par les coûts perçus de la non-conformité et par l'intensité du monitoring, des probabilités plus élevées de détection et de sanction conduisant à une amélioration du respect des exigences de sécurité (Yen et al. 2024). Bien qu'issus des opérations portuaires, ces résultats mettent en évidence des mécanismes comportementaux directement pertinents pour les régimes maritimes fondés sur l'inspection et l'assurance.

2.2. Contexte de la classification

Du point de vue institutionnel, les sociétés de classification sont elles-mêmes confrontées à des défis de coordination comparables à ceux des armateurs. Leur incitation à entreprendre des démarches exhaustives de vérification et de validation est façonnée à

la fois par la concurrence du marché et par les limitations juridiques de responsabilité. Sur le marché contemporain de la classification, la plupart des grandes sociétés opèrent selon les règles techniques harmonisées de l'IACS (*Unified Requirements*), tandis que les armateurs peuvent changer de prestataire de services de classification en l'espace de quelques semaines dans le cadre de la procédure IACS de transfert de classe (PR 1A) (International Association of Classification Societies (IACS) 2023a), en particulier pour les navires âgés de moins de 10 à 15 ans et disposant d'un statut de visite à jour. Les armateurs exercent un pouvoir d'achat important sur le marché de la classification. Étant donné que le champ des visites dans le cadre du *Harmonised System of Survey and Certification* (HSSC) de l'OMI International Maritime Organization (IMO) (2023) repose explicitement sur un examen représentatif et sur l'échantillonnage, plutôt que sur l'inspection exhaustive de l'ensemble des systèmes, la profondeur du contrôle technique est structurellement limitée par la conception réglementaire. Des études empiriques indiquent en outre que les armateurs évaluent principalement les sociétés de classification en fonction de leur réactivité de service, de leur appartenance à l'IACS et de leur facilité opérationnelle, ce qui renforce une concurrence fondée sur le coût et la qualité de service plutôt que sur la profondeur de la vérification technique (Hsu 2023).

Dans la mesure où la *Institute Classification Clause* (CL. 354) Lloyd's Market Association (LMA) (2001) est fréquemment utilisée en assurance facultés maritimes et prévoit que les navires doivent être classés auprès de tout membre de l'IACS afin de conserver une couverture d'assurance standard, l'ensemble des membres de l'IACS est traité comme équivalent du point de vue de l'assurabilité. Cela supprime toute différenciation entre les principales sociétés fondée sur l'assurance et renforce la concurrence par les prix et le service, plutôt qu'une concurrence reposant sur la rigueur des règles ou l'exigence technique.

Dans le même temps, les tribunaux ont constamment limité la responsabilité des sociétés de classification en matière de certification négligente, considérant l'approbation de classe comme une opinion d'expert plutôt que comme une garantie de navigabilité (Soyer and Tettenborn 2019, pp. 32–33), (Otto Candies 2003; The Nicholas H 1996). Du point de vue de la théorie des jeux, la sanction attendue associée à une assurance trop intrusive ou trop coûteuse excède la sanction attendue résultant d'un contrôle insuffisant, créant un équilibre d'incitations dans lequel le niveau de vérification rationnel du point de vue privé peut être inférieur au niveau socialement acceptable. La problématique de l'existence de telles pratiques a été mentionnée dans (Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD) 2001, p. 29).

Cette asymétrie des incitations devient plus marquée encore dans les systèmes émergents à forte complexité — tels que les systèmes de contrôle autonomes, la propulsion nucléaire et les architectures à carburants zéro carbone — où l'espace des états opérationnels ne peut être exploré de manière exhaustive au seul moyen des essais préalables à la mise en service, et où les cadres de simulation à grande échelle applicables à l'automatisation demeurent beaucoup moins mûrs et bien moins fréquemment exigés que ceux utilisés pour la conception structurelle, par exemple si l'on compare l'analyse par éléments finis exigée par les *IACS Common Structural Rules* (International Association of Classification Societies (IACS) 2025a) et les *Unified Requirements* applicables aux systèmes informatisés (International Association of Classification Societies (IACS) 2025b). Dans les conditions actuelles de responsabilité et de concurrence, les sociétés de classification disposent d'incitations économiques limitées à rechercher un niveau maximal d'assurance approfondie au stade de l'approbation de la conception. Cet argument n'implique pas une sous-assurance intentionnelle de la part des

sociétés de classification. Il met plutôt en évidence la manière dont les contraintes formelles de responsabilité et les cadres techniques harmonisés produisent un équilibre structurel dans lequel une vérification approfondie est économiquement découragée.

Cette limite a été largement reconnue dans la certification des systèmes maritimes autonomes et fortement dépendants des logiciels, où la croissance combinatoire des scénarios opérationnels rend impraticables des essais exhaustifs avant certification, ce qui impose des enveloppes de certification bornées, une production sélective de preuves et le recours à des hypothèses relatives aux conditions d'exploitation (Costello and Xu 2024).

Une approche plus crédible et économiquement plus efficace consiste à compléter la revue initiale de conception et les essais en mer par des diagnostics à distance fréquents entre les visites annuelles. Cela permettrait d'intervenir lorsque les actifs s'écartent des références techniques attendues. Des référentiels tels que DNV NAUTConnect (DNV 2022) et Bureau Veritas NR 690 (Bureau Veritas Marine & Offshore 2024b) illustrent cette évolution vers une assurance continue centrée sur les données, réduisant la nécessité d'une vérification et d'une validation exhaustives avant approbation, tout en maintenant la sécurité grâce à une supervision adaptative.

Dans la mesure où les bénéfices d'une transparence accrue et d'une détection précoce des anomalies sont largement collectifs, tandis que les coûts sont supportés à titre privé, l'adoption par le marché d'une assurance continue centrée sur les données a peu de chances d'atteindre des niveaux socialement efficaces sans soutien de gouvernance. Des désalignements similaires entre coûts privés et bénéfices collectifs ont été formellement démontrés dans des contextes de gouvernance maritime tels que l'alimentation électrique à quai et les systèmes énergétiques des postes à quai, où des dispositifs de subvention conçus de manière optimale sont nécessaires pour induire une adoption efficace des technologies (Zhen et al. 2024; Wang, Wang, and Zhen 2024).

Par conséquent, des mécanismes ciblés de reconnaissance réglementaire, des cadres de partage des données ou des régimes de subvention peuvent être nécessaires pour accélérer l'adoption de diagnostics à distance soutenus par les sociétés de classification pour les équipements critiques embarqués.

2.3. *Cyber-résilience et incitations assurantielles*

L'adoption des systèmes de diagnostic à distance présuppose une cyber-résilience robuste. Des résultats empiriques issus du secteur maritime indiquent que le niveau de préparation en cybersécurité, les pratiques de monitoring et la formation des équipages varient sensiblement d'un navire à l'autre, ce qui peut limiter la gestion effective des cyber-risques embarqués (Kanwal et al. 2024). Le socle réglementaire fourni par les *IACS Unified Requirements* E26 et E27 applicables aux navires garantit une intégration sécurisée des systèmes opérationnels et des technologies de l'information (International Association of Classification Societies (IACS) 2023b,c). La plupart des nouveaux navires de charge sont tenus de s'y conformer depuis juillet 2024. La présente étude se concentre sur les navires conçus et exploités conformément à ces *Unified Requirements*. Le coût additionnel lié à la cybersécurité est pris en compte dans l'étude de rentabilité.

À une échelle plus large, la cybersécurité dans de nombreux secteurs se caractérise par des incitations assurantielles favorisant l'adoption de dispositifs de diagnostic de sécurité à distance. Une approche similaire pourrait potentiellement être appliquée à la sécurité maritime. Les assureurs fondent de plus en plus leur tarification et leurs

conditions de couverture sur un niveau démontrable de maturité en cybersécurité. Les organisations qui respectent des normes de sécurité reconnues ou détiennent des certifications pertinentes bénéficient souvent de conditions d’assurance plus favorables (Marotta et al. 2017; Eling and Schnell 2016). Les dispositifs avancés de cybersécurité comprennent fréquemment des systèmes capables de fournir des preuves de monitoring à distance, de journalisation des événements et de détection des incidents. Les systèmes de *Security Information and Event Management* (gestion des informations et des événements de sécurité, SIEM) en constituent un exemple. Les SIEM agrègent et corrélient des données pertinentes en matière de sécurité afin de permettre une analyse en temps réel et une assurance continue (Muhammad, Sukarno, and Wardana 2023). En ce sens, des SIEM embarqués pourraient être certifiés comme solutions conformes à NR690. Dans la mesure où les concepts de conception des SIEM et du NR690 présentent des similarités, l’assurance corps et machines pourrait, à long terme, faire évoluer sa tarification en fonction de la présence à bord de solutions conformes à NR690.

3. Méthodologie

3.1. Des pertes à la valeur actuelle nette

À partir du cadre décisionnel présenté à la Section 2, l’analyse représente les armateurs comme des agents hétérogènes décidant d’adopter ou non des systèmes de diagnostic à distance en fonction des gains économiques perçus. Chaque agent est confronté au problème d’optimisation sous contraintes présenté dans l’inégalité microéconomique A1 de l’annexe A, dans laquelle les probabilités d’inspection et de détection des défauts (P_i et P_d) déterminent la sanction attendue associée au report de l’investissement C dans les mesures de prévention. Les régimes d’inspection traditionnels maintiennent ces probabilités à un niveau faible, tandis que l’adoption de systèmes de diagnostic à distance dans le cadre du dispositif NR690 rapproche P_i et P_d de l’unité en permettant une observation à distance à haute fréquence du fonctionnement des équipements critiques embarqués.

Pour que la structure d’incitation demeure économiquement neutre, le traitement réglementaire des défauts signalés doit donc évoluer ; les défauts détectés et corrigés dans un délai raisonnable ne devraient donner lieu à aucune sanction. Si ce principe n’est pas mis en œuvre, le monitoring continu augmenterait paradoxalement les sanctions attendues de l’exploitant, supprimant ainsi le bénéfice économique potentiel et invalidant la dynamique d’adoption. Dans la formulation multi-agents proposée, cette hypothèse réglementaire se traduit par la suppression du terme de pénalité lié à l’inspection $P_d P_i F$ et par le maintien du seul terme de perte attendue PL^{ship} , multiplié par l’efficacité de détection η du système de diagnostic à distance, représentant les pertes d’exploitation évitées, conformément à l’équation suivante :

$$\underbrace{C < P_d P_i F + PL^{\text{ship}}}_{\text{Régime d'inspection conventionnel}} \implies \underbrace{C < \eta PL^{\text{ship}}}_{\text{Scénario avec diagnostic à distance (sans sanction si le défaut est corrigé à temps)}} \quad (1)$$

Afin d’opérationnaliser cette règle de décision dans le modèle multi-agents et de justifier le soutien de l’affréteur, les économies annuelles résultant des incidents évités sont ajustées par l’anticipation E de l’armateur et de l’affréteur quant au bénéfice

effectivement réalisé, selon les équations suivantes:

$$B^{\text{ship}} = E^{\text{ship}} \eta PL_{\text{annual}}^{\text{ship}}, \quad B^{\text{chtr}} = E^{\text{chtr}} \eta PL_{\text{annual}}^{\text{chtr}}, \quad (2)$$

où $PL_{\text{annual}}^{\text{ship}}$ et $PL_{\text{annual}}^{\text{chtr}}$ représentent respectivement les estimations annuelles de pertes pour l'armateur et pour l'affrèteur (Annexe B,C). Les agrégats sous-jacents de pertes liés aux défaillances et aux erreurs humaines, qui déterminent ces estimations annuelles de pertes, sont résumés dans le Tableau B2.

Les flux de trésorerie annuels qui en résultent sont alors calculés comme suit :

$$\Pi^{\text{ship}} = B^{\text{ship}} + S - C_{\text{OPEX}}^{\text{ship}}, \quad \Pi^{\text{chtr}} = B^{\text{chtr}} - C_{\text{OPEX}}^{\text{chtr}}, \quad (3)$$

où C_{opex} désigne le coût annuel d'abonnement et S toute subvention applicable.

Chaque agent calcule la valeur actuelle nette (VAN) actualisée correspondante pour l'armateur et pour l'affrèteur à l'aide des équations suivantes:

$$\text{NPV}^{\text{ship}} = \Pi^{\text{ship}} \text{PVAF}(r, T) - C_{\text{CAPEX}}, \quad \text{NPV}^{\text{chtr}} = \Pi^{\text{chtr}} \text{PVAF}(r, T), \quad (4)$$

où $\text{PVAF}(r, T)$ est le facteur de valeur actuelle d'une annuité au taux d'actualisation r sur un horizon de T années.

3.2. Hypothèse d'efficacité

Les fournisseurs de solutions de diagnostic à distance publient rarement des estimations quantifiées des fractions d'incidents évitables, en partie en raison du caractère commercialement sensible des jeux de données, et en partie parce que les chaînes de précurseurs d'incidents sont hétérogènes et dépendent du contexte opérationnel. Cependant, l'établissement d'une mesure transparente et défendable de l'efficacité de détection (η) est important dans le contexte économique et de gouvernance (Annexe D, Figure D1). L'efficacité de détection constitue la variable de liaison entre les trois domaines suivants, autrement disjoints : (i) la performance intrinsèque de détection des anomalies, (ii) la valeur des défaillances et perturbations opérationnelles évitées, et (iii) les incitations financières des armateurs, des affrèteurs, des assureurs et des organismes publics de subvention. Sans formulation claire de η , les investisseurs ne peuvent évaluer la viabilité commerciale, les armateurs ne peuvent comparer les solutions concurrentes, et les décideurs publics ne peuvent concevoir des dispositifs de soutien ciblés.

Par conséquent, l'exigence consistant à évaluer, documenter et vérifier η est intrinsèque au modèle économique. Si les solutions de diagnostic à distance doivent être éligibles à des subventions, à des conditions préférentielles de souscription d'assurance ou à une reconnaissance fondée sur la classification, les fournisseurs de solutions doivent indiquer comment η est calculé, quels jeux de données de précurseurs sont utilisés, de quelle manière les alertes sont reliées aux résultats observés, et comment l'incertitude est représentée. L'adoption des diagnostics à distance dépend donc non seulement de la performance technique, mais aussi de l'institutionnalisation de la mesure de l'efficacité de détection comme référence commune dans la gouvernance du risque maritime.

3.3. Base de coûts et ensembles de mise en œuvre

L'établissement d'une base de coûts défendable est nécessaire pour étayer une analyse crédible de l'adoption et de l'investissement. Le coût d'une solution NR690 comprend les deux composantes suivantes : (i) l'installation et l'intégration à bord (CAPEX), et (ii) l'abonnement au service de diagnostic (OPEX). L'élément CAPEX inclut le matériel d'informatique en périphérie (*edge computing*), les passerelles et modules d'interface, le câblage et la main-d'œuvre d'installation, la mise en service, ainsi que tout ajout optionnel de capteurs. La composante OPEX est principalement constituée du traitement automatisé des données sous supervision périodique d'analystes.

Les bénéfices liés à la prévention des incidents comprennent l'évitement des périodes d'immobilisation commerciale (*off-hire*), des coûts de réparation, des perturbations de planning et d'éventuelles pénalités de conformité. Dans la présente étude, nous comparons la prévention des pertes ajustée du risque au coût total de possession (CAPEX plus OPEX) des systèmes de diagnostic à distance. Dans la mesure où NR690 est conçu comme un régime de monitoring privilégiant l'automatisation, les OPEX demeurent modestes et évoluent principalement en fonction du volume de télémétrie plutôt qu'en fonction d'un effort manuel continu. Un plafond de coût d'environ 12 000 USD par navire et par an est donc réaliste et cohérent avec des charges de monitoring comparables à celles de systèmes de type *Security Information and Event Management* (gestion des informations et des événements de sécurité, SIEM).

Les contrôles de cybersécurité (par exemple la segmentation, l'accès distant sécurisé, la journalisation d'audit et l'intégrité de configuration) constituent un prérequis à toute connectivité à distance (International Association of Classification Societies (IACS) 2023b,c). Il s'agit de contrôles mutualisés à l'échelle du navire ; par conséquent, seule une quote-part proportionnelle (environ 1 000 USD par an à l'intérieur de l'enveloppe précitée de 12 000 USD) est imputée à cette solution, afin d'éviter un double comptage du renforcement cyber appliqué à l'ensemble de la plateforme.

Le Tableau 2 résume trois ensembles de mise en œuvre représentant des configurations typiques de déploiement. L'ensemble "Minimum Viable" correspond à des installations en phase initiale ; l'ensemble "Baseline" correspond à la configuration par défaut retenue dans l'étude de sensibilité présentée dans les sections suivantes, laquelle permet un retour sur investissement pour le fournisseur de technologie en moins de 3 ans avec un abonnement de 12 000 USD ; et l'ensemble "Extended" s'applique lorsque l'élargissement du périmètre système ou des objectifs de disponibilité plus élevés justifient une intégration accrue et une densité supérieure de capteurs. Comme le montre l'Annexe D, le scénario de financement assumé exclusivement par l'armateur — dans lequel celui-ci finance à la fois le CAPEX et l'OPEX et capte seul l'ensemble des bénéfices — exige une efficacité de monitoring à l'équilibre de $\eta \gtrsim 0.9$ pour des horizons de planification de 3 à 6 ans. Une telle exigence est techniquement peu plausible : atteindre $\eta \approx 0.9$ impliquerait une observabilité quasi complète des précurseurs de défaillance pertinents pour l'ensemble des équipements critiques, ainsi que des précurseurs de tous les types d'incidents recensés dans B1. En pratique, les limites de couverture des capteurs rendent une telle détection quasi parfaite difficile à atteindre à l'échelle d'une flotte. Cela confirme que le partage des coûts et des bénéfices entre armateur et affrèteur n'est pas seulement un choix contractuel commode, mais une condition préalable à une adoption réaliste.

Lorsque les coûts et les bénéfices sont partagés (65/35 comme indiqué dans l'Annexe B) pour l'ensemble "Baseline", l'efficacité de détection requise tombe à $\eta \approx 0.60$ pour des horizons de 5 à 6 ans (D1), ce qui est cohérent avec l'enveloppe de performance

des solutions conformes à NR690.

En outre, si le CAPEX est financé par le fournisseur, le seuil devient invariant par rapport à l’horizon et s’établit à $\eta = 0.556$. Ainsi, une diffusion économiquement viable des solutions conformes à NR690 dépend conjointement d’incitations partagées et d’anticipations réalistes, fondées sur des preuves, quant au niveau d’efficacité atteignable.

3.4. *Fondements comportementaux à travers une interprétation en jeu de coordination*

Chaque armateur est modélisé comme un décideur à rationalité limitée engagé dans un jeu de coordination avec ses pairs. L’adoption du système de diagnostic à distance génère des bénéfices : baisse des pertes attendues et réduction du nombre de jours d’immobilisation commerciale (*off-hire*). La valeur perçue de ces bénéfices dépend de la crédibilité globale du cadre de diagnostic à distance au sein de la flotte. Lorsque seuls quelques armateurs adoptent la solution, l’investissement apparaît peu rentable. À mesure que l’adoption se diffuse, la transparence partagée des données accroît la confiance des affréteurs et des sociétés de classification, augmentant les économies attendues liées à l’adoption du diagnostic et sa valeur intrinsèque pour l’ensemble des acteurs. L’adoption mutuelle procure le gain collectif le plus élevé, tandis qu’une adoption isolée peut conduire à des pertes.

Deux seuils comportementaux gouvernent la décision de chaque armateur selon Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla (2019) : (1) un seuil financier, exigeant que la valeur actuelle nette (VAN) attendue de l’adoption devienne positive ; et (2) un seuil d’anticipation, exigeant que la croyance de l’agent dans la crédibilité de la technologie dépasse un seuil τ . Il est supposé que ce second seuil est presque franchi par défaut pour l’ensemble des armateurs, compte tenu de la maturité générale des systèmes de diagnostic à distance. L’anticipation initiale E est fixée à 0.4, contre 0.175 dans Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla (2019), avec un seuil d’adhésion fixé à 0.5 (Annexe E). L’adoption n’a lieu que lorsque l’armateur et l’affréteur jugent l’investissement financièrement attractif et que le seuil de croyance est satisfait, ce qui est représenté par :

$$\text{Adopt} \iff (\text{NPV}^{\text{ship}} > 0) \wedge (\text{NPV}^{\text{chtr}} > 0) \wedge (E > \tau). \quad (5)$$

Le seuil du critère financier doit être satisfait à proximité locale d’un chantier naval pour que l’adoption puisse avoir lieu. Les anticipations E évoluent par l’observation des agents voisins, des projets de démonstration et des informations diffusées par des acteurs institutionnels tels que les sociétés de classification, dont les réseaux sont modélisés selon la répartition actuelle du tonnage au sein de l’IACS. Ce mécanisme est décrit dans l’Annexe E et opérationnalise le concept d’alignement des anticipations, central dans les jeux de coordination et la théorie de la diffusion de l’innovation (Rogers 2003; Geels 2022). Aucune concurrence explicite de marché n’est introduite ; au contraire, l’interdépendance stratégique résulte de l’apprentissage en réseau et de la réduction perçue du risque. La Figure 2 présente une vue d’ensemble de l’approche méthodologique développée afin de relier l’estimation du risque d’incident, l’évaluation de la performance économique et les dynamiques comportementales d’adoption technologique. L’approche intègre trois composantes analytiques : (i) la modélisation des taux de défaillance et d’incident de flotte (Annexe B), (ii) l’estimation statique de la valeur actuelle nette (VAN) (Annexe D), et (iii) un modèle multi-agents (ABM)

d'adoption technologique.

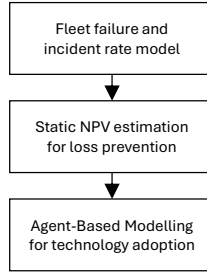


Figure 2.: Approche méthodologique d'ensemble. Les flèches indiquent les transferts d'information entre les phases.

3.5. Structure du modèle et agents

Le modèle est implémenté dans le cadre Python *Mesa* (ter Hoeven 2025) et dérivé du code NetLogo fourni par (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019). Les agents évoluent sur une grille toroïdale de 32 par 32 représentant des armateurs dans un marché maritime, aux côtés de fournisseurs de technologies, de projets de démonstration et de chantiers navals. Chaque agent armateur est caractérisé par des paramètres financiers (dépende d'investissement, coût d'exploitation, éligibilité aux subventions), une variable d'anticipation (E), ainsi qu'un état d'adoption. Les agents occupent des nœuds au sein d'un réseau spatial déterminant les échanges d'information. À chaque pas de temps mensuel, les agents :

- (1) mettent à jour leurs anticipations sur la base des observations de leurs pairs ;
- (2) calculent les VAN privées selon les conditions de financement et de gouvernance en vigueur ; et
- (3) adoptent la technologie, l'ignorent, cessent de l'utiliser ou la réactivent selon le respect des seuils financier et d'anticipation.

L'adoption modifie en retour les anticipations du réseau ainsi que les niveaux globaux de risque liés à la défaillance de la technologie, produisant des rétroactions caractéristiques des processus de diffusion socio-technique. Le schéma de fonctionnement du modèle multi-agents développé pour l'adoption des systèmes de diagnostic à distance par les armateurs est illustré à la Figure 3.

3.6. Paramètres du modèle, scénarios de gouvernance et calibration

3.6.1. Vue d'ensemble des paramètres

Le modèle est paramétré à partir de données empiriques relatives aux défaillances des équipements des navires (Lloyd's List Intelligence 2025) et aux statistiques d'incidents (Allianz Commercial 2025), ainsi qu'à partir de références publiées concernant les coûts des composants des systèmes conformes à NR690. Le Tableau 3 résume les principales variables et les valeurs de référence utilisées pour la calibration du modèle. Lorsque des données exactes ne sont pas disponibles, les valeurs sont choisies de manière à reproduire des fourchettes réalistes de coûts de maintenance annualisés et de fréquences de défaillance observées dans le transport maritime. Le taux d'affrètement journalier

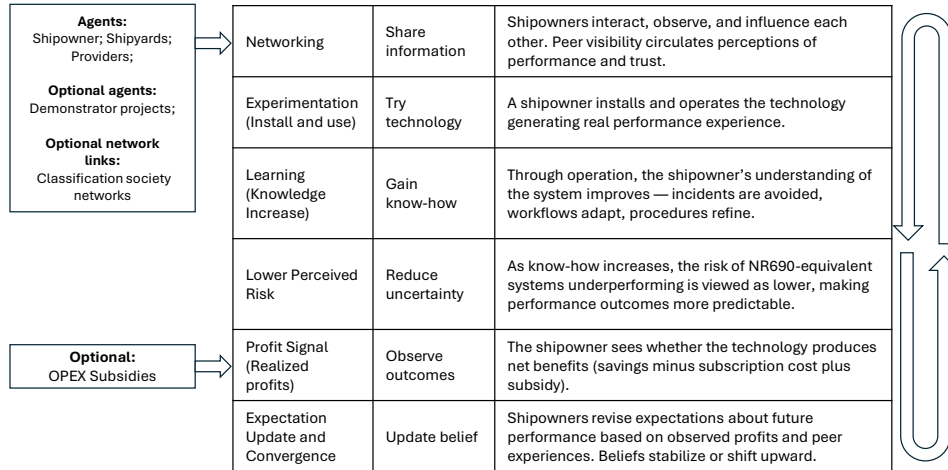


Figure 3.: Processus interne du modèle multi-agents pour l'adoption par les armateurs de la technologie de diagnostic des équipements.

de référence de 20,000 USD/jour est retenu afin de refléter des niveaux représentatifs de fret à temps rapportés dans la littérature. En particulier, Beullens, Ge, and Hudson (2023) documente des valeurs d'environ 20,000 USD/jour pour les pétroliers Suezmax dans des conditions normales de marché, avec des variations liées à la durée du contrat, à la date de prise d'effet et à l'état du navire.

3.6.2. Procédure de simulation

Chaque scénario est simulé sur un horizon de 10 ans à l'aide de pas de temps mensuels. Les agents mettent à jour successivement leurs anticipations et leurs états d'adoption conformément aux règles de décision présentées à la Section 3. Les résultats d'adoption sont mesurés par le nombre d'adoptants au cours du temps. Pour chaque scénario de gouvernance, 50 simulations avec graines aléatoires distinctes sont réalisées afin de prendre en compte la variabilité stochastique des interactions entre agents et des anticipations initiales.

3.6.3. Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité du résultat final d'adoption (nombre de navires adoptant la technologie sur l'horizon de 120 mois) indique que le modèle présente un comportement d'adoption dépendant de seuils, dans lequel certains paramètres déterminent si une adoption à grande échelle se matérialise, tandis que d'autres influencent principalement la vitesse de transition une fois l'adoption enclenchée. Cela reflète la structure à double seuil de l'Éq. 5, selon laquelle l'adoption exige à la fois (i) un signal de VAN positive et (ii) des anticipations suffisamment fortes, renforcées par les interactions de réseau.

Une analyse en tornade, faisant varier un facteur à la fois, a été réalisée en modifiant chaque levier clé entre ses bornes basse et haute, tout en maintenant tous les autres paramètres à leurs valeurs de référence. La Figure 4 présente les amplitudes d'impact obtenues. Le Tableau 4 récapitule les paramètres de simulation.

Parmi l'ensemble des leviers, le mode de financement constitue le déterminant le plus puissant de la diffusion. Le passage d'un CAPEX financé par le fournisseur à un CAPEX financé par l'armateur réduit l'adoption finale de 34 navires, soit la variation

la plus importante observée dans l'expérience. Le taux journalier d'affrètement est le deuxième facteur le plus influent (± 32 navires), dans la mesure où des taux plus élevés accroissent les bénéfices liés à l'évitement des périodes d'immobilisation commerciale, qui soutiennent le signal de VAN. L'efficacité de prévention des incidents (η) exerce une influence comportementale d'ampleur comparable (≈ 30 navires), reflétant son effet à la fois sur les anticipations et sur la rentabilité réalisée.

Les contraintes structurelles telles que la capacité des chantiers navals ont un effet modéré (≈ 11 navires), tandis qu'une subvention OPEX de 500 USD/mois génère un effet positif mais plus limité (+10 navires). Pris ensemble, ces résultats confirment que les incitations économiques et les anticipations de performance influencent surtout l'adoption initiale, tandis que les leviers structurels et de gouvernance produisent des effets plus incrémentaux lorsqu'ils varient isolément.

Afin de compléter l'analyse conjointe de l'ensemble des facteurs, une simulation supplémentaire a été réalisée en se concentrant uniquement sur les leviers de gouvernance, comme présenté ci-après.

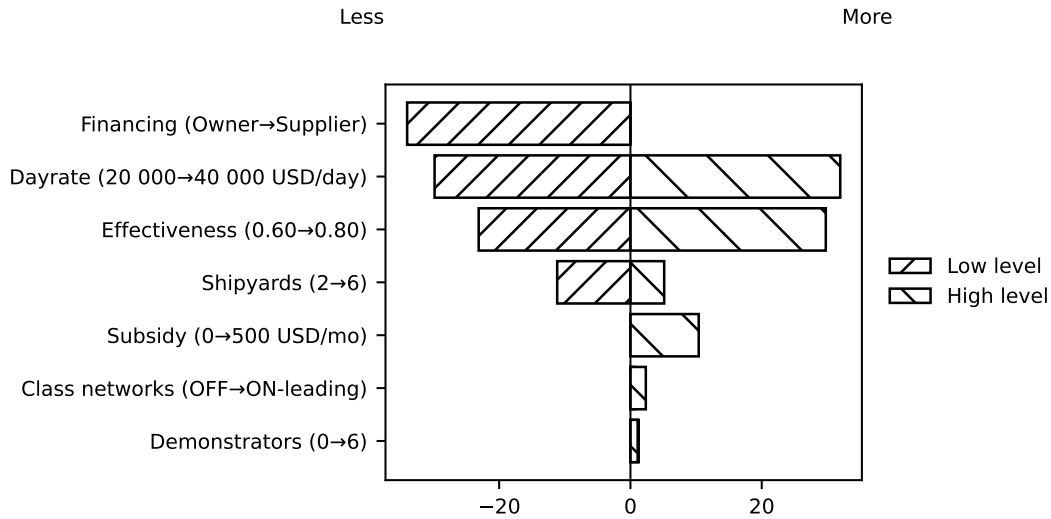


Figure 4.: Analyse de sensibilité en tornade pour l'ensemble complet des leviers. Les barres montrent l'amplitude d'impact sur l'adoption finale lorsque chaque paramètre varie de sa valeur basse à sa valeur haute, tous les autres étant maintenus constants.

3.6.4. Analyse des facteurs de gouvernance

Un second test de sensibilité a été réalisé afin d'isoler l'influence des interventions de gouvernance des fondamentaux économiques et techniques du système. Dans cette configuration, le mode de financement, le taux journalier, l'efficacité et la capacité des chantiers navals ont été maintenus à leurs valeurs de référence, tandis que seuls les leviers contrôlables par la gouvernance ont été modifiés conformément au Tableau 5. Un scénario reposant sur un taux journalier moins favorable de 18 000 USD a été retenu, avec une subvention plus élevée (750 USD/mois). Ce dispositif permet de distinguer les moteurs structurels de l'adoption des instruments à la disposition des régulateurs, des sociétés de classification et des organismes publics.

La Figure 5 résume les résultats ; les paramètres sont présentés dans le Tableau 5. Parmi les leviers de gouvernance, la subvention OPEX est la seule intervention

produisant un effet significatif, augmentant l’adoption finale d’environ huit navires lorsqu’elle passe de 0 à 750 USD/mois. À l’inverse, l’activation des réseaux de classification (OFF → ON-dominant) n’entraîne qu’une hausse très limitée (≈ 0.6 navire), tandis que l’augmentation du nombre de projets démonstrateurs (0 → 4) produit un effet tout aussi restreint (≈ 0.4 navire).

Ces résultats renforcent la conclusion selon laquelle les fondamentaux économiques dominent les résultats d’adoption, tandis que les mesures de gouvernance apportent un soutien incrémental mais cohérent dans son orientation. Les appuis issus des réseaux de classification et les projets démonstrateurs agissent principalement comme compléments à une adoption tirée par la VAN, plutôt que comme déclencheurs autonomes de transitions systémiques. Les implications de ces résultats pour les scénarios étudiés sont discutées à la Section 4.

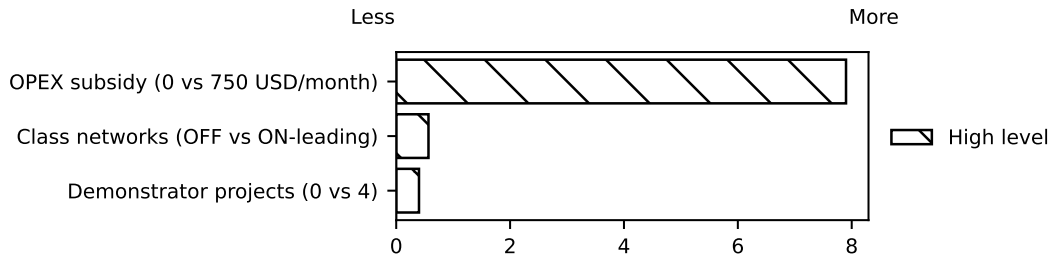


Figure 5.: Analyse de sensibilité en tornade limitée aux seuls leviers de gouvernance. Les paramètres économiques et techniques sont maintenus à leurs valeurs de référence, tandis que la subvention OPEX, les réseaux de classification et les projets démonstrateurs varient individuellement.

4. Résultats

4.1. Structures de financement

La comparaison entre les scénarios *Owner CAPEX* et *Supplier CAPEX* met en évidence des différences substantielles dans les dynamiques d’adoption. Lorsque les armateurs doivent supporter l’intégralité des coûts d’investissement initiaux, l’adoption ne progresse que dans des conditions économiques favorables, c’est-à-dire lorsque l’efficacité perçue est élevée et que les effets sur les revenus sont significatifs. Dans ces cas, l’adoption est progressive et partielle. Dans des conditions économiques moins favorables, par exemple une efficacité de 50% pour un taux journalier de \$20k/jour, l’adoption est pratiquement bloquée. À l’inverse, dans le scénario *Supplier CAPEX*, le modèle par abonnement supprime la barrière de l’investissement initial, conduisant à une adoption complète. L’implication managériale est que le transfert du CAPEX vers le fournisseur modifie matériellement les décisions d’investissement : des projets marginaux dans un schéma de financement traditionnel deviennent viables, et la diffusion s’accélère à l’échelle de la flotte.

L’analyse de sensibilité confirme que le mode de financement est le facteur dominant structurant les résultats d’adoption, avec un écart de 34 navires entre les configurations *Supplier CAPEX* et *Owner CAPEX*. Cela concorde avec les simulations de scénarios : sous *Supplier CAPEX*, l’adoption converge systématiquement vers des niveaux élevés, tandis que sous *Owner CAPEX*, la diffusion demeure bloquée à moins que les taux

journaliers et l'efficacité ne soient simultanément favorables.

4.2. Rôle des sociétés de classification et des démonstrateurs

L'analyse en tornade limitée aux leviers de gouvernance montre que l'activation des réseaux de classification n'accroît l'adoption finale que de 0.6 navire, ce qui indique que l'appui institutionnel, à lui seul, est insuffisant pour modifier substantiellement les résultats lorsque les conditions économiques sont maintenues constantes. De même, les projets démonstrateurs n'augmentent l'adoption que de 0.4 navire, ce qui traduit une influence décroissante dans l'hypothèse de référence où les anticipations des armateurs sont déjà modérément élevées ($E = 0.6$). Leur rôle principal est donc complémentaire : stabiliser les anticipations dans les scénarios limites plutôt que susciter l'adoption de manière autonome.

4.3. Rôle de la capacité des chantiers navals

Les scénarios faisant varier le nombre de chantiers navals montrent que la capacité physique d'installation constitue un déterminant critique de la vitesse de diffusion. Lorsque seuls deux chantiers sont disponibles, l'adoption est retardée ou plafonnée même dans des conditions économiques favorables, de nombreux armateurs disposés à adopter ne parvenant pas à programmer les rétrofits nécessaires. L'augmentation de la capacité à six chantiers répartis aléatoirement supprime ce goulet d'étranglement sur la grille toroïdale 32x32 ; sous le scénario *Supplier CAPEX*, l'adoption complète est atteinte en moins de quatre ans, tandis que sous *Owner CAPEX*, l'adoption s'accélère sensiblement. Ces résultats soulignent que la disponibilité des infrastructures peut être aussi décisive que le financement, et que la stratégie de déploiement doit articuler conjointement les incitations commerciales avec la capacité physique d'installation sur la zone ciblée. Les résultats de simulation confirment un effet modéré de la capacité des chantiers navals (≈ 11 navires), indiquant que le débit d'installation contraint la vitesse de diffusion mais demeure secondaire par rapport aux effets du financement et du taux journalier (Figure 4).

4.4. Rôle des subventions

Les analyses de sensibilité montrent qu'une subvention OPEX de 500 à 750 USD/mois accroît l'adoption finale de 8 à 10 navires selon le scénario. Cela confirme que les subventions déplacent les cas marginaux relevant du scénario *Owner CAPEX* vers une zone de viabilité, mais n'affectent pas de manière significative la diffusion sous *Supplier CAPEX*, où le mode de financement permet déjà de lever les barrières à l'adoption. Les subventions agissent donc comme une mesure corrective, mais non comme des accélérateurs universels (Figure 4).

4.5. Synthèse des résultats de simulation

Dans l'ensemble des expériences, l'adoption est principalement gouvernée par le mode de financement, le taux journalier et l'efficacité de détection. Ces trois facteurs déterminent conjointement si les seuils de VAN et d'anticipation sont franchis pour la majorité des agents. La capacité des chantiers navals agit comme un goulet

d'étranglement d'installation et influence le calendrier de diffusion, tandis que les subventions OPEX apportent un soutien modeste mais orienté positivement dans les configurations marginales de type *Owner CAPEX*. À l'inverse, les leviers de gouvernance tels que l'appui des réseaux de classification et les projets démonstrateurs n'exercent que de faibles effets pris isolément (moins d'un navire dans l'analyse en tornade limitée aux politiques). Leur rôle demeure complémentaire : ils stabilisent les trajectoires de diffusion en renforçant l'alignement des anticipations, sans toutefois déplacer à eux seuls les équilibres d'adoption.

Les résultats combinés sont synthétisés dans les recommandations spécifiques aux parties prenantes présentées aux Tableaux 6, 7 et 8.

5. Discussion

5.1. *Interprétation du point de vue de la gouvernance*

Les résultats de simulation confirment que l'adoption du diagnostic à distance dans le transport maritime présente les caractéristiques classiques d'un problème de coordination. L'adoption n'est pas déterminée par le seul coût du capital, mais par les anticipations des armateurs E concernant la crédibilité systémique, la réduction du risque et l'appui institutionnel. Toutefois, les résultats de sensibilité montrent que les fondamentaux économiques (définis par le mode de financement, le taux journalier d'affrètement et l'efficacité de détection) dominent les résultats d'adoption, le seul financement expliquant un écart de 34 navires dans l'adoption finale.

Du point de vue de la gouvernance, cela implique que des incitations isolées produisent des effets limités à l'échelle du système, sauf si elles modifient directement les conditions économiques sous-jacentes. Une subvention mensuelle d'OPEX peut accroître l'adoption dans les scénarios *Owner-CAPEX*, à condition qu'elle soit suffisante pour permettre le franchissement du seuil de VAN. Toutefois, de telles mesures n'affectent pas l'adoption sous un financement de type *Supplier-CAPEX*, où l'adoption est déjà rationnelle du point de vue privé.

Le rôle des subventions dans la correction du désalignement entre intérêts privés et intérêt collectif est cohérent avec la littérature récente en économie de la logistique et des transports. Chen and Fan (2025) montrent qu'en présence d'effets de débordement, des décisions décentralisées d'investissement en R&D peuvent ne pas maximiser le bien-être social, et que des subventions publiques peuvent partiellement rétablir l'alignement entre la rentabilité des entreprises et l'efficacité à l'échelle du système. Nos résultats soulignent de manière similaire l'importance de subventions ciblées pour surmonter les écarts entre incitations privées et résultats socialement souhaitables.

Des défis analogues de coordination et d'alignement des incitations ont été identifiés dans d'autres contextes maritimes et logistiques d'adoption technologique. Par exemple, Zhang et al. (2026) développent un modèle de théorie des jeux appliqué à l'adoption de l'alimentation électrique à quai et montrent que des instruments de gouvernance combinés — en particulier l'association de taxes carbone et de subventions unitaires — sont nettement plus efficaces que des mesures isolées. Leur analyse met également en évidence la manière dont les contraintes d'infrastructure et le pouvoir de négociation des parties prenantes peuvent freiner l'adoption dans certaines structures de marché, ce qui concorde avec notre constat selon lequel la capacité des chantiers navals et les structures de financement façonnent de manière critique les résultats de

diffusion.

De même, les actions institutionnelles (mise en place de normes d'échange de données, cadres de gouvernance ou reconnaissance du diagnostic à distance dans les référentiels des sociétés de classification) soutiennent l'alignement des anticipations, mais ne produisent que des effets autonomes marginaux : le test de sensibilité limité aux leviers de gouvernance montre que l'activation des réseaux de classification et les projets démonstrateurs génèrent chacun moins d'un adoptant supplémentaire (respectivement 0.6 et 0.4 navire). La raison de cette faible influence est inhérente à la modélisation des anticipations (Annexe E).

Les mécanismes liés aux démonstrateurs et aux réseaux de classification opèrent exclusivement par le canal des anticipations, et leurs incréments sont volontairement calibrés à un niveau modeste, conformément à la formulation d'apprentissage socio-technique de Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla (2019). Dans ce cadre, les anticipations évoluent lentement sous l'effet de l'apprentissage social et d'effets démonstrateurs limités, tandis que les principaux moteurs de variation des anticipations sont (i) la performance opérationnelle effectivement observée et (ii) la persuasion induite par les fournisseurs.

Dans le contexte du NR690, ces deux canaux dominants poussent déjà les anticipations au-dessus du seuil d'adhésion pour la majorité des navires sous financement de type *Supplier-CAPEX*, laissant peu de marge à un relèvement supplémentaire provenant de l'accélération via les réseaux de classification ou d'un faible incrément démonstrateur. Autrement dit, les externalités de réseau et les démonstrations ne sont pas inefficaces en soi ; elles cessent simplement d'être contraignantes parce que les conditions économiques et la persuasion des fournisseurs ont déjà fait franchir au système le point de bascule.

Les liens de réseau liés à la classification ou les démonstrateurs ne deviennent influents que lorsque les anticipations initiales sont faibles. Ce paramétrage peut être retenu pour modéliser des systèmes spécifiques de diagnostic à distance bénéficiant d'un niveau de confiance relativement faible de la part des utilisateurs. Le présent article traite la solution agrégée de diagnostic à distance comme uniformément digne de confiance entre pairs, mais des modèles futurs pourraient introduire une granularité plus fine dans l'hétérogénéité des solutions préventives.

Cela permettrait de faire varier les anticipations et la confiance selon les capacités perçues de détection et de prévention, en fonction des types de navires, des opérateurs et des contextes opérationnels. Par exemple, des fonctions d'évitement des collisions pourraient se voir attribuer un niveau d'anticipation plus faible que la détection des défaillances d'équipement au sein d'un même ensemble de diagnostic.

Ces résultats concordent avec les observations empiriques issues d'autres domaines du transport, dans lesquels l'adoption technologique a nécessité un alignement conjoint des incitations économiques et d'une gouvernance crédible, plutôt que de simples mesures informationnelles (Geels 2022). Les politiques combinant un soutien économique temporaire avec une coordination institutionnelle durable demeurent donc la voie la plus efficace pour accélérer l'adoption initiale.

5.2. Comparaison avec la littérature plus large sur l'innovation dans les transports

Un schéma récurrent ressortant de la littérature plus générale sur l'innovation dans les transports est que l'adoption dépend non seulement de la performance intrinsèque

d'une technologie, mais aussi de l'alignement des incitations économiques, des anticipations des acteurs et de la crédibilité institutionnelle. Nguyen, Chen, and Du (2023) constatent que l'adoption de la blockchain dans le transport maritime conteneurisé est moins freinée par des limites techniques que par des frictions organisationnelles et la complexité de la gouvernance multi-acteurs, notamment une standardisation insuffisante et les difficultés de coordination entre parties prenantes diverses. Leurs résultats montrent que les déficits de confiance, les incitations désalignées et des dispositifs de gouvernance fragmentés peuvent ralentir l'adoption même lorsque des gains d'efficacité sont théoriquement atteignables. Dans un contexte technologique maritime comparable, Romero et al. (2025) montrent que la diffusion de la propulsion assistée par le vent s'accélère lorsque les subventions sont ciblées vers les armateurs disposant du plus grand nombre de connexions dans les réseaux sociaux, ceux-ci exerçant une influence plus forte sur leurs pairs et contribuant à déclencher des cascades d'adoption plus larges. Wang and Ke (2018) montrent qu'en Chine, le déploiement des infrastructures de recharge pour véhicules électriques a été freiné par l'importance des coûts initiaux et l'incertitude des revenus, et que des modèles de partenariat public-privé (PPP), incluant des mécanismes de financement compensatoire, ainsi qu'une coordination intersectorielle peuvent contribuer à combler les déficits d'investissement et à rendre les projets financièrement viables.

Pris ensemble, ces travaux reflètent les dynamiques observées dans nos simulations : l'adoption des diagnostics à distance est façonnée par une combinaison de structures de financement, de formation des anticipations et d'appui institutionnel, plutôt que par la seule performance technique. Le constat selon lequel un financement fondé sur l'abonnement peut faciliter l'adoption est ainsi cohérent avec les observations relevées dans différents secteurs des transports.

5.3. Structures de financement et interaction avec la gouvernance

Le modèle distingue les rétrofits financés par l'armateur des schémas d'abonnement financés par le fournisseur. Lorsque les armateurs supportent l'intégralité du CAPEX, d'environ 36 000 USD par navire, les valeurs actuelles nettes demeurent négatives en l'absence de subvention temporaire. À l'inverse, les abonnements financés par le fournisseur (dans lesquels le CAPEX est pris en charge par le prestataire de diagnostic puis récupéré via une redevance annuelle d'abonnement en OPEX) génèrent des VAN positives pour l'armateur comme pour l'affréteur, même sans soutien public. Ce résultat souligne l'importance de la conception du financement comme levier de gouvernance : des modèles d'abonnement fondés sur le marché peuvent se substituer à des incitations budgétaires prolongées tout en maintenant la viabilité économique.

5.4. Implications pour la conception des politiques publiques

Le modèle suggère que l'exigence de contrats de diagnostic de long terme pourrait stabiliser les schémas de financement de type *Supplier-CAPEX* et améliorer la continuité des inspections. Les régulateurs pourraient imposer un contrat de service de diagnostic de 5 ans comme condition d'autorisation d'exploitation des nouvelles technologies, conjointement avec une classification équivalente à NR690. Des clauses contractuelles standardisées ainsi qu'une poursuite obligatoire du contrat lors de la vente du navire protégeraient le recouvrement des coûts du fournisseur, tandis que les autorités régionales sécuriseraient leur accès au monitoring continu, au signalement des

défaillances et à l'assurance de sécurité.

La conception de la gouvernance devrait se concentrer sur des incitations transitoires compensant le risque informationnel des premières phases de déploiement, plutôt que sur des subventions permanentes d'exploitation. Les implications stratégiques suivantes ont été identifiées pour les décideurs publics et les régulateurs du secteur.

- (1) Les cadres de sanction doivent éviter de décourager la transparence ; la détection précoce de précurseurs ne devrait pas entraîner de conséquences punitives lorsqu'ils sont traités dans des délais raisonnables.
- (2) Une autre priorité consiste à renforcer l'appui institutionnel et le ciblage sectoriel. Les sociétés de classification agissent comme des coordinateurs influents des anticipations au sein du réseau d'apprentissage social, contribuant à stabiliser l'adoption dans les scénarios limites en fournissant une gouvernance crédible du diagnostic à distance.
- (3) L'adoption précoce devrait être prioritairement encouragée dans les segments à haut risque et à forte complexité — tels que les navires à carburants alternatifs, les systèmes autonomes et les opérations offshore — où le monitoring préventif génère des bénéfices collectifs plus élevés.
- (4) Les subventions sont déterminantes dans les scénarios *Owner CAPEX*.

Des mécanismes d'engagement institutionnel — tels que le cadre NR690 et les régimes réglementaires facilitateurs associés — pourraient agir comme signaux de coordination modifiant les incitations, rendant l'équilibre de haute assurance atteignable et stable. Dans les conditions actuelles du marché, la décision d'adopter des systèmes numériques de monitoring des risques n'est rationnelle du point de vue privé que pour les opérateurs confrontés à des taux journaliers élevés ou à des incitations réglementaires. Cependant, dans la mesure où une grande partie des bénéfices en matière de sécurité et de continuité profite à des tiers — affréteurs, assureurs et public au sens large — le niveau d'adoption socialement rationnel est sensiblement plus élevé. Cette divergence justifie un soutien institutionnel ou des obligations de mise en œuvre à l'échelle des flottes pour des cadres analogues à NR690.

6. Limites et pistes de recherche futures

Plusieurs hypothèses simplificatrices limitent la portée du modèle. Premièrement, l'analyse dépend de la disponibilité et de la qualité des données relatives aux incidents, à la démolition des navires et à leur utilisation, ce qui peut affecter les probabilités estimées ainsi que les profils de pertes. Deuxièmement, la cartographie des impacts économiques et les règles de mise à jour comportementale constituent des représentations simplifiées de dynamiques socio-économiques plus complexes et ne rendent pas compte de manière exhaustive de la diversité des préférences au risque des armateurs, des conditions de financement ou des arrangements contractuels d'affrètement. Troisièmement, les affréteurs ne sont pas représentés comme agents explicites ; leur influence intervient indirectement au travers des paramètres d'anticipation. Quatrièmement, la performance technique (η) est supposée fixe, alors qu'en pratique l'efficacité de détection évolue par apprentissage opérationnel. Cinquièmement, la grille spatiale de simulation 32x32 est statique et homogène, alors que les marchés réels présentent des schémas commerciaux différenciés et des environnements réglementaires variés. Sixièmement, le modèle ne considère que les rétrofits, alors que l'adoption peut également se produire via des navires neufs entrant en service

avec des systèmes intégrés de diagnostic à distance.

Les recherches futures pourraient traiter ces limites en introduisant des agents affréteurs explicites, des mécanismes dynamiques d'apprentissage de la performance et des interactions réglementaires multi-juridictionnelles. Une modélisation sectorielle spécifique — par exemple pour les méthaniers LNG ou les navires de soutien offshore — permettrait une calibration plus précise des paramètres comportementaux et techniques. L'extension du cadre au-delà de l'hypothèse d'un navire par armateur, afin d'inclure de grands exploitants de flotte, permettrait d'analyser l'influence des réseaux et les asymétries de pouvoir de marché. Le module de subvention pourrait être enrichi afin d'examiner des dispositifs de soutien dégressifs. Enfin, l'intégration des trajectoires d'adoption via les navires neufs et l'affinement des dynamiques d'anticipation à partir de données empiriques issues de déploiements récents alignés sur NR690 amélioreraient le réalisme et la transférabilité du modèle d'adoption.

7. Conclusions

Cette étude a développé une approche de modélisation multi-agents intégrant un modèle d'agents, des données relatives aux défaillances de flotte et aux taux d'incidents, ainsi qu'une analyse coûts-bénéfices, afin d'examiner le potentiel de diffusion des systèmes de diagnostic à distance et de quantifier les arrangements financiers, les soutiens institutionnels et les contraintes de déploiement dans le contexte de la note de classification centrée sur les données NR690.

Les principaux résultats peuvent être résumés comme suit.

- Une efficacité de détection des défaillances et des précurseurs d'environ 60% constitue un seuil pratique pour une adoption durable des systèmes de diagnostic à distance.
- Lorsque les dépenses d'investissement sont supportées par les armateurs, les valeurs actuelles nettes demeurent négatives et l'adoption de ces systèmes reste bloquée.
- À l'inverse, le transfert du CAPEX vers le fournisseur du système de diagnostic, avec recouvrement des coûts via une tarification par abonnement, génère de manière constante des VAN positives et permet une adoption quasi complète de la flotte dans des horizons temporels réalistes.
- Le partage de l'OPEX entre l'affréteur et l'armateur est déterminant, tout en étant justifié par la gouvernance du partage des données industrielles conformément à NR690.
- Les subventions OPEX se révèlent utiles dans les scénarios marginaux pour accroître l'adoption des systèmes de diagnostic.
- De faibles anticipations initiales peuvent être surmontées grâce à la reconnaissance des systèmes de diagnostic par les sociétés de classification, ce qui peut stabiliser les trajectoires d'adoption en réduisant l'incertitude dans les scénarios limites.
- Une capacité limitée des chantiers navals et une disponibilité géographique insuffisante peuvent retarder ou restreindre l'adoption des systèmes de diagnostic à distance, même lorsque les incitations économiques sont favorables.
- Les diagnostics à distance doivent prendre en compte à la fois les défaillances d'équipement dépendantes de l'âge et les incidents liés à l'erreur humaine indépendants de l'âge afin de constituer un modèle économique viable, la seule

prévention centrée sur les équipements étant généralement insuffisante pour franchir les seuils d'investissement.

Au-delà des améliorations directes en matière de sécurité, le modèle montre qu'une adoption à grande échelle des diagnostics à distance réduit la fréquence et la durée attendues des périodes d'immobilisation commerciale (*off-hire*) en permettant une détection et une correction plus précoces, tant des dégradations du matériel que des précurseurs opérationnels. Dans le cadre d'un déploiement financé par le fournisseur, cela conduit à une adoption quasi complète de la flotte en l'espace d'une décennie et se traduit par une réduction significative des indisponibilités non planifiées des navires, avec des améliorations correspondantes de la fiabilité de flotte et de la robustesse des plannings.

Les limites de l'étude tiennent à la disponibilité et à la qualité des données d'incidents, à la simplification des comportements modélisés et à l'hypothèse d'un armateur propriétaire d'un seul navire.

Les recherches futures devraient intégrer des structures de propriété multi-navires, des comportements sectoriels spécifiques, des régimes de subventions dégressifs et des hypothèses de diffusion actualisées à partir des expériences récentes de déploiement.

Clause de non-responsabilité

Les opinions ou points de vue exprimés dans le présent article n'engagent que leur auteur et ne sauraient être attribués à Chubb European Group SE ni à l'une quelconque de ses filiales ou sociétés du groupe.

Appendix A. Règle de décision microéconomique d'investissement

Au niveau microéconomique, chaque armateur est confronté à la décision d'investir ou non dans une action corrective lorsqu'un défaut technique est identifié, ou de poursuivre l'exploitation jusqu'à la prochaine inspection. La frontière de décision rationnelle peut être exprimée par l'inégalité suivante, qui compare le coût attendu d'une réparation proactive au coût attendu d'une absence d'intervention :

$$C < P_d P_i F + PL^{\text{ship}}, \quad (\text{A1})$$

où C est le coût annualisé de l'investissement dans les mesures préventives ; P_d est la probabilité qu'un défaut soit détecté par un inspecteur lors d'une visite ; P_i est la probabilité que l'inspecteur examine le composant critique spécifique sur lequel le défaut survient ; F désigne la pénalité financière, le retard ou le coût d'immobilisation commerciale (*off-hire*) supporté si le défaut est découvert lors de l'inspection ; P est la probabilité d'une défaillance en exploitation si le défaut demeure non résolu ; et L^{ship} représente la perte monétaire associée à un tel événement de défaillance pour l'armateur.

Le membre de droite représente le coût attendu combiné d'une immobilisation du navire consécutive aux résultats de l'inspection et de la survenance d'une panne en exploitation. Lorsque la probabilité d'inspection ou de détection est faible, la pénalité attendue est corrélativement réduite, ce qui peut rendre le report de maintenance économiquement rationnel, même pour des systèmes critiques. Ce mécanisme explique

pourquoi des problèmes techniques non résolus peuvent persister dans les régimes d'inspection traditionnels.

Les diagnostics à distance conformes à NR690 modifient fondamentalement cette structure d'incitations. Dans le cadre de notes règlementaires telles que NR690 de Bureau Veritas Marine & Offshore (2024b), l'utilisation de systèmes de diagnostic continu accroît la probabilité de détection des défauts P_d vers l'unité, révélant des anomalies latentes bien avant une inspection programmée. Ils réduisent également la probabilité de défaillance non maîtrisée P_f grâce à une intervention plus précoce. En conséquence, le coût attendu figurant au membre de droite de l'inégalité augmente fortement, ce qui déplace la décision rationnelle vers une action corrective immédiate. À cet égard, les diagnostics conformes à NR690 transforment le report des mesures préventives, d'un choix économique plausible, en une option qui n'est plus rationnelle dès lors que la transparence s'accroît. Cela illustre comment des diagnostics fréquents et crédibles peuvent prévenir des défaillances techniques majeures ainsi que les pertes collectives qui y sont associées.

Table 1.: Comparaison des notations de classification relatives aux capacités des navires fondées sur les données

	NAUTConnect de DNV (2022)	DATA-CENTRIC (NR690) de Bureau Veritas Marine & Offshore (2024b)	DDV de DNV (2021); Det Norske Veritas AS (DNV) (2021, 2025b,a), SMART(OPM, MHM, AEM) de American Bureau of Shipping (ABS) (2025), SMART by Bureau Veritas Marine & Offshore (2024a), DSS de ClassNK (2022), i-Ship de China Classification Society (CCS) (2020), Digital Twin READY-LIVE de Lloyd's Register (2018)
Portée	Systèmes de passerelle et de navigation (IBS, ECDIS, réseaux radar, intégration de capteurs) ; monitoring continu à distance de l'état de fonctionnement.	Solutions numériques destinées à collecter et gérer les données en vue d'analyses régulières des capacités fonctionnelles et d'essais entre les visites périodiques de classification. La portée comprend la collecte de données à bord du navire, les méthodes d'évaluation ainsi que l'accès aux données à bord et depuis la terre. Gouvernance des données industrielles afin de faciliter le reporting conformément à la SOLAS, Chapitre I, Partie B, Règle 11(c)	Capacités numériques, aptitude à la maintenance conditionnelle et appui à la préparation des visites (varie selon la société de classification).
Vérification automatique de la conformité entre les visites périodiques	Oui : catégories de non-conformité et processus de reporting imposés pour des jeux de données spécifiques répertoriés ; DNV conserve une capacité de monitoring.	Oui : catégories de non-conformité et processus de reporting imposés lorsque les méthodes de traitement des données industrielles sont approuvées par la société de classification.	Non : les résultats de monitoring sont utilisés lors des visites périodiques, et non pour des contrôles réguliers de conformité entre les visites.
Gouvernance du partage des données	Flux direct de données entre l'armateur et la société de classification ; la société de classification conserve l'autorité diagnostique.	Entre l'armateur, l'affrèteur, les autorités régionales et des prestataires indépendants de diagnostic certifiés, dans le cadre d'un modèle normalisé de confiance appliquée aux données, assorti de procédures d'escalade.	Centré sur l'armateur ; analyses indépendantes autorisées ; la société de classification ne peut examiner les données que lors des intervalles entre visites.
Résultats du diagnostic (où / par qui)	À terre par la société de classification (DNV réalise directement la détection et l'interprétation des anomalies). La société de classification examine les résultats lors des visites et de manière continue entre celles-ci.	À terre par des prestataires de diagnostic certifiés par la société de classification ; la société de classification valide les méthodes de diagnostic. La société de classification examine les résultats lors des visites ou lorsqu'une non-conformité majeure a été détectée par un prestataire certifié.	À terre / à bord par l'armateur, le fabricant d'origine (OEM) ou des outils analytiques automatisés ; la société de classification examine les résultats lors des visites.

Table 2.: Ensembles de mise en œuvre et structure de coûts associée pour une solution conforme à NR690.

Ensemble	Résumé de la configuration	CAPEX (USD)	OPEX (USD/an)
Minimum Viable à NR690	PC edge conforme IEC-60945 ; interface sur ordinateur portable ; une passerelle de protocole et un switch administrable ; ~100 m de câblage ; 2–3 jours d’intégration, 3–5 jours de paramétrage du prestataire de diagnostic ; pare-feu de base + télémétrie cyber open source ; aucun capteur additionnel	22,000	9,000 (8,000 diagnostic + 1,000 SIEM)
Baseline (ensemble de référence)	Comme ci-dessus, avec ~200 m de câblage ; points E/S supplémentaires ; 6 capteurs de vibration + 2 capteurs de pression ; 4–5 jours d’intégration ; 5–8 jours de paramétrage du diagnostic	36,000	10,000 (9,000 diagnostic + 1k SIEM)
Extended / Robust	IHM montée sur panneau ; switch L3 de plus grande capacité et passerelles supplémentaires ; ~400 m de câblage ; augmentation des points d’intervention de la société de classification ; 12 capteurs de vibration + 4 capteurs de pression ; 6–8 jours d’intégration ; 7–10 jours de paramétrage du diagnostic	70,000	12,000 (10,000 diagnostic + 2,000 SIEM administré)

Table 3.: Principaux paramètres du modèle et valeurs de référence.

Symbole	Description	Valeur de référence
η	Efficacité de monitoring (échelle de 0 à 1)	0.6
C_{CAPEX}	Dépense d’investissement supportée par l’armateur (USD)	36 000
C_{OPEX}	Coût annuel d’exploitation ou d’abonnement (USD)	12 000
r	Taux d’actualisation	8.5%
T	Horizon économique (années)	10
N	Nombre d’agents (armateurs)	100
τ	Seuil d’anticipation	0.6

Table 4.: Scénario de référence et variations des paramètres utilisées dans l’analyse de sensibilité en tornade.

Paramètre	Cas bas	Valeur de référence	Cas haut
Mode de financement	CAPEX armateur	CAPEX fournisseur	CAPEX fournisseur
Taux journalier (USD/jour)	15,000	20,000	25,000
Efficacité η	0.50	0.60	0.70
Capacité des chantiers navals	2	4	6
Subvention OPEX (USD/mois)	0	0	500
Réseaux de classification	OFF	ON	ON-dominant
Projets démonstrateurs	0	2	4

Table 5.: Leviers de gouvernance et variations des paramètres utilisés dans l’analyse de sensibilité en tornade limitée aux politiques, pour un taux journalier de 18 000 USD/jour.

Levier de gouvernance	Valeur de référence	Cas haut
Subvention OPEX (USD/mois)	0	750
Projets démonstrateurs	0	4
Réseaux de classification	OFF	ON-dominant

Table 6.: Recommandations à l’intention des fournisseurs de technologies

Recommandation	Justification
Proposer des modèles CAPEX fondés sur l’abonnement	La suppression de la barrière du capital initial favorise systématiquement l’adoption, même dans des conditions économiques limites.
Établir des partenariats avec les principales sociétés de classification	Le soutien précoce d’une grande société de classification accélère et stabilise la diffusion, en réduisant l’incertitude sur le marché.
Investir dans les infrastructures de déploiement	L’extension de la couverture et de la capacité des chantiers navals est aussi cruciale que la tarification : sans accès, les armateurs ne peuvent adopter, quelle que soit leur volonté.
Soutenir des dispositifs de subvention ciblés	Travailler avec les régulateurs et les assureurs afin de concevoir des subventions OPEX modérées permettant de combler l’écart de VAN pour les segments d’armateurs hésitants.
Cibler les segments intermédiaires	Le principal levier ne se situe ni dans les cas favorables ni dans les cas défavorables (qui adoptent totalement ou pas du tout), mais dans les situations économiques marginales où un soutien fait basculer la décision.

Table 7.: Recommandations à l'intention des armateurs

Recommandation	Justification
Adopter tôt lorsque les conditions économiques sont favorables	Dans les cas de forte efficacité et de taux journalier élevé, attendre ne fait que retarder les gains ; les adopteurs précoces captent la valeur plus rapidement.
Recourir aux modèles par abonnement	Le transfert du risque CAPEX vers les fournisseurs de technologies réduit l'exposition financière et améliore la flexibilité à l'échelle de la flotte.
Utiliser les démonstrateurs de manière sélective	Bien que moins décisifs dans ce modèle, les projets de démonstration réels peuvent réduire l'incertitude interne et justifier une adoption précoce dans les entreprises à gouvernance prudente.
Profiter des opportunités de subvention	Un soutien ciblé peut rendre rentables des cas de VAN marginaux ; les armateurs devraient surveiller les dispositifs disponibles et en tirer parti.

Table 8.: Recommandations à l'intention des décideurs publics et des assureurs

Recommandation	Justification
Cibler les subventions sur les cas limites	Les subventions OPEX transforment des scénarios marginaux en adoption complète tout en minimisant la dépense publique.
Mobiliser la souscription préférentielle	Les assureurs peuvent récompenser les adoptants de technologies de monitoring par des primes réduites fondées sur des dynamiques mesurables de gestion des précurseurs, renforçant ainsi une VAN positive.
Exiger des contrats de service de diagnostic de long terme	L'obligation de contrats pluriannuels de diagnostic à distance (avec clauses standardisées et poursuite après la vente du navire) soutient les modèles <i>Supplier-CAPEX</i> permettant le recouvrement des coûts, tout en garantissant des notifications rapides aux autorités.
Soutenir le développement des infrastructures	Des partenariats public-privé portant sur l'extension des chantiers navals ou sur les processus de certification peuvent lever les goulets d'étranglement spatiaux.
Promouvoir l'appui institutionnel	Engager les sociétés de classification à proposer, pour chaque membre de l'IACS, un cadre équivalent au BV NR690, par exemple via de nouvelles <i>IACS Unified Requirements</i> relatives au diagnostic à distance et à la gouvernance.
Cibler les secteurs à haut risque	Mettre en œuvre des politiques encourageant des cadres équivalents à NR690 pour les nouvelles technologies et pour le transport maritime en tant qu'infrastructure critique, par exemple dans les domaines nucléaire, ammoniac-carburant, autonome ou offshore.
Appliquer des sanctions non discriminatoires	Ne pas sanctionner la détection précoce des précurseurs, fixer des délais réalistes de mise en conformité tout en exigeant des plans de gestion des risques.
Concevoir des politiques adaptatives	Veiller à ce que les programmes de subventions et d'incitations soient réexaminés périodiquement afin de refléter l'évolution des marchés du carburant, des cadres réglementaires et des obligations de décarbonation.

Appendix B. Dérivation des paramètres de probabilité (P) et de perte (L)

La présente annexe dérive les paramètres de probabilité et de perte utilisés pour calibrer la règle microéconomique d'adoption selon l'inégalité (A1) de l'Annexe. A. Les deux sources suivantes de risque d'incident sont prises en compte : (i) les défaillances techniques, représentées par les événements d'avarie ou de panne mécanique ; et (ii) les incidents opérationnels liés à l'erreur humaine, tels que collisions, échouements, allisions et chavirements. Les deux catégories sont traitées dans un cadre économique commun au moyen d'une probabilité annuelle de défaillance (P) et d'une perte monétaire associée par événement (L). Les pertes attendues pour l'affréteur sont également dérivées à partir du taux journalier.

B.1. Sources de données et prétraitement des statistiques de défaillance technique

Lloyd's List Intelligence (2025) recense 17 002 entrées classées Machinery damage / failure entre 2015 et 2025, représentant environ 18 % de la flotte marchande mondiale estimée entre 55 000 et 60 000 navires. La distribution d'âge de la flotte provient de (UNCTAD 2018), avec les classes d'âge 0–4, 5–9, 10–14, 15–19 et 20+ ans, représentant respectivement 13.75 %, 22.01 %, 13.25 %, 8.54 % et 42.46 % de la flotte.

La probabilité annuelle de défaillance mécanique est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$P_f(a) = \frac{N_{\text{incidents}}(a)}{10 N_{\text{ships}}(a)}, \quad (\text{B1})$$

où $N_{\text{incidents}}(a)$ est le nombre de pannes à l'âge du navire a , et $N_{\text{ships}}(a)$ le nombre estimé de navires actifs de cet âge.

Le dénominateur dix représente la fenêtre d'observation de dix ans (2015–2025).

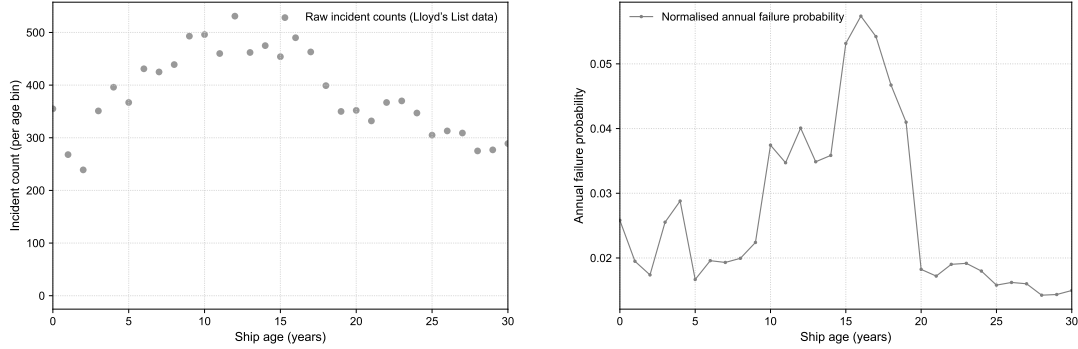
B.2. Résultats empiriques relatifs aux statistiques de défaillance technique

La distribution normalisée de la probabilité annuelle de défaillance mécanique selon l'âge du navire présente un minimum peu marqué à mi-vie plutôt qu'une tendance monotone (Figure B1b). Les probabilités demeurent proches de 2 à 3 % par navire-an pour les navires de moins de dix ans, s'élèvent à environ 5 à 6 % entre 15 et 18 ans, puis diminuent ensuite à mesure que les navires les plus âgés sont retirés du service (Figure B1a). La probabilité moyenne de flotte est $\bar{P}_{\text{tech}} \approx 0.026$, ce qui correspond à environ 2 à 3 incidents du corps et machines par an pour une flotte de 100 navires.

Cette hausse à mi-vie s'explique par le contexte économique et opérationnel de l'exploitation des navires. Entre huit et quinze ans d'âge, les navires sont exploités à intensité maximale alors que les dépenses de maintenance tendent à diminuer, ce qui entraîne une accumulation progressive de dégradations techniques.

L'obsolescence programmée des systèmes d'automatisation et de contrôle contribue également à cette hausse ; des fabricants tels que (Kongsberg Maritime 2023, 2024) assurent généralement un support matériel et logiciel pendant environ dix ans, au-delà desquels les composants deviennent obsolètes et la maintenance cesse. L'exploitation

de ces systèmes au-delà de leur horizon de support accroît la probabilité de défaillance et concorde avec la tendance non linéaire observée.



(a) Nombre brut d'incidents issu des données Lloyd's List (2015–2025). (b) Probabilité annuelle normalisée de défaillance selon l'âge du navire.

Figure B1.: Données empiriques de défaillance mécanique utilisées pour la normalisation des probabilités (Annexe B).

B.3. Incidents impliquant une erreur humaine

Au-delà des défaillances techniques, une part substantielle des accidents maritimes graves trouve son origine dans l'erreur humaine. Les collisions, échouements et allisions résultent souvent d'erreurs d'appréciation en matière de navigation ou de stabilité. Le monitoring numérique des comportements de navigation, par exemple au moyen d'analyses de trajectoires (Maslov et al. 2022), peut ainsi étendre les mesures préventives depuis l'état des équipements vers les risques liés au facteur humain. Les avancées récentes en modélisation de trajectoires fondée sur les données renforcent encore ce potentiel. Gong et al. (2025) développent un transformeur graphe spatio-temporel intégrant l'incertitude pour la prédiction des trajectoires de navires, capable d'apprendre les comportements normaux à partir des données AIS tout en quantifiant explicitement l'incertitude de prédiction dans des conditions maritimes dynamiques. Bien que proposé dans le contexte de la prévision de trajectoire et de la navigation autonome, ce type de modèle illustre la manière dont des capacités probabilistes de détection d'anomalies et d'alerte précoce peuvent être intégrées aux systèmes de diagnostic et de monitoring à distance afin d'identifier des comportements de navigation dangereux avant qu'ils ne conduisent à des incidents.

Pour tous les événements n'impliquant pas une perte totale (avarie mécanique, collision, échouement, allision), on suppose une moyenne de 14 jours d'immobilisation commerciale (*off-hire*) à raison de USD 20 000/jour, ce qui conduit à une perte monétaire de référence par événement de :

$$L_{human,i} = 14 \times 20,000 = 280,000 \text{ USD par événement.}$$

Un supplément de 20 % est appliqué afin de tenir compte des coûts de réparation, de sauvetage et portuaires, conformément à des études de cas d'assurance (Gard, 2019, 2025a, 2025b).

Pour les pertes totales telles que les chavirements, la perte résiduelle non assurée supportée par l’armateur est approximée à USD 10 millions par événement.

Le Tableau B1 présente les probabilités annuelles estimées par navire (P_{human}), fondées sur les fréquences d’incidents de la flotte mondiale 2024 d’environ 50 000 navires rapportées dans (Allianz Commercial 2025).

Table B1.: Probabilités annuelles approximatives par navire P des principaux incidents (Allianz Commercial, 2025).

Type d’incident (2024)	Nombre mondial	Probabilité par navire P_{human}
Collision (navire–navire)	251	0.0050
Échouement (naufragé / échoué)	231	0.0046
Allision (contact avec un objet fixe)	184	0.0037
Chavirement / naufrage (perte totale)	12	0.0002

B.4. Estimation combinée des pertes

Les pertes combinées sont calculées à l’aide de l’équation suivante :

$$PL^{\text{ship}} = P_{\text{human}}L_{\text{human}} + P_{\text{tech}}L_{\text{tech}}$$

En utilisant ces valeurs avec les probabilités observées, la perte attendue combinée pour une flotte de 100 navires par an est résumée ci-dessous. L’exposition combinée résultant de l’ensemble des types d’incidents peut être représentée par une perte attendue de

$$PL^{\text{ship}} = 16,000 \text{ USD par navire et par an.}$$

Cette valeur de perte attendue représente la perte annuelle non assurée agrégée divisée par la taille de la flotte (USD 1.6 million / 100 navires). Elle combine à la fois les pertes partielles et totales, y compris les coûts accessoires, fournissant ainsi une mesure économique unique de l’exposition évitable.

L’introduction de ces paramètres dans la règle microéconomique de l’Annexe A conduit à un seuil annualisé réaliste d’investissement rationnel dans les diagnostics à distance.

B.5. Pertes de continuité du côté de l’affréteur

Alors que les sections précédentes quantifient les pertes supportées directement par les armateurs, les affréteurs sont eux aussi exposés à un risque financier significatif lié à l’indisponibilité des navires.

Les risques proviennent principalement de la continuité des opérations ; l’immobilisation imprévue (*off-hire*) d’un navire affrété n’interrompt pas seulement le service de transport, mais peut également perturber des chaînes de production industrielles, des contrats d’approvisionnement énergétique ou des processus manufacturiers. La présente étude suppose que le coût d’une journée de perturbation peut être approximé par le taux journalier du navire.

En utilisant le même modèle de flotte de 100 navires que ci-dessus, le nombre attendu de jours d'immobilisation évités grâce à l'usage de systèmes de monitoring préventif s'élève à environ 55.7 jours-navire par an. Valorisé à USD 20 000 par jour de perturbation, cela correspond à une économie potentielle de continuité du côté des affréteurs d'environ USD 1.11 million par an (Tableau B3).

B.6. Répartition des coûts

Afin de quantifier plus précisément la valeur conjointe créée dans un scénario d'adoption coordonnée, nous examinons la situation dans laquelle les armateurs, les affréteurs et les fournisseurs d'infrastructures numériques réalisent tous des gains positifs. En utilisant un modèle représentatif de flotte de 100 navires sur une année (fondé sur les distributions d'âge de la flotte issues de l'UNCTAD (2018), un taux journalier d'affrètement de USD 20,000, une hypothèse de 14 jours d'immobilisation commerciale et un facteur additionnel de 20% de pertes accessoires), la perte maximale évitable du côté des armateurs est estimée à environ USD 1.6 million par an. Pour les affréteurs, la prime de continuité correspondante s'élève à USD 1.11 million ; le potentiel total de valeur créé à l'échelle de l'écosystème atteint donc USD 2.71 millions par an.

Afin de déterminer des répartitions viables de la tarification par abonnement, les contraintes suivantes sont appliquées :

- (1) Les affréteurs conservent au moins 25% des gains de continuité effectivement réalisés après paiement des abonnements (c'est-à-dire qu'au maximum 75% des gains peuvent être affectés à l'abonnement annuel) ;
- (2) Les armateurs prennent en charge la part restante du coût d'abonnement tout en conservant une position nette non négative ;
- (3) Le fournisseur d'infrastructure numérique est en mesure de récupérer les dépenses d'investissement dans un délai de retour sur investissement de trois ans ; et
- (4) L'efficacité de détection des diagnostics à distance η est supposée égale à 60%.

Avec une anticipation $E = 1$, ces conditions peuvent être satisfaites pour un abonnement annuel de USD 12,000 par navire, avec une répartition des coûts d'environ 65% à la charge de l'armateur et 35% à la charge de l'affréteur. Dans cette configuration, les armateurs atteignent une position d'équilibre, les affréteurs conservent environ un quart des bénéfices de continuité effectivement réalisés, tandis que le fournisseur d'infrastructure numérique bénéficie d'un flux de revenus financièrement viable.

Table B2.: Perte annuelle attendue de l'armateur PL_{ship} pour 100 navires.

Source de l'incident	Probabilité P (par navire-an)	Nombre attendu d'événements (100 navires)	Perte par événement L^{ship} (USD)	Perte totale attendue (USD) $P \times L^{\text{ship}}$
Défaillances	0.026	2.62	280 000	733 600
Collision	0.0050	0.50	280 000	140 560
Échouement	0.0046	0.46	280 000	129 360
Allision	0.0037	0.37	280 000	103 040
Chavirement / naufrage	0.0002	0.02	10 000 000	240 000
Sous-total	—	—	—	1 346 560
+20 % coûts accessoires	—	—	—	269 312
Total général (100 navires)	—	—	—	1 615 872

Table B3.: Perte annuelle attendue de l'affréteur PL^{chtr} pour 100 navires.

Type d'incident	Événements attendus (pour 100 navires)	Jours d'immobilisation par événement (hyp.)	Total des jours évités	Valeur de continuité (USD 20 000/jour)
Défaillances	2.62	14	36.68	733 600
Collision	0.50	14	7.03	140 560
Échouement	0.46	14	6.47	129 360
Allision	0.37	14	5.15	103 040
Chavirement / naufrage	0.02	14*	0.34	6 720
Total	3.97	—	55.67	1 113 280

Note : Pour le chavirement, la perte totale est déjà intégrée aux valeurs du côté de l'armateur (Tableau B2) ;
14 jours sont indiqués ici uniquement afin d'approximer la perturbation de continuité subie par l'affréteur.

Appendix C. Sources de données et de calibration

La calibration des probabilités de référence et des paramètres de pertes a été fondée sur les données de (Lloyd’s List Intelligence 2025). Le jeu de données couvre les défaillances déclarées pour les navires commerciaux entre 2015 et 2025. Chaque enregistrement comprenait des informations relatives au type de navire et à la catégorie d’incident. Ces données ont été agrégées afin de dériver des probabilités annuelles représentatives de défaillance P_{tech} pour l’ensemble des navires.

Les paramètres obtenus correspondent aux fréquences moyennes d’événements observées dans les catégories de propulsion et de machines auxiliaires. Les données de NGO Shipbreaking Platform (2025) ont été utilisées pour vérifier la cohérence de la distribution de population au regard de la démolition des navires.

Appendix D. Calcul du seuil d’efficacité pour l’adoption

La présente annexe dérive l’efficacité minimale de monitoring η requis pour que l’armateur comme l’affréteur obtiennent une valeur actuelle nette (VAN) strictement positive en adoptant le système de monitoring numérique conforme à NR690. Étant donné que le système de monitoring est partagé sur un même navire et prévient la même catégorie d’incidents pour les deux parties, nous modélisons un paramètre commun unique d’efficacité η .

D.1. Base paramétrique

Le Tableau D1 résume les paramètres utilisés dans le calcul. L’estimation de la perte collective évitable de USD 2.7 millions s’applique à un ensemble de 100 navires, soit USD 27,000 de pertes évitables par navire et par an. Le bénéfice attendu effectivement réalisé est pondéré par le facteur de croyance $E = 0.8$.

Table D1.: Paramètres économiques utilisés pour le calcul du seuil d’efficacité (par navire).

Perte évitable (armateur + affréteur), PL_{total}	USD 27,000 / an
Facteur de croyance / d’anticipation, E	0.8
OPEX annuel (partagé)	USD 12,000 / an
Part armateur de l’OPEX (65%)	USD 7,800 / an
Part affréteur de l’OPEX (35%)	USD 4,200 / an
CAPEX armateur (cas de référence)	USD 36,000 (ponctuel)
Taux d’actualisation (annuel, capitalisation mensuelle)	8.5%
Facteur d’actualisation d’annuité, $PVAF(8.5\%, T)$	$\sum_{m=1}^{12T} (1 + r/12)^{-m}$

D.2. Flux de trésorerie par partie avec un paramètre unique d’efficacité η

En supposant que les bénéfices sont répartis proportionnellement à la clé de partage de l’OPEX (65% armateur, 35% affréteur), les flux de trésorerie annuels sont calculés selon les équations suivantes :

$$\Pi_{\text{ship}} = \eta E (0.65 PL_{\text{total}}) - 7,800, \quad \Pi_{\text{chtr}} = \eta E (0.35 PL_{\text{total}}) - 4,200.$$

Les VAN actualisées sur l'horizon temporel T (années) sont calculées par :

$$\text{NPV}_{\text{ship}} = \Pi_{\text{ship}} \cdot \text{PVAF}(8.5\%, T) - C_{\text{CAPEX}}, \quad \text{NPV}_{\text{chtr}} = \Pi_{\text{chtr}} \cdot \text{PVAF}(8.5\%, T).$$

L'adoption des systèmes de diagnostic des équipements requiert les conditions suivantes :

$$\text{NPV}_{\text{ship}} > 0 \quad \text{and} \quad \text{NPV}_{\text{chtr}} > 0.$$

D.3. Cas 1 : CAPEX financé par l'armateur

L'inégalité applicable à l'armateur conduit au seuil contraignant suivant :

$$\eta > \frac{7,800 \text{ PVAF} + 36,000}{E \cdot 0.65 PL_{\text{tot}} \cdot \text{PVAF}} = \frac{7,800 \text{ PVAF} + 36,000}{14,040 \text{ PVAF}}.$$

Le seuil applicable à l'affréteur est donné par :

$$\eta > \frac{4,200}{E \cdot 0.35 PL_{\text{tot}}} = 0.5556 \quad (55.6\%).$$

Le Tableau D2 présente l'efficacité minimale de détection requise des diagnostics à distance en retenant un taux d'actualisation de 8.5% avec capitalisation mensuelle.

Ainsi, pour des horizons de planification typiques ($T \approx 5-6$ ans), l'efficacité minimale partagée est d'environ 60%.

Table D2.: Efficacité minimale η dans le cas d'un CAPEX financé par l'armateur.

Horizon T (années)	PVAF(8.5%)	η requise
3	31.68	0.636
5	48.74	0.608
6	≈ 57.7	0.600

D.4. Cas 2 : CAPEX financé par le fournisseur

Si le fournisseur de technologie finance le CAPEX, alors $C_{\text{CAPEX}} = 0$ et NPV_{ship} devient purement proportionnelle à Π_{ship} .

Le facteur PVAF s'annule et le seuil minimal d'efficacité devient algébrique, selon ce qui suit :

$$\eta > \frac{7,800}{E \cdot 0.65 PL_{\text{tot}}} = 0.5556, \quad \eta > \frac{4,200}{E \cdot 0.35 PL_{\text{tot}}} = 0.5556.$$

Table D3.: Efficacité minimale η lorsque le CAPEX est financé par le fournisseur.

Seuil unifié η_{\min}	0.556 (55.6%)
Dépendance au taux d'actualisation / à l'horizon	Aucune

D.5. Synthèse

- Avec un CAPEX financé par l'armateur, l'efficacité minimale partagée requise est d'environ 60% dans le cadre d'horizons d'évaluation pluriannuels standards.
- Avec un CAPEX financé par le fournisseur, l'efficacité requise tombe à 55.6% et devient indépendante de l'horizon ainsi que du taux d'actualisation.

La Figure D1 présente également un cas dans lequel l'armateur supporte à la fois le CAPEX et l'OPEX tout en captant seul l'ensemble des gains d'efficacité. Dans cette configuration, l'efficacité requise demeure supérieure à 90% même pour des horizons de planification plus longs, ce qui rend l'adoption économiquement peu plausible. Le schéma de partage des bénéfices et des coûts — correspondant à la reconnaissance par l'affréteur des pertes d'immobilisation évitées (*off-hire*) — n'est donc pas seulement une préférence distributive, mais une condition structurelle de faisabilité d'un monitoring conforme à NR690 au regard de niveaux réalistes de coûts et de pertes.

Appendix E. Mécanismes d'évolution des anticipations et paramétrisation

La présente annexe documente les valeurs paramétriques utilisées pour modéliser la dynamique des anticipations dans le modèle d'adoption des diagnostics à distance. Le Tableau E1 présente les paramètres influençant l'évolution des anticipations des armateurs en réponse aux variations de profit, aux projets démonstrateurs, à la persuasion des fournisseurs et aux externalités entre pairs. Le Tableau E1 précise également la manière dont le présent modèle adapte le cadre d'anticipation proposé par Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla (2019) pour la technologie de propulsion vélique au contexte du monitoring à distance.

La formulation repose sur le modèle socio-technique des anticipations de (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019), dans lequel (i) les armateurs détiennent des anticipations bornées $E \in [0, 1]$, (ii) les anticipations sont mises à jour par une combinaison de performance économique réalisée, de communication entre pairs, d'effets démonstrateurs et de persuasion des fournisseurs, et (iii) les armateurs deviennent favorables à la technologie dès lors que leurs anticipations dépassent un seuil donné, permettant l'adoption si la valeur actuelle nette (VAN) correspondante est positive. Nous conservons intégralement cette logique structurelle, y compris la distinction entre l'apprentissage individuel issu de l'expérience propre de l'armateur et l'apprentissage social provenant du réseau de pairs.

Cependant, plusieurs ajustements doivent être pris en compte lors du transfert du cadre d'analyse depuis une technologie matérielle intensive en capital et à matura-

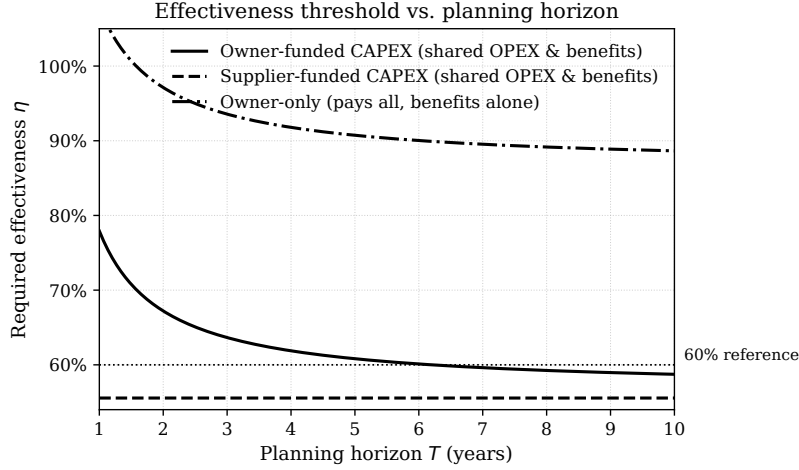


Figure D1.: Efficacité minimale de monitoring η requis pour obtenir une valeur actuelle nette positive selon trois structures de répartition des coûts. Le cas d'un CAPEX financé par l'armateur avec partage de l'OPEX et des bénéfices converge vers $\eta \approx 0.60$ pour des horizons de planification de 5 à 6 ans. Lorsque le CAPEX est financé par le fournisseur, le seuil est invariant par rapport à l'horizon à $\eta = 0.556$. En revanche, si l'armateur supporte l'ensemble des coûts et capte tous les bénéfices, le seuil dépasse 90%, ce qui n'est pas crédible sur le plan opérationnel. Cela démontre que le partage des bénéfices et des coûts entre armateur et affrètement constitue une condition préalable à une adoption économiquement viable.

tion lente, telle que la propulsion assistée par le vent, vers un service numérique de diagnostic à distance. Parmi ces ajustements figurent : des anticipations initiales plus élevées en raison d'une plus grande familiarité avec les outils numériques ; un signal d'apprentissage par le profit normalisé par le profit mensuel du navire afin d'éviter des sauts irréalistes de E lorsque des défaillances sont évitées ; un bruit sur les anticipations plus faible, reflétant une plus grande stabilité des croyances relatives aux systèmes numériques ; et un rôle modifié des sociétés de classification, qui accélèrent principalement la vitesse des externalités de réseau plutôt qu'elles n'augmentent directement les anticipations.

Le Tableau E1 récapitule l'ensemble des paramètres liés aux anticipations utilisés dans les simulations, ainsi que les réglages correspondants dans (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019). L'objectif de ce tableau n'est pas seulement de présenter les choix paramétriques, mais également de montrer comment le transfert du modèle d'anticipation de Karlsen vers un nouveau domaine technologique préserve sa structure théorique tout en adaptant les principaux mécanismes comportementaux aux caractéristiques des systèmes de monitoring.

Paramètre	Propulsion vélique selon (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019)	Monitoring à distance	à Justification
E initial (armateurs non amorcés)	0.175	0.40	Le monitoring est comparativement plus familière ; les armateurs débutent avec une confiance plus élevée.
Soutiens initiaux à forte anticipation	5	5	Maintient la comparabilité avec (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019) ; préserve le rôle des premiers soutiens.
Valeur initiale de E (agents amorcés)	0.75	0.80	Les promoteurs des technologies numériques disposent souvent d'une expérience préalable ; 0.80 reflète un optimisme crédible.
Seuil de soutien (EXsupport)	0.50	0.50	Conforme à (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019), exige un optimisme modéré mais atteignable.
Incrément de persuasion induit par le fournisseur (TPEXincr)	0.15	0.15	Identique à (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019).
Plafond de E lié au fournisseur (TPEXmax)	0.50	0.60	Les fournisseurs présentent des preuves opérationnelles solides ; les anticipations peuvent dépasser 0.60 pour le numérique.
Nombre de fournisseurs (spreaders)	2	2	Conforme à (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019). Les marchés numériques peuvent compter un nombre limité de fournisseurs ou consortiums capables d'atteindre $\eta = 0.6$.
Incrément de E lié aux démonstrateurs (DEXincr)	0.0025	0.0025	Conforme à (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019), bien que les démonstrateurs numériques produisent des preuves plus riches ; des incréments légèrement supérieurs seraient défendables mais la base est conservée.
Plafond de E lié aux démonstrateurs (DEXmax)	0.75	0.85	Les démonstrateurs numériques peuvent fournir des preuves claires de fiabilité, portant les anticipations vers 0.85.
Nombre de démonstrateurs	1–2	2–4	Nombre plus élevé car le coût de déploiement est plus faible.
Bruit sur E des non-utilisateurs	± 0.025	± 0.01	Les anticipations numériques sont moins volatiles ; un bruit plus faible est réaliste.
Apprentissage propre à partir du profit	EX += ROP (non normalisé)	$0.10 \times (ROP/Rr)$	L'apprentissage propre à partir du profit est estimé à partir de la variation du profit opérationnel réalisé (ROP) et du revenu de référence Rr (revenu mensuel typique du navire). Les gains liés à NR690 peuvent être élevés ; la normalisation par le revenu mensuel évite des sauts instables de E .
Taux d'externalité entre voisins	$0.075 \times ROP$	$0.05 \times (ROP/Rr)$	L'apprentissage entre pairs est réduit en raison de la sensibilité des données liées à la prévention des incidents ; la normalisation garantit la cohérence dimensionnelle.
Génération du réseau reflétant l'influence des sociétés de classification	Aucune	Accélération des externalités via liens ajoutés	Les sociétés de classification accélèrent les flux d'information plutôt qu'elles n'augmentent directement les anticipations.
Bornes globales de E	0–1	0–1	Les deux modèles imposent des anticipations bornées pour assurer la stabilité.

Table E1.: Comparaison des mécanismes d'anticipation entre (Karlsen, Papachristos, and Rehmatulla 2019) et le modèle d'adoption des diagnostics à distance NR690.

Appendix F. Diagnostics à distance conformes à NR690 et potentiel de prévention de l'accident du Dali

F.1. *Contexte*

Selon National Transportation Safety Board (NTSB) (2025), l'accident du *Dali* en 2024 a impliqué deux pannes électriques successives causées par (i) un fil de signal desserré dans le tableau haute tension, (ii) une pompe de rinçage non redondante fonctionnant involontairement comme pompe principale d'alimentation en combustible sans capacité de redémarrage automatique, et (iii) un raccordement tardif du générateur de secours. Avant l'accident, deux coupures électriques s'étaient déjà produites alors que le navire était à quai la veille du départ, constituant des événements précurseurs manifestes.

La note réglementaire NR690 de Bureau Veritas Marine & Offshore (2024b) établit un cadre d'évaluation centrée sur les données (*Data-Centric Evaluation*, DE), combinant acquisition régulière de données industrielles, diagnostic à distance et gouvernance du signalement des anomalies. NR690 définit la méthodologie permettant d'établir :

- Les capacités de référence: configurations de base approuvées comme sûres;
- Les capacités non conformes: écarts par rapport aux configurations approuvées;
- Les capacités non conformes au regard de la classification: dégradations ou pertes de fonctions essentielles de sécurité constituant des événements précurseurs de sécurité, désignés NC-A et NC-B;
- La gouvernance du signalement: procédure de notification à la société de classification, à l'affréteur et aux autorités régionales en cas de détection d'une anomalie majeure.

La présente annexe examine dans quelle mesure un tel cadre aurait pu identifier les précurseurs de l'accident du *Dali*, et si cet accident aurait pu être évité.

F.2. *Déteçtabilité des défauts techniques*

F.2.1. *Fil de signal desserré dans le tableau haute tension*

Dans l'Annexe 1 de NR690, Bureau Veritas Marine & Offshore (2024b) recommande des méthodes de détection d'anomalies pour les installations électriques, incluant le monitoring thermique, la journalisation des événements et le diagnostic fondé sur l'état. Un raccordement électrique desserré ou se dégradant produit généralement:

- un échauffement anormal ;
- des événements sporadiques du système de protection ;
- des irrégularités intermittentes de commutation.

Si des diagnostics conformes à NR690 avaient été appliqués au tableau haute tension, de tels écarts auraient vraisemblablement été identifiés comme:

- NC-B en cas de dégradation précoce ; ou
- NC-A si des services essentiels étaient affectés.

F.2.2. Configuration erronée du circuit combustible et absence de redondance de pompe

L'utilisation d'une pompe de rinçage comme pompe principale d'alimentation en combustible pour l'exploitation du générateur — sans redondance et sans redémarrage automatique — ne correspondrait à aucune configuration de référence raisonnable au sens de NR690. Les protocoles d'évaluation centrée sur les données pertinents ici incluent:

- les essais de la perte totale d'alimentation électrique (*blackout*) ;
- la vérification du partage de charge des générateurs ;
- les essais de redondance et de basculement automatique.

Ces essais auraient identifié cette configuration comme une capacité non conforme ou non conforme au regard de la classification. Les deux blackouts survenus au port constituant, au sens de NR690, des événements précurseurs explicites de sécurité et auraient dû entraîner un signalement formel ainsi qu'une action corrective.

F.2.3. Démarrage tardif du générateur de secours

NR690 recommande des essais automatisés portant sur:

- le démarrage automatique du générateur ;
- la performance de reprise après blackout ;
- le délai de rétablissement des services essentiels.

Un délai mesuré excédant les limites réglementaires constitue un écart manifeste par rapport à la capacité de référence. Le retard du *Dali*, supérieur à 70 s, aurait donc été identifié comme un résultat NC-A lors d'essais réalisés dans le cadre d'un schéma de diagnostic à distance.

F.3. Potentiel de rupture de la chaîne accidentelle

Sans pouvoir affirmer une causalité déterministe, plusieurs éléments étayent la plausibilité selon laquelle des diagnostics conformes à NR690 et leur gouvernance associée auraient pu réduire significativement la probabilité de l'événement:

- (1) Plusieurs précurseurs existaient, notamment des blackouts répétés la veille du départ. Au titre de NR690, ceux-ci exigent un signalement structuré et un suivi.
- (2) La configuration dangereuse de la pompe combustible ainsi que le rétablissement tardif du générateur de secours auraient été détectés par un monitoring à distance de routine.
- (3) Le raccordement desserré du tableau électrique correspond précisément au type de dégradation que les dispositifs de détection d'anomalies ou les inspections préventives recommandés par NR690 visent à identifier.
- (4) NR690 impose une revue à terre des constats de non-conformité (NC-A et NC-B), pouvant inclure une remontée jusqu'aux autorités régionales.

Pris collectivement, ces éléments indiquent que le navire aurait vraisemblablement:

- été empêché de prendre la mer jusqu'à la mise en œuvre des corrections nécessaires ; ou
- été réparé avant le départ d'une manière réduisant le risque de blackout ;

- fait l’objet d’une prescription de remorqueurs d’escorte supplémentaires par les autorités portuaires.

Ainsi, la chaîne de défaillances ayant conduit à l’allision aurait plausiblement pu être interrompue.

F.4. Implications pour la politique de diagnostic à distance

L’accident du *Dali* illustre la valeur potentielle des diagnostics à distance et des cadres de gouvernance associés pour la sécurité maritime. NR690 opérationnalise un principe essentiel : détecter précocement et systématiquement les écarts par rapport à la configuration sûre, au moyen d’une transparence appuyée par la société de classification et de procédures d’escalade appropriées.

L’adoption plus large de tels cadres pourrait favoriser une transition d’un dépannage réactif vers une détection proactive des événements précurseurs de sécurité affectant les systèmes critiques des navires.

Disponibilité du code

L’intégralité du code de simulation, des scripts de scénarios et du paquet de reproductibilité est disponible en accès libre sur Zenodo : <https://doi.org/10.5281/zenodo.17767613>.

References

- Allianz Commercial. 2025. *Safety and Shipping Review 2025*. Technical Report. Allianz Commercial. Data as of end 2024; published May 2025, Accessed 2025-08-24. <https://commercial.allianz.com/content/dam/onemarketing/commercial/commercial/reports/commercial-safety-shipping-review-2025.pdf>.
- American Bureau of Shipping (ABS). 2025. *Guide for Smart Functions for Marine Vessels and Offshore Units*. January 2025, <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/rules-and-guides/current/other/307-guide-for-smart-functions-for-marine-vessels-and-offshore-units-2025/307-smart-guide-jan25.pdf>.
- Beullens, Patrick, Fangsheng Ge, and Dominic Hudson. 2023. “The economic ship speed under time charter contract—A cash flow approach.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 170, 102996. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102996>.
- Bureau Veritas Marine & Offshore. 2024a. *Additional Class Notation SMART — Rule Note NR675, Edition R03 January 2024*. Technical Report NR675 R03. Courbevoie, France: Bureau Veritas Marine & Offshore. Accessed 2025-11-08. https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/675-NR_2024-01.pdf.
- Bureau Veritas Marine & Offshore. 2024b. *Rule Note NR690: Data-Centric Evaluation*. Technical Report. Paris, France. April 2024 edition, https://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/690-NR_2024-04.pdf.
- Castillo, Adolfo Crespo Del, Manu Sasidharan, Corbinian Nentwich, Jorge Merino, and Ajith Kumar Parlikad. 2024. “Data-Driven Asset Health Index – an application to evaluate Quay Cranes in container ports.” *Maritime Policy & Management* 51 (8): 1805–1823. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2231449>.
- Chen, Kehong, and Yiming Fan. 2025. “Selection of R&D techniques: The influence of spillover

- effects and government subsidies.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 194, 103879. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103879>.
- Chica, Manuel, Roberto Rivas Hermann, and Ning Lin. 2023. “Adopting different wind-assisted ship propulsion technologies as fleet retrofit: An agent-based modeling approach.” *Technological Forecasting and Social Change* 192: 122559. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2023.122559>.
- China Classification Society (CCS). 2020. *Rules for Intelligent Ships*. March 2020, <https://www.ccs.org.cn/ccswzen/file/download?fileid=202103301048619016>.
- ClassNK. 2022. *Guidelines for Digital Smart Ships (Edition 2.2)*. November 2022, https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/Rules_Guidance_public/techdoc/gl_digitalSMARTSHIPS_e202211.pdf.
- Costello, Donald, and Huan Xu. 2024. “Generating certification evidence for the certification of collision avoidance in autonomous surface vessels.” *Maritime Policy & Management* 51 (7): 1497–1516. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2180156>.
- Det Norske Veritas AS (DNV). 2021. *Class Guideline DNV-CG-0557: Data-driven verification*.
- Det Norske Veritas AS (DNV). 2025a. *Rules for Classification: Ships. Part 6, Chapter 11 – Digital Features*. Technical Report. Høvik, Norway: DNV. Includes D-INF (data collection infrastructure) and NAUTConnect (navigation systems, data-driven compliance), <https://www.dnv.com>.
- Det Norske Veritas AS (DNV). 2025b. *Rules for Classification: Ships — Part 8, Chapter 3: Data-driven services*. Edition July 2025.
- DNV. 2021. *Class Guideline DNV-CG-0508: Smart vessel*.
- DNV. 2022. *Class Guideline DNV-CG-0647: Navigation systems, data-driven compliance — NAUTConnect*.
- Domenighini, Camilla. 2024. “Autonomous inland navigation: a literature review and extra-contractual liability issues.” *Journal of Shipping and Trade* 9 (14). <https://doi.org/10.1186/s41072-024-00171-2>.
- Eling, Martin, and Werner Schnell. 2016. “What do we know about cyber risk and cyber risk insurance?” *The Journal of Risk Finance* 17 (5): 474–491.
- Gao, Jing, Yuhui Sun, Rameez Rameezdeen, and Christopher Chow. 2024. “Understanding data governance requirements in IoT adoption for smart ports – a gap analysis.” *Maritime Policy & Management* 51 (4): 617–630. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2155318>.
- Geels, Frank W. 2022. “Causality and explanation in socio-technical transitions research: Mobilising epistemological insights from the wider social sciences.” *Research Policy* 51 (6): 104537.
- Goerlandt, Floris, and Huiyan Liu. 2024. “Readability of maritime accident reports: a comparative analysis.” *Maritime Policy & Management* 51 (7): 1410–1422. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2166685>.
- Gong, Jincheng, Huanhuan Li, Hang Jiao, and Zaili Yang. 2025. “Uncertainty-aware ship trajectory prediction via Spatio-Temporal Graph Transformer.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 203, 104315. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104315>.
- Hong, Le, Ruihan Wang, Hao Chen, Weicheng Cui, Nikolaos Tsoulakos, and Ran Yan. 2025. “Evolutionary game-based ship inspection planning considering ship competitive interactions.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 196, 103994. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.103994>.
- Hsu, Yu-Chang. 2023. “Assessment of criteria of ship classification societies.” *Maritime Policy & Management* 50 (7): 980–1004. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2061061>.
- International Association of Classification Societies (IACS). 2022. “Z29 – Remote Classification Surveys.” IACS Unified Requirement Z29 (Mar 2022). Accessed 2024-10-30. <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements/ur-z>.
- International Association of Classification Societies (IACS). 2023a. *Procedural Requirement PR 1A: Procedure for Transfer of Class (Revision 9)*. Technical Report. IACS Procedural

- Requirement PR 1A, Rev. 9, August 2023.
- International Association of Classification Societies (IACS). 2023b. “UR E26: Cyber resilience of ships.” First issued Apr 2022; Rev. 1 Jul 2023; applicable to new ships contracted on/after 1 Jan 2024, <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements/ur-e>.
- International Association of Classification Societies (IACS). 2023c. “UR E27: Cyber resilience of on-board systems and equipment.” First issued Apr 2022; Rev. 1 Jul 2023; applicable to new ships contracted on/after 1 Jan 2024, <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements/ur-e>.
- International Association of Classification Societies (IACS). 2025a. *Common Structural Rules for Bulk Carriers and Oil Tankers – Consolidated Edition 01 July 2025 (CSR 01 Jan 2024 with Corrigenda 1 to 01 Jan 2024, Effective date 01 July 2024)*. Resolution: Common Structural Rules (CSR-BC & OT) – issue available on IACS website, <https://iacs.org.uk/resolutions/common-structural-rules/csr-for-bulk-carriers-and-oil-tankers>.
- International Association of Classification Societies (IACS). 2025b. “UR E22: Computer-based systems.” IACS Unified Requirements, Sep. Unified Requirement E22, Rev.3 Corr.1, <https://iacs.org.uk/resolutions/unified-requirements/ur-e>.
- International Maritime Organization (IMO). 2023. “Survey Guidelines under the Harmonized System of Survey and Certification (HSSC), Assembly Resolution A.1186(33).” Assembly Resolution A.1186(33), adopted 6 December 2023. Accessed 2025-08-24. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/IIIS/Documents/A%2033-Res.1186%20-%20SURVEY%20GUIDELINES%20UNDER%20THE%20HARMONIZED%20SYSTEMOF%20SURVEY%20AND%20CERTIFICATION%20\(HSSC\),%202023%20\(Secretary-General\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/IIIS/Documents/A%2033-Res.1186%20-%20SURVEY%20GUIDELINES%20UNDER%20THE%20HARMONIZED%20SYSTEMOF%20SURVEY%20AND%20CERTIFICATION%20(HSSC),%202023%20(Secretary-General).pdf).
- Ji, Daxiong, Zekai Han, Yi Xiao, Ran Yan, Xuehao Feng, Hao Wang, and Kevin X. Li. 2025. “Ship risk prediction: A methodological study,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 203, 104354. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104354>.
- Kanwal, Kamlesh, Wenming Shi, Christos Kontovas, Zaili Yang, and Chia-Hsun Chang. 2024. “Maritime cybersecurity: are onboard systems ready?” *Maritime Policy & Management* 51 (3): 484–502. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2124464>.
- Karakas, Serkan. 2025. “Exploring the key enablers of robotic process automation in the maritime industry.” *Maritime Economics & Logistics* <https://doi.org/10.1057/s41278-025-00330-7>.
- Karlsen, Richard, George Papachristos, and Nishatabbas Rehmatulla. 2019. “An agent-based model of climate–energy policies to promote wind propulsion technology in shipping.” *Environmental Innovation and Societal Transitions* 31: 33–53. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2019.01.006>.
- Kongsberg Maritime. 2023. “Product discontinuation – C20 Bridge Watch Monitoring System. Notice.” Kongsberg Maritime, Kongsberg Gruppen ASA. Accessed: 20 July 2025, <https://www.kongsberg.com/globalassets/kongsberg-maritime/km-products/product-documents/product-discontinuation-c20-bwms.pdf>.
- Kongsberg Maritime. 2024. “K-Chief vessel automation system: Frequently Asked Questions. Product page.” Kongsberg Maritime, Kongsberg Gruppen ASA. Accessed: 20 July 2025, <https://www.kongsberg.com/maritime/products/engines-engine-room-and-automation-systems/automation-safety-and-control/vessel-automation-k-chief/>.
- Liang, Qin, Knut Erik Knutsen, Erik Vanem, Vilmar Æsøy, and Houxiang Zhang. 2024. “A review of maritime equipment prognostics health management from a classification society perspective.” *Ocean Engineering*, 301, 117619. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.117619>.
- Lloyd’s List Intelligence. 2025. “Casualty Database.” Accessed 18 July 2025, <https://www.lloydslist.com/sectors/casualty>.
- Lloyd’s Market Association (LMA). 2001. “Institute Classification Clause (CL. 354).” Lloyd’s Wordings Repository (LWR), London. Clause reference CL.354; access via LWR (registration may be required), Accessed 2025-11-08. <https://lmalloyds.com/>.
- Lloyd’s Register. 2018. *ShipRight: Digital Compliance — Procedure for the Approval of Digital*

- Health Management Systems (DHM)*.
- Lopolito, A., P. Morone, and R. Taylor. 2013. “Emerging innovation niches: An agent-based model.” *Research Policy* 42 (6–7): 1225–1238. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.03.002>.
- Marotta, Angelica, Fabio Martinelli, Stefano Nanni, Albina Orlando, and Artsiom Yautsiukhin. 2017. “Cyber-insurance: Recent advances, trends and challenges.” *Computer Science Review* 24: 35–61.
- Maslov, I., E. B. Ambrosovskaya, A. M. Dvorkin, A. V. Proskurnikov, and A. Mordvintsev. 2022. “Safe Maneuvering Near Offshore Installations: A New Algorithmic Tool.” *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 47 (4): 895–915.
- Milinski, Manfred, Ralf D. Sommerfeld, Hans-Jürgen Krambeck, Floyd A. Reed, and Jochem Marotzke. 2008. “The collective-risk social dilemma and the prevention of simulated dangerous climate change.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105 (7): 2291–2294.
- Muhammad, Adabi Raihan, Parman Sukarno, and Aulia Arif Wardana. 2023. “Integrated Security Information and Event Management (SIEM) with Intrusion Detection System (IDS) for Live Analysis based on Machine Learning.” *Procedia Computer Science* 217: 1406–1415.
- National Transportation Safety Board. 2024. *Preliminary Report: Collision of Motor Vessel Dali with the Francis Scott Key Bridge, Baltimore Harbor, Maryland (DCA24MM031)*. Technical Report. Washington, DC, USA: NTSB. Preliminary report issued May 2024, Accessed 2025-10-02. https://www.nts.gov/investigations/Documents/DCA24MM031_PreliminaryReport%203.pdf.
- National Transportation Safety Board (NTSB). 2025. *Contact of Containership Dali with Francis Scott Key Bridge and Subsequent Bridge Collapse*. Board Summary DCA24MM031. National Transportation Safety Board. Report synopsis of probable cause and findings — PDF available from NTSB website, Accessed 2025-11-28. <https://www.nts.gov/investigations/Documents/Board%20Summary%20Contact%20of%20Containership%20Dali%20with%20Francis%20Scott%20Key%20Bridge.pdf>.
- NGO Shipbreaking Platform. 2025. “Annual Lists of Scrapped Ships.” Dataset. Accessed 18 July 2025, <https://shipbreakingplatform.org/annual-lists/>.
- Nguyen, Son, Pei-Shu Lynn Chen, and Yuquan Du. 2023. “Blockchain adoption in container shipping: An empirical study on barriers, approaches, and recommendations.” *Marine Policy* 155: 105724.
- Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). 2016. *Dynamic Positioning Assurance Framework: Risk-based Guidance*. Technical Report. London: Oil Companies International Marine Forum. Accessed 2025-08-24. <https://www.ocimf.org/publications/information-papers/dynamic-positioning-assurance-framework-risk-based-guidance>.
- Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). 2019. *Ship Inspection Report (SIRE) Programme: Vessel Inspection Questionnaires (VIQ 7), Seventh Edition*. Technical Report. London: Oil Companies International Marine Forum. Version VIQ 7.0.07, 22 February 2019.
- Oil Companies International Marine Forum (OCIMF). 2025. *Offshore Vessel Inspection Questionnaire (OVIQ 4), Version 7.3.00*. Technical Report. London. Published 29 May 2025.
- Okushima, Masashi. 2015. “Simulating social influences on sustainable mobility shifts for heterogeneous agents.” *Transportation* 42 (5): 827–855.
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). 2001. *Regulatory Issues in International Maritime Transport*. Technical Report DSTI/DOT(2001)3. Paris: OECD. Released on OLIS 08 March 2002, [https://one.oecd.org/document/DSTI/DOT\(2001\)3/en/pdf](https://one.oecd.org/document/DSTI/DOT(2001)3/en/pdf).
- Osler, David. 2025. “Global marine insurance premiums hit all-time high.” *Lloyd’s List*. 8 September, Accessed 2025-10-02. <https://www.lloydslist.com/LL1154731/Global-marine-insurance-premiums-hit-all-time-high>.
- Otto Candies. 2003. “Otto Candies, L.L.C. v. Nippon Kaiji Kyokai.” 346 F.3d 530 (5th Cir.), Accessed 2024-10-30. <https://law.resource.org/pub/us/case/reporter/F3/346/346.F3d.530.02-30842.html>.

- Rand, William, and Christian Stummer. 2021. "Agent-based modeling of new product market diffusion: An overview of strengths and criticisms." *Annals of Operations Research* 305 (1): 425–447.
- Rogers, Everett M. 2003. *Diffusion of Innovations*. 5th ed. New York: Free Press.
- Romero, Elena, Manuel Chica, Roberto Rivas Hermann, and Sergio Damas. 2025. "Targeting incentives to adopt wind-assisted technologies in shipping by agent-based simulations." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 138: 104511. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2024.104511>.
- Soyer, Barış, and Andrew Tettenborn, eds. 2019. *Maritime Liabilities in a Global and Regional Context*. Maritime and Transport Law Library. Abingdon and New York: Informa Law from Routledge. Edited papers from the 13th International Colloquium of the Institute of International Shipping and Trade Law (Swansea, 2017).
- ter Hoeven, E. 2025. "Mesa 3: Agent-based modeling with Python in 2025." *Journal of Open Source Software* 10 (107): 7668.
- The Nicholas H. 1996. "Marc Rich & Co AG v Bishop Rock Marine Co Ltd (The Nicholas H)." [1996] 1 AC 211 (HL), Accessed 2025-10-30. <https://www.bailii.org/uk/cases/UKHL/1995/4.html>.
- Tsouflias, Giannis T. 2025. "Port resilience: a systematic literature review." *Maritime Economics & Logistics* <https://doi.org/10.1057/s41278-025-00326-3>.
- UNCTAD. 2018. "Review of Maritime Transport 2018." New York and Geneva. Accessed: 24 August 2025, https://unctad.org/system/files/official-document/rmt2018_en.pdf.
- Urciuoli, Luca, and Juha Hintsa. 2021. "Can digital ecosystems mitigate risks in sea transport operations? Estimating benefits for supply chain stakeholders." *Maritime Economics & Logistics* 23 (2): 237–267. <https://doi.org/10.1057/s41278-020-00163-6>.
- Wang, Jinglin, Cong Sui, Huijun Zhang, Keran Li, Yanning Liu, and Wenyang Wang. 2025. "Effective analysis of remote ship inspection in Asia-Pacific region and its impact on shipping trade under COVID-19." *Maritime Policy & Management* 52 (5): 806–835. <https://doi.org/10.1080/03088839.2024.2379490>.
- Wang, Kun, and Yongjian Ke. 2018. "Public-Private Partnerships in the Electric Vehicle Charging Infrastructure in China: An Illustrative Case Study." *Advances in Civil Engineering* 2018: Article ID 9061647, 10 pages. <https://doi.org/10.1155/2018/9061647>.
- Wang, Wei, Shuaian Wang, and Lu Zhen. 2024. "Optimal subsidy design for energy generation in ship berthing." *Maritime Policy & Management* 51 (8): 1824–1837. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2251479>.
- Xuan, Huihui, Qing Liu, and Lei Wang. 2024. "The impact of incentive policies on shipowners' adoption behavior of clean energy technologies: Evidence from China." *Marine Policy* 167: 106277.
- Yan, Ran, Shuaian Wang, and Kjetil Fagerholt. 2022. "Coordinated approaches for port state control inspection planning." *Maritime Policy & Management* 49 (6): 897–912. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1903599>.
- Yan, Ran, Shuaian Wang, and Chuansheng Peng. 2022. "Ship selection in port state control: status and perspectives." *Maritime Policy & Management* 49 (4): 600–615. <https://doi.org/10.1080/03088839.2021.1889067>.
- Yan, Ran, Shuaian Wang, and Lu Zhen. 2023. "An extended smart "predict, and optimize" (SPO) framework based on similar sets for ship inspection planning." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 173, 103109. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103109>.
- Yang, Zhisen, Zaili Yang, Jingbo Yin, and Zhuohua Qu. 2018. "A risk-based game model for rational inspections in port state control." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 118: 477–495.
- Yang, Zhisen, Qing Yu, Zaili Yang, and Chengpeng Wan. 2024. "A data-driven Bayesian model for evaluating the duration of detention of ships in PSC inspections." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 181, 103371. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103371>.

- 1016/j.tre.2023.103371.
- Yen, Chia-Dai, Shih-Wei Hsu, Kung-Don Ye, Kuo-Chung Shang, and Chi-Hung Wu. 2024. “A safety compliance model for container terminal operations: the roles of the safety climate, non-compliance cost and safety self-efficacy.” *Maritime Policy & Management* 51 (1): 118–132. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2089754>.
- Yuen, Kum Fai, Le Yi Koh, Jing Han Fong, and Xueqin Wang. 2024. “Determinants of digital transformation in container shipping lines: a theory driven approach.” *Maritime Policy & Management* 51 (5): 653–668. <https://doi.org/10.1080/03088839.2022.2139420>.
- Yuen, Kum Fai, Jose Escribano Macias, Duowei Li, Ran Yan, and T. L. Yip. 2025. “Editorial: Special Issue on ‘Digitalisation and artificial intelligence in maritime transport: operations, management, and policy’.” *Maritime Policy & Management* 52 (8): 1157–1161. <https://doi.org/10.1080/03088839.2025.2586767>.
- Zhang, Xiang, Liwen Zhang, Haoning Xi, Zhiqi Shao, and Michael G.H. Bell. 2026. “Shore power adoption strategies of shipping companies and pricing decisions of the port under subsidies and carbon taxes: A game theoretical analysis.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 205, 104490. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2025.104490>.
- Zhen, Lu, Yingying Yuan, Dan Zhuge, Harilaos N. Psaraftis, and Shuaian Wang. 2024. “Subsidy strategy design for shore power utilization and promotion.” *Maritime Policy & Management* 51 (8): 1606–1638. <https://doi.org/10.1080/03088839.2023.2263010>.