

PROJET NORVENT

Etat de l'art des démarches de
prédiction de performances
pour les navires propulsés par le
vent

RAPPORT FINAL



EXPERTISES

Avril
2023

REMERCIEMENTS

- Philippe CAUNEAU (ADEME)
- Aude LEBLANC (Bureau Veritas)
- François RONGERE (D-ICE Engineering)
- Philippe PALLU DE LA BARRIERE (CRAIN Technologies)
- Francesco STELLA (CWS)

CITATION DE CE RAPPORT

DETRIMON Lise, RIALAN Marine, Wind Ship. 2023. Projet NORVENT - Etat de l'art des démarches de prédiction de performances pour les navires propulsés par le vent- Rapport. 129 pages.

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'œuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 2266D0742

Étude réalisée par l'association Wind Ship pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Coordination technique - ADEME : CAUNEAU Philippe, ingénieur
Direction/Service : DVTD/STM



SOMMAIRE

1. RESUME DU CONTEXTE ET DES OBJECTIFS	7
1.1. Une analyse préalable des attentes et des besoins des utilisateurs des services d'évaluation de performances.	7
1.2. L'état des lieux des démarches retenues par les acteurs qui utilisent ces évaluations de performances.	7
1.3. Une liste non exhaustive des outils développés et utilisés aujourd'hui en France en collectant l'information auprès de ceux qui les mettent en œuvre.....	7
1.4. Un atelier de partage des résultats.....	7
2. DEFINITION DE TERMINOLOGIES COMMUNES ET DE CATEGORIES DE BESOINS.....	9
2.1. Utiliser une terminologie commune.....	9
2.2. Catégoriser les besoins des utilisateurs et les étapes clés des projets.....	9
2.2.1. Catégories de besoins des acteurs.....	10
2.2.2. Étapes de projet et niveaux de maturité.....	10
2.2.3. Croisement des données.....	11
2.3. Croisement avec le travail mené par le projet WASP sur les indicateurs de performance et leur utilisation.....	12
3. CLASSIFICATION DES BESOINS DES UTILISATEURS DES DEMARCHES D'EVALUATION DE PERFORMANCES.....	14
3.1. Typologie des participants.....	14
3.2. Catégories et étapes des projets concernés par les évaluations de performances.....	15
3.2.1. Catégories de besoins concernées par les évaluations	15
3.2.2. Niveaux de maturité des projets concernés par les évaluations.....	15
3.3. Besoins et attentes vis-à-vis des évaluations de performances.....	15
3.3.1. Utilisateurs d'évaluation de performances	16
3.3.2. Évaluateurs de performances.....	17
3.4. Finalité de l'évaluation menée	20
4. LA DEMARCHE DE PREDICTION OU D'EVALUATION DE PERFORMANCES	21
4.1. L'évaluation de performances.....	21
4.2. Les bases de la prédiction de performances des navires	21
4.2.1. Performances des navires motorisés.....	21
4.2.2. Performances des voiliers.....	21
4.2.3. Performances des navires motorisés et propulsés par le vent.....	21
4.2.4. Performance et système vélique seul	22
4.3. Les constantes de la démarche de prédiction de performances.....	22
4.4. Les blocs thématiques de l'évaluation de performances	23
4.5. Les limites actuelles des simulations numériques utilisées pour les évaluations de performances des navires véliques	23



4.6.	La modélisation du navire vélique : le futur jumeau numérique.....	23
4.7.	Les données utilisées pour chaque bloc et leur origine.....	24
4.7.1.	Aérodynamique.....	24
4.7.2.	Hydrodynamique.....	25
4.7.3.	Environnement.....	25
4.8.	Génération de la polaire du navire.....	26
4.9.	Routage du navire.....	26
5.	RECENSEMENT DES DEMARCHES UTILISEES POUR CHAQUE CATEGORIE ET LES INDICATEURS DE PERFORMANCE ASSOCIES	27
6.	LISTE DES PRINCIPAUX OUTILS DE PREDICTION DE PERFORMANCES UTILISES.....	28
7.	LE BUDGET ASSOCIE AUX EVALUATIONS DES PERFORMANCES	29
8.	REFLEXION SUR LA GARANTIE DES PERFORMANCES ET LA CONTRACTUALISATION	29
9.	LIMITES ET MANQUES IDENTIFIES AU REGARD DES BESOINS EXPRIMES.....	30
9.1.	Il existe plusieurs notions de "performance"	30
9.2.	La performance est uniquement prédictive.....	30
9.3.	Le traitement de la performance se fait au cas par cas.....	30
9.4.	Le développement de méthodes collectivement consolidé est long.....	30
10.	PROPOSITIONS ET RECOMMANDATIONS POUR LA POURSUITE DU PROJET	31
	ANNEXES.....	32
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	125
	INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	128
	SIGLES ET ACRONYMES	129



RÉSUMÉ

Propulser des navires de commerce grâce au vent, une énergie renouvelable présente « un intérêt certain pour décarboner le transport maritime » et « peut être un facteur de la croissance maritime française. L'État en accompagne le démarrage ». La propulsion des navires par le vent constitue une filière majeure qui émerge en France pour développer et industrialiser ce mode de propulsion. Cette filière française peut devenir un leader mondial de la décarbonation du transport maritime, en répondant au principal défi que rencontre le secteur. L'intérêt des armateurs et de leurs clients ne cesse de croître pour l'utilisation de technologie vélique et les navires de charge et de croisières constituent des cibles prioritaires, cependant l'offre doit se concrétiser rapidement pour pouvoir répondre à cette demande.

L'accélération des prises de commandes repose sur différents leviers, notamment financiers, mais aussi sur la fiabilisation des évaluations de performances proposées aujourd'hui, afin d'objectiver la pertinence des technologies de propulsion par le vent. Il existe aujourd'hui plusieurs outils et plusieurs intervenants, depuis les bureaux d'étude jusqu'aux centres d'essais et aux centres de recherche universitaires, pour évaluer les performances des systèmes de propulsion des navires par le vent. Cependant, ces évaluations n'ont pas fait l'objet d'une harmonisation à partir d'une vision commune au sein de laquelle la méthodologie suivie, les modèles utilisés et les phénomènes physiques pris en compte sont précisés. C'est pourquoi la comparaison est difficile entre les résultats de différentes évaluations et ce manque de transparence engendre une perte de crédibilité vis-à-vis des utilisateurs de ces services (concepteurs, armateurs, décideurs...), ralentissant l'adoption des systèmes de propulsion par le vent.

Le projet NORVENT a procédé à un premier état des lieux (i) des attentes concernant les utilisateurs de ces services d'évaluation de performances et (ii) des méthodes existantes, de leur application à ce jour et de leur correspondance par rapport aux attentes.

Cet état des lieux a été réalisé à l'aide d'enquêtes, d'entretiens et d'un atelier de travail collectif qui a mobilisé les parties prenantes autour de ce sujet, c'est-à-dire (i) des utilisateurs d'évaluation de performances [armateurs, affréteur/chargeur, financeurs/investisseurs, équipementiers, architectes naval/concepteurs, société de classification, Bureaux d'Études et motoriste] et (ii) des fournisseurs de données d'entrée ou d'évaluation de performances, [fournisseurs d'outil numérique, bassin de carène et souffleries].

Il a permis d'avoir une compréhension commune du sujet et notamment (i) d'engager le dialogue entre les parties prenantes dans un climat de confiance, sans entrer directement dans l'évaluation des méthodes et des outils existants, (ii) de préciser la méthode suivie pour réaliser les évaluations de performances qui sont uniquement d'ordre prédictif aujourd'hui, et (iii) de faire des recommandations sur ce qui serait réellement attendu dans le cadre d'une méthodologie collectivement acceptée

Le présent rapport rend compte des résultats obtenus et édicte des recommandations pour engager par la suite un travail scientifique plus détaillé sur les besoins identifiés.



ABSTRACT

Ship propulsion technology using renewable wind energy is “of definite interest for decarbonising maritime transport” and “can be a growth driver for the French maritime industry. The French Government is supporting its launch.” Wind propulsion for ships is a key sector that is emerging in France to develop and industrialise this propulsion method. French industry has the ability to become a world leader in the decarbonisation of shipping, offering a response to the main challenge facing the sector today. There is a constantly growing interest among shipowners and their customers for the use of wind propulsion technology and cargo and cruise ships are priority targets, however the offer must materialise quickly in order to meet this demand.

Accelerating new orders requires the leverage of various drivers – in particular financing – but the reliability of the performance evaluations offered today must also be ensured, to provide an objective view of the relevance of wind propulsion technologies. There are now several tools and players, from design offices to test centres and university research centres, which assess the performance of wind propulsion systems for ships. However, their assessments have not been harmonised according to a common vision specifying the methodology followed, the models used and the physical phenomena taken into account. This is why it is difficult to compare the results of different evaluations and this lack of transparency is causing a loss of credibility among the users of these services (designers, shipowners, decision-makers, etc.), slowing down the adoption of wind propulsion systems.

The NORVENT Project made a first survey (i) of user expectations concerning performance evaluation services, and (ii) of existing methods, their application to date and their correspondence with expectations.

This survey was carried out using questionnaires, oral interviews and a group workshop in which the topic was discussed with industry stakeholders including (i) performance assessment users [shipowners, charterer/shipper, financiers/investors, equipment providers, naval architects/ship designers, classification society, design firms and an engine manufacturer] and (ii) providers of input data or performance assessment [digital solution suppliers, test tank and wind tunnels].

This made it possible to have a common understanding of the topic and in particular (i) for stakeholders to dialogue in a climate of trust, without entering directly into the evaluation of existing methods and tools, (ii) to clarify the method followed for performance evaluation which is only predictive today, and (iii) to make recommendations on what would actually be expected under a collectively agreed methodology.

This report presents the findings of the survey and makes recommendations for following it up with more detailed scientific work on the identified needs.



1. Résumé du contexte et des objectifs

Afin de fiabiliser et rendre plus transparente l'évaluation de performances des technologies de propulsion par le vent, le projet NORVENT, piloté par l'association Wind Ship, a réalisé un état des lieux des démarches d'évaluation de performances. Ce projet souhaite déclencher à son terme des démarches scientifiques approfondies pour améliorer, valider, et peut-être certifier les outils et démarches existants pour l'évaluation des performances voire produire de nouveaux développements si le besoin en a été identifié. Cet état des lieux a été réalisé en 4 étapes.

1.1. Une analyse préalable des attentes et des besoins des utilisateurs des services d'évaluation de performances.

Les 25 acteurs qui ont été contactés dans le cadre du projet sont de différents types : armateurs, bureaux d'études, fournisseur d'outils numériques ou d'évaluations de performances, équipementiers, financeurs, architectes navals et concepteurs, société de classification, motoristes. L'analyse a été réalisée selon les différents stades d'avancement/maturité des projets (du stade d'avant-projet au stade de la conception détaillée) et a permis de formaliser une première catégorisation des besoins, en fonction du niveau de maturité du projet. Cette première catégorisation a ensuite été revue dans le cadre d'un atelier collectif.

1.2. L'état des lieux des démarches retenues par les acteurs qui utilisent ces évaluations de performances.

Il s'agissait pour cette étape de lister de manière transparente les méthodes, les critères et les données d'entrées utilisés pour évaluer les performances, sur la base des retours d'expérience des participants utilisateurs de ces services. Cette étape s'est révélée plus compliquée que prévue au vu de la diversité des cas dans lesquels se trouvaient les utilisateurs et de leur niveau de connaissance sur le sujet.

La méthode générale utilisée pour estimer les performances a cependant pu être décrite (voir le paragraphe 4 : La démarche de prédiction ou d'évaluation de performances), ainsi que la liste des données d'entrées, mais il n'a pas pu être dégagé directement de ces résultats une méthode générique acceptable par tous. Cependant, des recommandations ont pu être formalisées pour poursuivre ce travail par la suite.

1.3. Une liste non exhaustive des outils développés et utilisés aujourd'hui en France en collectant l'information auprès de ceux qui les mettent en œuvre.

Une première liste d'outils français et étranger a été produite (voir paragraphe 6). Ce recensement n'a cependant pas donné lieu à une analyse qualitative.

1.4. Un atelier de partage des résultats

L'atelier avait un double objectif :

- (i) réunir tous les participants à la démarche pour présenter les résultats et
- (ii) travailler sur les recommandations pour la suite.

Cet atelier s'est avéré relativement compliqué car il ne s'agissait pas de produire directement une méthode commune mais d'amener tous les participants à s'accorder sur ce que l'on peut attendre lorsqu'on parle d'évaluation de performances, et de discuter sur des cas concrets en utilisant des croisements de besoins et niveau de maturité de projets, pour essayer d'en tirer des recommandations.

La diversité des profils présents lors de cet atelier a rendu le travail à la fois intéressant et complexe à animer, mais les participants ont témoigné du progrès réalisé autour d'une compréhension commune du sujet, et du besoin de continuer ce travail.

L'ensemble de ce travail a abouti à des recommandations pour préparer des éléments tels qu'une polaire standardisée de performance par technologie, afin de commencer à construire une méthodologie collectivement acceptée de prédiction de performances facilitant l'accès au financement des projets.



Cette future méthodologie précisera notamment :

- Une première grille de lecture commune ou référentiel commun des évaluations de performances en s'appuyant sur le travail déjà mené dans le cadre de NORVENT ;
- Une standardisation des formats et des paramètres à prendre en compte dans les polaires de système vélique ;
- Des premières règles sur la mesure en mer et l'utilisation de ces résultats pour évaluer la performance.



2. Définition de terminologies communes et de catégories de besoins

2.1. Utiliser une terminologie commune

Un des premiers objectifs du projet est d'engager le dialogue avec les parties prenantes afin d'aboutir à une compréhension commune sur le sujet. Pour commencer à travailler, il s'est révélé nécessaire de poser une définition commune de certains termes car ils ne recouvraient pas systématiquement les mêmes contenus pour tous les acteurs. Le même constat ayant été posé par les travaux WASP et ITTC, la liste initiale a été complétée pour aboutir à une liste commune (la liste complète est en annexe 5 de ce rapport), présentée ci-dessous :

Concept	Définition
Démarche d'évaluation des performances	Suite d'actions menées selon une méthode en utilisant des outils de simulation ou de mesure pour déterminer les gains liés à l'utilisation d'une technologie
Polaire	Représentation graphique angulaire d'une grandeur physique (vitesse, puissance...). Il est important de toujours préciser de quelle polaire il est question : polaire de performance du système vélique seul, du [navire + système vélique], etc.
Système vélique	Un ou plusieurs gréements d'une ou plusieurs technologies de voile ou d'aile installées sur un navire.
Métrique	Un étalon de mesure
Modèle	Cadre mathématique permettant une représentation simplifiée d'un effet physique
Jumeau numérique	Assemblage de modèles permettant de rendre compte des différentes physiques mises en jeu dans l'opération d'un navire.

Tableau 1 : Définitions clés du projet NORVENT

2.2. Catégoriser les besoins des utilisateurs et les étapes clés des projets

Lorsque la question de l'utilisation de la propulsion par le vent est examinée, plusieurs étapes existent :

- (i) d'abord connaître les caractéristiques de la technologie envisagée, ensuite
- (ii) estimer son adéquation avec la flotte visée avant d'étudier en détail une implantation possible sur un ou plusieurs navires. Suivant le cas de figure étudié par l'utilisateur de l'évaluation de performances, la structuration des données peuvent changer drastiquement.

Afin de clarifier le travail, il a été proposé de lister les catégories de besoins de ces utilisateurs, et les grandes étapes d'un projet, allant de la démonstration d'intention d'utiliser une propulsion vélique jusqu'à l'exploitation d'un navire.



2.2.1. Catégories de besoins des acteurs

L'équipe projet de Wind Ship, aidée par le groupe de travail technique mobilisé au sein de l'association, a proposé une catégorisation des besoins d'évaluation de performances :

- *Catégorie A* : Volonté de caractériser la performance d'un système vélique en général.
- *Catégorie B* : Volonté d'évaluer la pertinence de l'énergie vélique pour décarboner une flotte / un navire seul sur une route générique (en retrofit ou construction neuve).
- *Catégorie C* : Volonté d'étudier comparativement des systèmes véliques et les configurations pour l'installation sur une flotte / un navire (en retrofit ou construction neuve)

Des besoins d'évaluation de performance variés

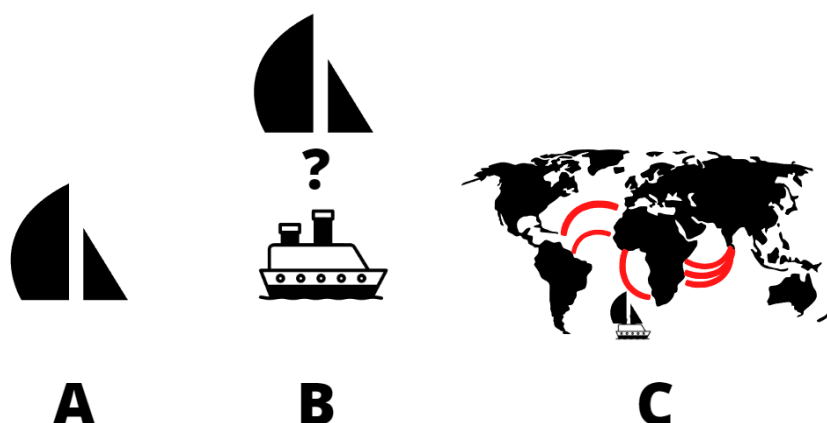


Figure 1 : Catégorie de besoins des utilisateurs d'évaluation de performances

- Une *catégorie D* a été ajoutée par la suite après avoir constaté un autre besoin pour des utilisateurs ayant des projets avec un niveau de maturité plus élevé : la volonté d'évaluer la performance d'un navire en opération par des essais en mer.

2.2.2. Étapes de projet et niveaux de maturité

En complément de ces catégories, l'équipe projet a proposé de classer les besoins d'évaluations de performances en fonction du niveau de maturité des projets qui sont développés :

- *Étape 0* : Démonstration d'intention sur l'utilisation du vélique.
- *Étape 1* : Etude préparatoire (*Preliminary Study*). Cette étape correspond au moment de la formalisation d'un avant-projet préliminaire avec une phase de dérisquage.
- *Étape 2* : Etude de conception (*Concept Design*). Un document précis est réalisé et permet d'interroger des systémiers ou des chantiers afin d'avoir une spécification technique et une cotation. Des plans détaillés sont disponibles.
- *Étape 3* : Phase de contractualisation. Un plan de financement plus détaillé est nécessaire à ce stade, car les parties s'engagent sur une réduction des coûts / émissions de GES.
- *Étape 4* : Essai en sortie de chantier. Ces essais sont réalisés selon les conditions de vent et de mer disponibles et les normes en vigueur.
- *Étape 5* : Mesures en opération lors de l'exploitation du navire. Ces essais mesures se réalisent à long terme, dans l'ensemble des conditions de vent et de mer. Ils permettent l'acquisition de données pour valider les polaires de performance.



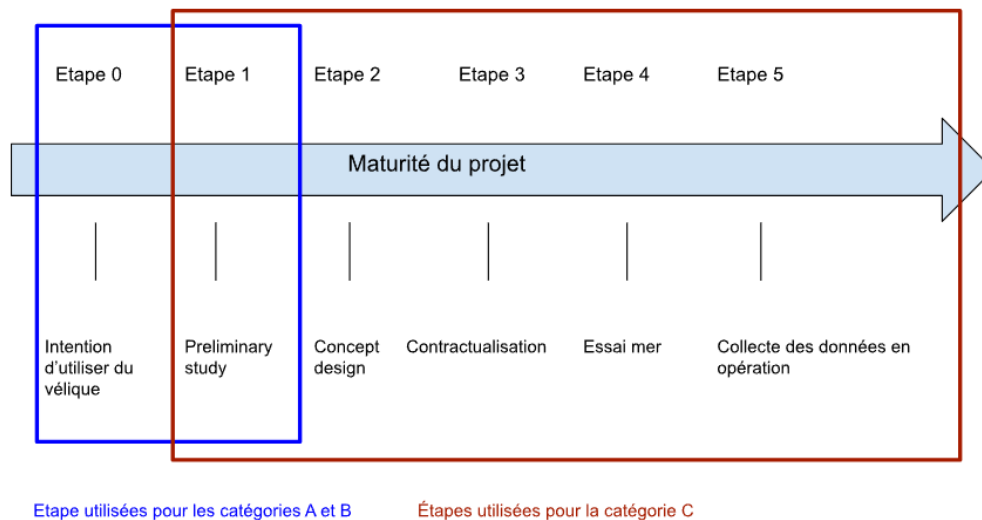


Figure 2 : Représentation des étapes de projet

2.2.3. Croisement des données

L'analyse de l'équipe projet de Wind Ship a été la suivante :

- Les catégories A et B ne comprennent que généralement que l'étape 0 et 1 : démonstration d'intention sur l'utilisation du vélique et formalisation d'un projet.
- La catégorie C comprend les 5 étapes suivantes, allant de l'étape 1 jusqu'à l'étape 5 : mesures en opération lors de l'exploitation du navire.

NB : Une catégorie D a été ajoutée par la suite après avoir constaté un autre besoin pour des utilisateurs, et comprend finalement les étapes 1 à 5. La catégorie C correspond donc aux étapes 1 à 3.

Cette proposition s'est avérée in fine trop restrictive par rapport aux cas de figure rencontrés par les acteurs – et cela a été mis en évidence lors de l'atelier collectif. Toutefois, elle a permis de structurer les données et le questionnaire (en Annexe 1 de ce rapport). Afin que l'enquête ne soit pas trop longue à remplir, il a été demandé aux participants de répondre aux questions en ne se basant que sur une seule des catégories précédentes, celle qu'ils avaient rencontré le plus fréquemment.

Afin de cibler les discussions lors de l'atelier de travail collectif, l'équipe projet de Wind Ship, aidée par deux experts techniques volontaires pour guider les échanges techniques lors de cet atelier, a proposé d'examiner les croisements entre "catégorie de besoins des utilisateurs/maturité du projet" qui paraissaient les plus récurrents dans l'utilisation des évaluations de performances.

- *Croisement n°1* : Performance du système vélique seul (Catégorie A / Niveau de maturité 0).
- *Croisement n°2* : Performances estimées dans le cadre des indicateurs imposés par la réglementation, type EEDI, CII, ... (Catégorie B / Niveau de maturité 0, 1 ou 2).
- *Croisement n°3* : Performances estimées lors de l'installation d'un système vélique sur une flotte / un navire (en retrofit ou construction neuve) pour une route donnée (Catégorie C / Niveau de maturité 1, 2 ou 3).
- *Croisement n°4* : des essais en mer et en opération (Catégorie D / Niveau de maturité 4 et 5)

Pour chacun de ces 4 croisements, il a été proposé de travailler sur :

- Les indicateurs de performance associés à ces démarches ;
- Les données utilisées pour les déterminer et leur méthode d'obtention et
- La qualité des résultats obtenus et leur niveau de garantie.

L'échelle des croisements catégorie de besoin/maturité du projet est représentée ci-dessous avec en ordonnée les catégories de besoins et en abscisse les niveaux de maturité.



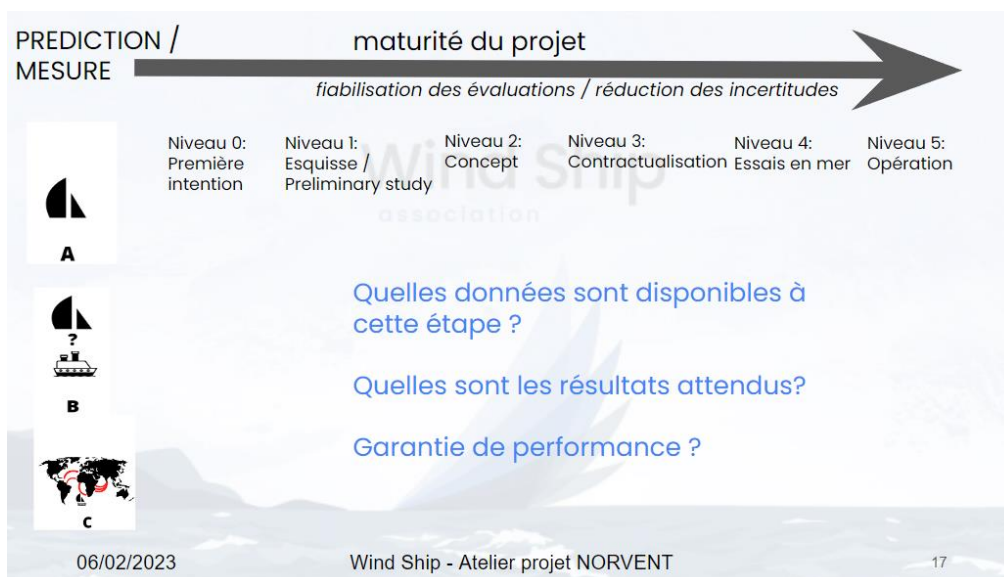






Figure 3 : Echelle des croisements catégorie de besoin / maturité de projet

2.3. Croisement avec le travail mené par le projet WASP sur les indicateurs de performance et leur utilisation.

En parallèle du travail mené par le projet NORVENT, le [projet WASP](#)¹ réalise un travail sur les indicateurs de performance qui peuvent être utilisés pour qualifier les performances des navires propulsés par le vent. Ce travail mené grâce à 3 réunions ouvertes à tout participant au niveau international, a permis d'identifier à son tour 4 catégories de cas possibles (cf schéma ci-dessous).

Type	Specific	Describing	Usage
Type A	Wind propulsion Unit 	Unit performance	Comparing technologies, design optimisation
Type B	Wind propulsion Unit Ship 	Design index	Regulations, financial incentives
Type C	Wind propulsion Unit Ship Route 	Fuel saving (compared to same ship without WPT)	Business case, providers performance guarantee
Type D	Achieved 	Fuel saving Achieved after some time of operation	Cost-Saving split, reduced fee, rating





 General

 Case specific


Figure 4 - Catégories de besoins des utilisateurs de performance projet WASP

Les 3 premiers cas recourent clairement les catégories déterminées dans le cadre de NORVENT.

- La catégorie A contient des indicateurs qui décrivent les caractéristiques des systèmes véliques sans la présence d'un navire.
- La catégorie B comprend des indicateurs spécifiques au navire obtenu en « naviguant » sur un itinéraire standard prédéfini. Ces indices peuvent être utilisés pour les évaluations

¹ <https://northsearegion.eu/wasp/>



réglementaires, où des définitions efficaces, transparentes et équitables sont plus importantes que des chiffres précis sur les économies de carburant.

- *Les indicateurs de catégorie C* sont généralement utilisés dans le contexte de l'analyse de rentabilité des technologies de propulsion par le vent ou pour communiquer les attentes en matière de rendement entre les parties prenantes commerciales.
- *La catégorie D* comprend des indicateurs de performance obtenus pendant l'exploitation. Cette dernière catégorie qui correspond au niveau de maturité final d'un projet vélique dans le cadre du questionnaire NORVENT (en Annexe 1 de ce rapport), soit "navire en opération", a été considérée comme une catégorie à part entière dans le projet WASP. L'équipe Wind Ship a également par la suite décidé d'ajouter une catégorie D correspondant à celle décrite par le projet WASP.

Par ailleurs, les usages possibles de ces évaluations de performances ont été précisés :

- Comparer des technologies véliques entre elles (grâce aux évaluations de cat. A et B) ;
- Disposer d'une évaluation spécifique à un navire pour répondre aux conformités réglementaires (évaluations de cat. A, B ou C) ;
- Disposer de résultats pour calculer le modèle économique du navire ou garantir les performances (cat. B et C).

Dans le dernier cas (navire équipé), il s'agit de disposer des économies réelles réalisées en matière de carburant.

La maturité des projets qui font l'objet de ces évaluations de performances (les étapes 0 à 5 identifiées dans NORVENT) a été formalisée selon des niveaux (Level I, level II, level III, Level IV) par ce groupe de travail international.

Les **niveaux I à III** sont recommandés pour les navires assistés par le vent qui n'utilisent pas le routage météorologique ou d'optimisation de la vitesse.

Le **niveau IV** est recommandé pour les navires qui utilisent un routage météorologique étendu, les navires à propulsion principale par le vent et les navires dotés de systèmes de propulsion hybrides. La modélisation peut inclure différents profils de vitesse et différents itinéraires pour le cas avec et sans la technologie de propulsion par le vent.

Indicateur clé de performance	Unité	Usage	Modélisation de puissance	Modélisation météorologique
Puissance nominale de la technologie seule	KW	Comparaison générale, analyse du marché	Puissance de la technologie seule	EEDI
PSP-I	KW	Une première idée	Niveau I	EEDI ou itinéraire prévu du navire
PSP-II	KW	Évaluation précoce de l'analyse de rentabilité	Niveau II	L'itinéraire prévu du navire
PSP-III	KW	Analyse de rentabilité et attentes en matière de performances	Niveau III	L'itinéraire prévu du navire
ESP-IV	KW	Analyse de rentabilité avancée et attentes en matière de performances	Niveau IV	L'itinéraire prévu par le navire (y compris routage possible, optimisation de la vitesse)

Tableau 2 : Niveaux de maturité de projet représentés par le projet WASP



3. Classification des besoins des utilisateurs des démarches d'évaluation de performances

3.1. Typologie des participants

Sur 49 structures enquêtées, 25 réponses ont été reçues, émanant des types de structures suivantes :

Utilisateur / fournisseur	Type d'activité principale	Activité secondaire	Répondants
Utilisateur d'évaluation de performances	Architecte naval / concepteur		3
	Armateur		5
	Équipementier		6
	Chantier	Bureau d'étude	1
	Fournisseur d'outils numériques		1
	Financier		1
	Société de classification		1
	Motoriste		1
Fournisseur de données et/ou d'évaluation de performances	Fournisseur d'outils numériques		2
	Architecte naval / concepteur		1
	Bassin de carène		1
	Soufflerie		2
		Total	25 répondants

Tableau 3 : Répondants au questionnaire



3.2. Catégories et étapes des projets concernés par les évaluations de performances

3.2.1. Catégories de besoins concernées par les évaluations

Globalement, les évaluations de performances ont été utilisées quasiment à part égale pour les 3 catégories citées - avec cependant une prédominance pour les évaluations en catégorie A (*estimation des performances du système vélique seul*).

- Les armateurs ont fait réaliser une trentaine d'évaluations, plutôt dans les catégories B (*étude générale des performances d'un [système vélique +navire] - sans routage*) et C (*étude des performances pour l'implantation d'un système vélique sur un navire*).
- Les équipementiers ont eux aussi réalisé plusieurs dizaines d'évaluations, la plupart du temps en interne, dans les différentes catégories citées.
- Les évaluateurs de performances ont logiquement travaillé sur les 3 catégories possibles, et ont réalisé plusieurs dizaines d'évaluations.
- Les souffleries et bassins de carène contactés ont été assez peu sollicités et de manière logique :
 - Uniquement en catégorie A pour les souffleries (*estimation des performances d'un système vélique seul de manière générique*)
 - Et en catégorie B pour les bassins (*estimation des performances générales sur un [système vélique + navire]*).

3.2.2. Niveaux de maturité des projets concernés par les évaluations

Près des deux tiers des utilisateurs se trouvent dans des étapes préliminaires de projet : étape 0, 1, ou 2.

- Les armateurs ont fait réaliser une trentaine d'évaluations, dans toutes les catégories, suivant les projets sur lesquels ils étaient positionnés et leur niveau de maturité.
- Les équipementiers ont réalisé des évaluations pour toutes les étapes de projets, suivant les demandes des utilisateurs.
- Les évaluateurs de performances ont également logiquement travaillé sur toutes les étapes de projet possibles.
- Les souffleries et bassins de carène contactés ont été sollicités :
 - En *étape 0 et 2* pour les souffleries ;
 - En *étape 1* pour les bassins

3.3. Besoins et attentes vis-à-vis des évaluations de performances

Les besoins quant à l'évaluation des performances du (ou des) systèmes ciblés qui ont été cités, par ordre décroissant, sont les suivants :

Deux besoins ressortent avant tout, cités pour 2/3 des cas :

- L'étude de l'opportunité ou de la pertinence de l'énergie vélique pour un navire ou une flotte ;
- L'évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une "puissance équivalente carburant".

Viennent ensuite deux autres besoins cités pour plus de 50% des cas :

- Étude de la performance du système vélique seul ;
- Étude de la configuration pour l'implantation du système à bord.

Enfin, on retrouve deux autres catégories citées pour 40% des cas :

- Comparaison de systèmes véliques ;
- Impact de l'installation du système vélique sur le comportement du navire.



Sont cités une seule fois le besoin d'informations sur l'équilibre sous voile et le dimensionnement des équipements ainsi que la mise en place des réglementations.

Les résultats étaient attendus principalement sous un format chiffré, bien que quelques réponses montrent aussi un besoin d'évaluation qualitative.

3.3.1. Utilisateurs d'évaluation de performances

Les principaux besoins des utilisateurs en fonction de la catégorie dans laquelle ils se trouvent sont synthétisés dans les tableaux ci-dessous (un tableau pour les utilisateurs de performances, et un tableau pour les évaluateurs de performances).

Catégorie de besoin	Type d'utilisateur	Principal besoin exprimé
Catégorie A : Volonté de caractériser la performance d'un système vélique en général.	Armateur	Étude de la performance du système vélique pur Calculer la puissance du système pour obtenir un argument commercial pour les chargeurs (avoir un comparatif des solutions) Comparer différents systèmes véliques entre eux
	Société de classification	Étude de la performance du système vélique pur
Catégorie B : Volonté d'évaluer la pertinence du vélique pour décarboner une flotte / un navire seul sur une route générique (en retrofit ou construction neuve)	Armateur	Étude de la performance du système vélique pur sur une route générique Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant Évaluation des calculs règlementaires (EEDI/EEXI) Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes
	Financier	Étude de la performance du système vélique pur sur une route générique Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant Évaluation des calculs règlementaires (EEDI/EEXI)
Catégorie C : Volonté d'étudier comparativement des systèmes véliques et les configurations pour l'installation sur une flotte / un navire (en retrofit ou construction neuve)	Armateur	Pour des projets de retrofit sur un navire existant. → Partenariat avec un systémier et évaluation de la performance du système sur le navire : Étude de la performance du système vélique Étude de l'opportunité ou de la pertinence de l'énergie du vélique sur un navire ou une flotte (en fonction des routes disponibles, de la ressource en vent disponibles sur ces routes et du ROI & l'OPEX...)



Catégorie de besoin	Type d'utilisateur	Principal besoin exprimé
		<p>Étude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire</p> <p>Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire</p> <p>Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant</p> <p>Pour des projets sur des navires neufs.</p> <p>→ les différents systèmes sont mis en concurrence pour fournir, pour un concept défini, la meilleure assistance vélique.</p> <p>Evaluation des calculs réglementaires (EEDI/EEXI ; CII)</p> <p>Étude de la performance du système vélique</p> <p>Étude de l'opportunité ou de la pertinence de l'énergie du vélique sur un navire ou une flotte (en fonction des routes disponibles, de la ressource en vent disponibles sur ces routes et du ROI & l'OPEX...)</p> <p>Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes</p> <p>Étude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire</p> <p>Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire</p> <p>Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant</p>

Tableau 4 : Besoins des utilisateurs de performances

3.3.2. Évaluateurs de performances

Catégorie et étapes	Type d'utilisateur	Principal besoin exprimé
Catégorie A : Volonté de caractériser la performance d'un système vélique en général.	Equipementier	<p>Étude de la performance du système vélique pur</p> <p>Calculer la puissance du système pour obtenir un argument commercial pour les armateurs (avoir un comparatif des solutions)</p>
	Architecte Naval	Étude de la performance du système vélique pur



Catégorie et étapes	Type d'utilisateur	Principal besoin exprimé
		Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes
	Bureau d'Études	Étude de la performance du système vélique pur
	Fournisseur d'outils numériques	Étude de la performance du système vélique pur
	Soufflerie	Étude de la performance du système vélique pur Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes
Catégorie B : Volonté d'évaluer la pertinence du vélique pour décarboner une flotte / un navire seul sur une route générique (en retrofit ou construction neuve)	Equipementier	Étude de la performance du système vélique Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant Etude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire
	Architecte naval	Étude de la performance du système vélique Etude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire
	Bureau d'Études	Étude de la performance du système vélique Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant Etude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire
	Bassin de carène	Étude de la performance du système vélique Etude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire



Catégorie et étapes	Type d'utilisateur	Principal besoin exprimé
		Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire
Catégorie C : Volonté d'étudier comparativement des systèmes véliques et les configurations pour l'installation sur une flotte / un navire (en retrofit ou construction neuve)	Equipementier	Étude de la performance du système vélique Étude de l'opportunité ou de la pertinence de l'énergie du vélique sur un navire ou une flotte (en fonction des routes disponibles, de la ressource en vent disponibles sur ces routes et du ROI & l'OPEX...) Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant
	Architecte naval	Étude de la performance du système vélique Étude de l'opportunité ou de la pertinence de l'énergie du vélique sur un navire ou une flotte (en fonction des routes disponibles, de la ressource en vent disponibles sur ces routes et du ROI & l'OPEX...) Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes Étude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant
	Bureau d'Études	Étude de la performance du système vélique Étude de l'opportunité ou de la pertinence de l'énergie du vélique sur un navire ou une flotte (en fonction des routes disponibles, de la ressource en vent disponibles sur ces routes et du ROI & l'OPEX...) Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes Étude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire Étude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire Évaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant

Tableau 5 : Besoins des évaluateurs de performances



Analyse des résultats :

Les résultats montrent assez logiquement que plus le niveau de maturité du projet est élevé, plus les attentes en termes de performances sont précises. Ainsi, au début de l'élaboration d'un concept ou d'une étude de faisabilité, des données générales basées sur des estimations suffisent. Au fur et à mesure que le projet avance, des prévisions plus précises sont nécessaires pour soutenir l'analyse de rentabilité et s'engager sur les attentes en matière de rendement entre le fournisseur et les armateurs.

Il paraît donc utile de disposer d'un ensemble de définitions d'indicateurs de performance clés qui soit cohérent et puisse accompagner le processus de conception du navire du stade de la conception initiale à l'étape de l'exploitation, ajoutant progressivement de plus en plus de complexité.

3.4. Finalité de l'évaluation menée

Sur une soixantaine de cas d'évaluation,

- 30% ont été menées pour de nouveaux navires ;
- 22% pour des rétrofits ;
- Dans 19% des cas, il s'agissait d'évaluer un système vélique seul et dans 12%, une flotte ;
- 10% des évaluations ont eu lieu dans le cas d'un profil précis de navire existant ;
- 9% dans le cas d'un profil type de navire.



4. La démarche de prédiction ou d'évaluation de performances

4.1. L'évaluation de performances

Les performances d'un navire propulsé par le vent dépendent de la contribution de sa propulsion vélique et de l'efficacité de son système de propulsion conventionnel.

L'évaluation de performances repose sur l'analyse du fonctionnement du navire équipé d'un système de propulsion par le vent en fonction des conditions météorologiques rencontrées et des paramètres d'exploitation du navire.

Elle consiste en une série d'actions menées selon une méthode définie en utilisant des outils de simulation et/ou de mesure pour déterminer les gains liés à l'utilisation d'une technologie de propulsion par le vent. Elle peut être soit prédictive, soit mesurée en conditions opérationnelles sur le navire (en navigation).

4.2. Les bases de la prédiction de performances des navires

Jusqu'à présent, l'analyse des performances des voiliers et celle des navires motorisés étaient effectués selon deux méthodes distinctes, comportant cependant des similarités.

4.2.1. Performances des navires motorisés

La méthode vise à estimer le rendement de chaque composante de la chaîne de propulsion pour déterminer le rendement final, soit le rapport de la puissance propulsive sur la puissance délivrée par le moteur. L'objectif est de prédire la puissance nécessaire au moteur en fonction de la vitesse du navire.

4.2.2. Performances des voiliers

La prédiction de performances des voiliers a été développée lors de travaux pionniers dans les années 1930 sur les yachts, puis de progrès significatifs ont été réalisés dans les années 1970 avec de nombreuses évolutions depuis les années 1990 conduisant à l'utilisation de programmes de simulation numérique appelés VPP (pour *Velocity Prediction Program*). Ces modèles calculent des états d'équilibre du navire (appelés points d'opération du navire) pour au moins trois composantes des forces hydrodynamiques et aérodynamiques. Par définition, un point d'opération donne donc le fonctionnement global du navire dans un jeu de conditions environnementales donné (vitesse du vent, angle au vent, état de mer, angle aux vagues).

Dans le cas d'un voilier pur, le fonctionnement global du navire est donné entre autres par sa vitesse, son angle de dérive et de gîte, l'angle de son safran.

Si l'objectif initial de ce type de programme est de déterminer la vitesse du voilier en fonction des conditions de vent (vitesse et angle du vent par rapport à la marche du voilier), les informations obtenues comprennent également l'ensemble des paramètres de fonctionnement du voilier (par exemple la gîte, la dérive, les coefficients de portance des voiles et des appendices, etc....).

4.2.3. Performances des navires motorisés et propulsés par le vent

Dans le cadre de la propulsion mixte, ces deux approches [voilier / moteur] doivent être couplées dans un même outil qui prenne en compte la physique des navires à moteur et celle des voiliers, avec une complexité supplémentaire issues du couplage ces deux modes de propulsion.

NB : pour répondre aux problématiques énergétiques du transport maritime, il devient nécessaire de modéliser l'ensemble de la chaîne énergétique du navire. Des solutions innovantes apparaissent, diversifiant le nombre et la nature des systèmes fournisseurs d'énergie à bord. La production d'énergie pourra ainsi provenir d'un ou plusieurs groupes électrogènes, de panneaux solaires, d'une pile à combustible, etc... Le navire sera alors modélisé comme une collection de sources, de consommateurs, de convertisseurs et de stockage d'énergie connectés entre eux.



4.2.4. Performance et système vélique seul

L'un des points qui a été discuté en atelier collectif est de savoir si, lorsqu'on examine un système vélique seul, on parle aussi de "performance" ou simplement, de « caractéristiques » du système. En effet, si la performance est principalement examinée à l'échelle d'un navire, elle est aujourd'hui également appréhendée à l'échelle des systèmes véliques seuls : un coefficient aérodynamique caractérisant la portance d'un système vélique pourrait ainsi être considéré aujourd'hui comme un indicateur de performance. Ces « caractéristiques » - puisque l'atelier collectif a plutôt poussé à utiliser ce terme, peuvent soit être les forces que le système vélique produit (force de poussée, force latérale, portance, traînée) à différents angles de vent soit la puissance propulsive qu'il est capables de fournir. Dans ce cas particulier, les caractéristiques peuvent être évaluées à l'aide de simulations numériques type VPP, mais aussi via des tests en soufflerie, ou plus simplement par le calcul du coefficient de portance et de traînée suivant l'angle de vent. Parler de caractéristique plutôt que de performance permet ici de s'affranchir des questions posées sur l'interprétation d'un tel indicateur de performance, générique indépendant du navire et donc de l'environnement dans lequel il va être utilisé.

4.3. Les constantes de la démarche de prédiction de performances

La démarche de prédiction des performances telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui repose sur l'utilisation de simulations numériques qui vont traiter des données de manière itérative pour générer un résultat final. La prédiction de performances est ainsi constituée d'un enchaînement de phases de récupération de données et de méthodes pour traiter ces dernières afin d'en obtenir de nouvelles. C'est ce qui est présenté de manière schématique ci-dessous.

- Un des déterminants majeurs de cette prédiction est constitué par les **données d'entrée**. Ces données varient beaucoup suivant leur disponibilité.
- Un autre déterminant concerne **les méthodes pour traiter ces données**, en générer de nouvelles, puis **les utiliser pour restituer un modèle numérique du navire**.

Enfin, le projet NORVENT doit permettre de mieux cerner la **vision et donc les indicateurs de performance** qui sont recherchés par les utilisateurs de ces évaluations de performances (financière, gain écologique...) et de quelle manière ces indicateurs de performance sont livrés (format, précision.).

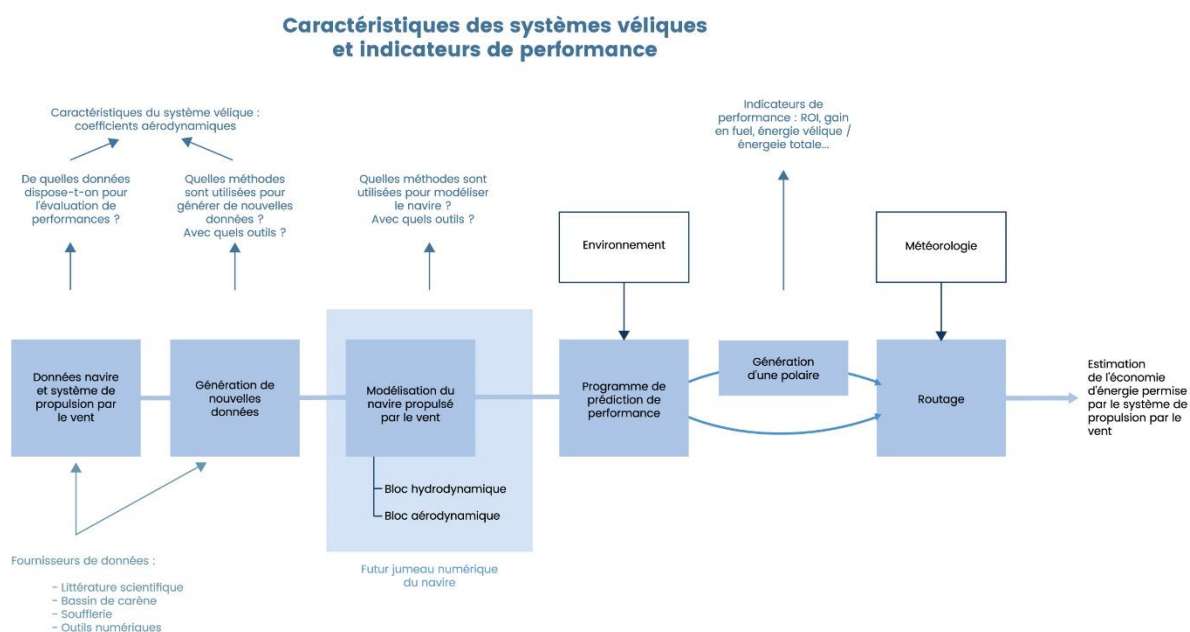


Figure 6 : Démarche de prédiction de performances



4.4. Les blocs thématiques de l'évaluation de performances

Sur la base de ce schéma, la démarche d'évaluation de performances a été scindée en **3 grands blocs thématiques** qui correspondent aux données d'entrée d'ordre hydrodynamique, aérodynamique et environnemental qui vont être nécessaires pour l'évaluation des performances.

Chaque "bloc" du schéma (bloc aérodynamique, bloc hydrodynamique, bloc environnement) a été relié à une partie du questionnaire qui a été soumis aux participants.

NB : la précision et la fiabilité des données de sortie et de l'évaluation dépendent de celles des données d'entrée.

4.5. Les limites actuelles des simulations numériques utilisées pour les évaluations de performances des navires véliques

Pour fiabiliser des modèles numériques existants de navires, il est nécessaire de valider ceux-ci en les recalant grâce à des données acquises en situation réelle (ici, l'opération de navires véliques en mer). Or, du fait du faible nombre d'installations actuelles sur les navires marchands (24 grands navires de jauge UMS >5000 sont recensés en mer fin 2022), les modèles utilisés à ce jour ne sont pas encore recalés. Cet état de fait est temporaire car plus les installations vont avoir lieu, plus les bases de données réelles seront alimentées. On peut parler de triptyque entre modélisation numérique du navire, essais en bassin et essais en mer. Les trois s'enrichissent de manière permanente.

D'ores et déjà, une étape importante est à mettre en œuvre : construire les méthodes qui permettront de collecter les données en mer et de les interpréter pour recalcr ces modèles numériques.

4.6. La modélisation du navire vélique : le futur jumeau numérique

L'évaluation de performances s'appuie sur la modélisation du navire selon les 3 grands blocs présentés précédemment (aérodynamique, hydrodynamique et environnemental), qui doivent traduire les principaux effets physiques auxquels est soumis le navire. Ce modèle numérique du navire à propulsion par le vent peut être défini comme une approche systémique physique permettant de modéliser de manière modulaire et multiphysique chacun des efforts s'appliquant sur le navire en interaction avec son environnement (vent, vagues, courant) comme représenté ci-dessous.

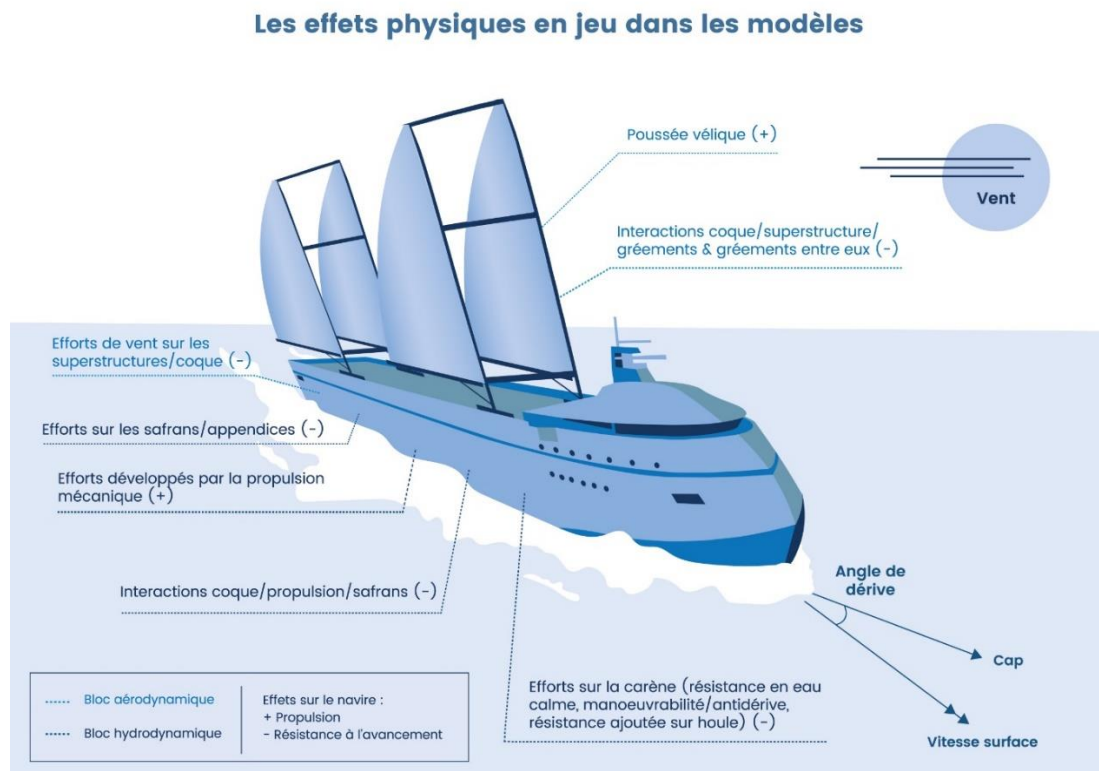


Figure 7 - Les effets physiques en jeu dans le système [navire + système vélique]



Le navire évolue à l'interface entre deux fluides. Ces modèles entrent dans les 3 grands blocs décrits précédemment et de la manière suivante :

Bloc hydrodynamique

- Modèles d'efforts sur la carène (résistance en eau calme, manœuvrabilité/antidérive, résistance ajoutée sur houle)
- Modèles d'efforts sur les safrans/appendices
- Modèles d'efforts développés par la propulsion mécanique
- Modèles d'interactions coque/propulsion/safrans

Bloc aérodynamique

- Modèles d'efforts de vent sur les superstructures/coque
- Modèles d'efforts développés par les systèmes de propulsion véliques
- Modèles d'interactions coque/superstructures/gréements & gréements entre eux

Le **troisième bloc - l'environnement** dans lequel évolue le navire - est constitué de modèles qui vont caractériser l'environnement dans lequel peut se trouver le Modèle Numérique du navire. Ces données font donc partie intégrante de la polaire de performance [navire seul]. Par exemple, l'état de mer va impacter la résistance à la houle du navire.

Un modèle peut être défini comme une représentation simplifiée d'un système ou d'un phénomène physique permettant de reproduire son fonctionnement. Les modèles sont des cadres mathématiques qui doivent être alimentés en données spécifiquement adaptées au système à l'étude. Quel que soit le modèle, la source de données peut être générée à partir de différentes méthodes à multi-fidélité (du plus au moins précis/coûteux) :

- Mesures (expérimental / réel) ;
- Méthodes numériques hautes / moyennes fidélité (CFD / théorie potentielle) ;
- Formules semi-empiriques / extrapolations sur bases de données.

4.7. Les données utilisées pour chaque bloc et leur origine

4.7.1. Aérodynamique

Les caractéristiques aérodynamiques d'un système vélique peuvent être traduites par des coefficients. Les coefficients de portance et de traînée sont les plus souvent utilisés. La finesse d'un système est son rapport (portance/traînée). Il correspond à son efficacité au près, et donc sa capacité à remonter le vent. L'idéal est de représenter ces coefficients pour les différents angles de vent.

Ceux-ci peuvent être calculés à l'issue d'expériences dédiées réalisées en soufflerie, ou bien de simulations numériques type CFD, ou encore par des calculs issus de la littérature. La mécanique des fluides numérique, plus souvent désignée par le terme anglais *Computational Fluid Dynamics* (CFD), consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide.

Des tests peuvent être réalisés pour plusieurs combinaisons de distances et d'angles de systèmes véliques par rapport au vent entrant. Ces expériences visent à mesurer les effets de l'interaction aérodynamique sur les forces de portance et de traînée générées par chaque système.

Ces données sont ensuite utilisées dans le modèle d'efforts développés par les systèmes de propulsion véliques. Ces expériences ne sont pas encore réalisées en soufflerie, par manque de moyens associés. Les données essentielles du système propulsé par le vent selon les acteurs sont :

- Le modèle 3D du gréement ;
- Les polaires des gréements fiabilisées et normalisées selon les fournisseurs ;
- Les efforts au pied de mât ;



- Les coefficients de dimensionnement admissibles à diverses allures ;
- Les accélérations maximales acceptées.

Dans la plupart des cas, des tests en soufflerie ont été réalisés. Les difficultés liées à ces tests en général ont été les délais de planning et production de la maquette et des essais, les prix et délais pour faire des essais à un nombre de Reynolds suffisant (ce nombre garantit la précision et fiabilité des résultats), et les dimensions et qualités de mesures de la soufflerie.

Différentes caractéristiques du système vélique ont été identifiées dans le cadre du projet international WASP, telles que :

- Le coefficient de portance maximal ;
- Le coefficient de poussée maximale ;
- Le coefficient de traînée du système au ralenti par vent de face ;
- La finesse (C_x/CL).

NB : Une traduction en français du rapport publié par le projet WASP est présentée en Annexe 4. Dans le rapport, ces données sont présentées comme indicateurs de performance. Lors de l'atelier NORVENT, il a été spécifié que pour les participants, il convient de parler de caractéristiques du système vélique plutôt qu'indicateur de performance à proprement parler.

4.7.2. Hydrodynamique

Les données de navire essentielles, selon les acteurs sont :

- Le plan d'ensemble (*General Arrangement*) ;
- Le modèle 3D de la carène ;
- Le modèle 3D des appendices ;
- Les caractéristiques du safran ;
- Les données du navire en stabilité ;
- La puissance motrice consommée pour le régime de croisière envisagé en fonction des conditions météorologique, les puissances typiques du moteur ;
- Les performances du plan antidérive à diverses allures ;
- La loi de conjugaison hélice-moteur ;
- La courbe résistance à l'avancement.

Les caractéristiques hydrodynamiques n'ont pas d'utilisation directe en tant qu'indicateurs clés de performance. Les données sont forcément couplées à des caractéristiques aérodynamiques pour parler de performances.

4.7.3. Environnement

Une modélisation plus ou moins fine de l'état de mer et du vent permet de définir l'environnement dans lequel évolue le navire. Les modélisations portent sur :

- Le vent ;
- La houle ;
- Le courant.

Ces paramètres auront un impact sur la résistance à l'avancement du navire, mais aussi sur les efforts développés par le système vélique. Les modélisations peuvent être simples ou intermédiaires. L'application du *Sea Margin* est un exemple de modélisation simple : on applique une marge de 10 à 25% pour modéliser une résistance accrue causée par le vent et l'état de mer. Une modélisation intermédiaire représente plus finement l'état de mer grâce à des calculs plus poussés.



4.8. Génération de la polaire du navire

Pour une vitesse de service de navire choisie, l'équilibre entre les forces aérodynamiques et hydrodynamiques est trouvé à l'aide d'un programme d'optimisation qui recherche un équilibre du navire avec la poussée d'hélice minimale requise. Les résultats de cette procédure sont ensuite transmis au programme de prédiction de performance qui va ajouter les données du bloc environnement.

NB : les performances d'une conception assistée par le vent dépendent de la contribution du système de propulsion éolienne aux côtés de l'efficacité du moteur.

Les résultats de la modélisation des navires et du Programme de Prédiction de Performance sont généralement représentés par un tracé des variables décrivant les performances du navire pour différentes vitesses et directions du vent ainsi que l'état de mer. Les axes sont définis par rapport au cap du navire : le navire navigue directement face au vent à TWA (*True Wind Angle*) = 0°, et vent arrière pour TWA=180°. Les indicateurs clés disponibles à ce stade sont d'ordre réglementaire : l'EEDI, l'EEXI, un CII prédictif ; ainsi que des premières estimations d'économies potentielles.

4.9. Routage du navire

Les coordonnées de la polaire de performance du navire sont ensuite utilisées pour réaliser le routage de celui-ci, en fonction des données météorologiques. Pour faire très simple, la polaire du navire est une base de données de la performance du navire pour l'ensemble des conditions de mer possibles. Elle représente la performance du navire pour toutes les conditions dans lequel il peut se trouver. Le routage vient interpoler les données de cette polaire avec le vent et les conditions de mer en un point donné pour déterminer la puissance du navire.

Deux types de routage sont pratiqués : le routage statistique pour évaluer les performances du système et le routage dynamique pour utiliser au mieux le système (optimisation et gestion du risque / aspect opérationnel).

Le routage statistique se base sur l'historique des conditions météorologiques depuis plusieurs années et les croise avec la polaire de performance du navire. L'objectif est de faire naviguer le navire plusieurs fois sur une route avec toutes les conditions météorologiques possibles. Utilisés avec des données météorologiques historiques, les algorithmes de routage permettent d'estimer la réduction de carburant qui est atteignable grâce à l'installation de systèmes de propulsion par le vent sur un tracé donné et ainsi qualifier le business model et le retour sur investissement. Le calcul du routage se fait soit entre deux points (départ et arrivée), soit sur une route composée de points de passage.

Le routage opérationnel permet de recalculer la route prévue en routage statistique avec la performance réelle en direct. Celui-ci permet d'anticiper les mauvais états de mer ou les vents contraires pénalisants pour les systèmes non rétractables mais surtout d'anticiper les conditions météorologiques favorables à l'utilisation des systèmes de propulsion par le vent.

Les indicateurs clés disponibles à ce stade est le potentiel d'économie d'énergie du système (indicateur développé dans l'Annexe 4 du rapport). C'est un indicateur qui va comparer avant tout un différentiel entre fonctionnement avec et sans système vélique. Ils sont difficilement pertinents pour des navires à propulsion principale par le vent.

L'algorithme de calcul du routage statistique intègre en général les données suivantes :

- Vent ;
- Vagues ;
- Courant ;
- Consommation de carburant ;
- Restrictions de navigation ;
- Heure de départ et heure d'arrivée ;
- Performance du navire.

L'algorithme de routage statistique va explorer un nombre important de routes à différentes vitesses, en tenant compte de l'impact des données météorologiques et des zones de navigation. Il va balayer toutes



les possibilités, croiser les données, éviter les phénomènes dangereux, les routes trop énergivores et proposer au navigant une solution de routes à la fois sûres et économes.

5. Recensement des démarches utilisées pour chaque catégorie et les indicateurs de performance associés

Un indicateur de performance correspondant à la catégorie A évalue les performances du système vélique seul, tandis qu'un indicateur de performance correspondant à la catégorie C décrit le résultat d'une évaluation plus spécifique (du navire). Etant donné que les indicateurs des trois catégories ont des objectifs différents, ils répondent à des attentes différentes.

La **catégorie A** contient des indicateurs caractérisant les systèmes de propulsion par le vent seuls (et sans la présence d'un navire). Les caractéristiques de ces systèmes peuvent servir pour avoir des éléments comparatifs ou des premières estimations avec des ordres de grandeurs. Pour cela, les participants au projet s'accordent sur la nécessité d'harmoniser les méthodes et formats pour obtenir les polaires des systèmes.

La **catégorie B** comprend des indicateurs spécifiques au navire propulsé par le vent obtenu en «navigant» sur un itinéraire standard prédéfini. Ces indices sont en général utilisés pour les évaluations réglementaires, par exemple, dans l'EEDI, où l'influence de l'installation de systèmes de propulsion par le vent est évaluée en faisant naviguer le navire étudié le long d'une route mondiale standard.

Les **indicateurs de catégorie C** sont généralement utilisés dans le contexte de l'analyse du ROI, de l'OPEX ou du CAPEX (d'indices d'ordre économiques) pour l'installation de technologie(s) de propulsion par le vent. Il a pour objectif de s'engager sur des attentes en matière de rendement entre les parties prenantes commerciales. Les indicateurs de performance de cette catégorie doivent donc exprimer avec précision les économies d'énergie ou de carburant attendues pour un navire particulier négociées selon un schéma spécifique. Une notion d'engagement sur les performances vient s'ajouter aux préoccupations par rapport aux précédentes catégories. L'absence de normes pour les indicateurs de catégorie C est actuellement un problème important pour les armateurs et les autres parties prenantes car elles manquent de données fiables sur lesquelles s'appuyer pour s'engager. Les décisions d'investissement sont souvent retardées parce qu'il est difficile de comparer des technologies concurrentes.

Les indicateurs de ces catégories ont donc des objectifs très différents. Les indicateurs de la catégorie D, par exemple, sont basés sur des paramètres spécifiques sur le navire et sa route et ne peuvent pas être utilisés pour comparer et classer les technologies de manière générale.

Wind Ship a proposé aux participants une liste d'indicateurs de performance pour les quatre croisements proposés. Les groupes de travail n'ont pas réussi à aboutir à des choix définitifs parmi cette liste, démontrant ainsi la complexité du sujet pour réussir à déterminer des indicateurs équitables et normés quelle que soit la configuration du navire ou la technologie utilisée.



	Indicateurs clés de performance proposée en atelier
Catégorie A	<ul style="list-style-type: none"> • Ordre de grandeur de la densité de puissance (kW/m²) • Premier ordre de grandeur du ROI avec connaissance du CAPEX et de l'OPEX • Finesse maximale (CL/CD),
Catégorie B	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats des calculs règlementaires : EEDI et EEXI • Premier ordre de grandeur du ROI avec connaissance du CAPEX et de l'OPEX
Catégorie C	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats prédictifs des calculs en CII • Gains de consommation permis par le vélique calculés à partir des résultats de routage
Catégorie D	<ul style="list-style-type: none"> • Résultats des calculs en CII • Gains de consommation permis par le vélique

Tableau 6 : Liste d'indicateurs clés de performance proposée en atelier

6. Liste des principaux outils de prédiction de performances utilisés

Les outils utilisés dans les démarches d'évaluation de performances sont de différentes natures :

- Des outils permettant de l'instrumentation et l'expérimentation (soufflerie, bassin) ;
- Des outils numériques permettant de réaliser des simulations.

Le tableau en Annexe 3 recense les outils qui ont pu être identifiés sur la base de bibliographie et d'échanges avec les acteurs, comme étant disponibles aujourd'hui pour travailler sur les enjeux de la propulsion des navires par le vent.

Les tests en soufflerie permettent l'étude de certains paramètres influents dans les modèles, tels que :

- Les effets du vent sur les structures de tout type ;
- La tenue au vent ;
- Le comportement aéroélastique de structures.

Les bassins de carène permettent de faciliter l'étude des paramètres influents dans l'optimisation des performances globales du navire par des tests réalisés sur des maquettes en bassin de traction.

Ces outils d'instrumentation et d'expérimentation sont payants et leur coût peut varier en fonction des besoins de l'utilisateur.

Les outils numériques permettent d'estimer les performances hydrodynamiques, aérodynamiques et les rendements énergétiques à bord des navires ; d'estimer l'impact des technologies véliques à l'échelle d'un navire ou d'une flotte sur les performances, les émissions et les coûts d'exploitation ou encore l'étude du routage et le calcul de conformité réglementaire.

- Certains programmes numériques d'évaluation des performances sont disponibles gratuitement en ligne : le Flettner Savings Calculator de Lloyd's Register et BlueRoute de Marin (plateformes de routage en ligne) ou encore le xWasp_CN de l'Ecole Centrale Nantes (Programme de Prédiction de Performance en Opensource)⁽²⁾ ;

² Thèse de Moran CHARLOU, co-financée par l'ADEME



- D'autres outils sont payants proposés sous forme de service à la mesure (outils internes d'évaluation de performances et de routage de D-ICE Engineering, du CRAIN ou de BlueWasp), de licence (outil de prédiction de performances et de routage Efficiency de Syroco), ou d'abonnement (outil de routage statistique Satori développé par D-ICE Engineering).

7. Le budget associé aux évaluations des performances

Le budget associé à la fourniture de données ou d'évaluations des performances est très variable et peut être conséquent (de quelques milliers à plusieurs dizaines voire centaines de milliers d'euros). Les délais varient eux aussi d'une semaine à plusieurs années, suivant les résultats attendus. Le budget et les délais sont en général contraignants et limitent la qualité des prévisions.

8. Réflexion sur la garantie des performances et la contractualisation

La contractualisation de la performance pourrait être garantie par un contrat tripartite qui établit des performances de navire (chantier) et véliques (fournisseur de technologie) engageantes et qui couvre les engagements. Un système de bonus/malus peut être mis en place pour le chantier et le fournisseur sur lequel l'armateur s'engage (x euros pour x% gagnés/perdus en CO₂). Il conviendra de s'accorder sur la période pour laquelle la prime est calculée, et le seuil de déclenchement de la prime en fonction du transit réalisé.

La contractualisation pourrait aussi porter sur la maintenance et le coût opérationnel. Par exemple, pour une période donnée, l'utilisateur de l'équipement prend à sa charge la maintenance du système. On peut soutenir que les indicateurs de performance devraient refléter les performances techniques et non les mesures opérationnelles. Le succès de la route dépend de facteurs tels que la compétence de l'équipage, la sécurité, les exigences logistiques, etc. Ceux-ci sont très difficiles à intégrer aujourd'hui dans un indicateur de performance standardisé.

Quelle que soit la précision avec laquelle l'économie d'énergie est modélisée sur un itinéraire, il s'agit aujourd'hui d'une valeur théorique. Or les économies réalisées en exploitation dépendent de paramètres opérationnels qui ne peuvent pas encore être prévus dans les estimations à ce jour, tels que le temps de maintenance, la modification de la route et de la vitesse, la modification de l'efficacité de la coque due à l'encrassement, les compétences de l'équipage, le fonctionnement du système de contrôle automatisé du système, le givrage et l'usure.

D'autres systèmes de garanties des performances sont en réflexion. La garantie porterait ainsi sur l'amélioration des performances d'un navire, pour lequel la voile est un paramètre parmi d'autres ; ou sur une flotte dans son ensemble, au sein de laquelle le navire est un paramètre. L'objectif est de lister un nombre de paramètres jugés influents dans la performance globale du navire, de faire la somme des améliorations des performances du navire en opération, puis de retenir le delta obtenu d'une année à l'autre.

Certains participants mettent en valeur le fait qu'il n'existe aujourd'hui pas de « juge de paix » ou de tiers de confiance pour valider les performances. Il manque, en outre, un référentiel sur lequel s'appuyer et un dispositif pour valider le respect des performances. Intégrer cette tierce partie pourrait rendre le contrat « quadripartite » à l'avenir.



9. Limites et manques identifiés au regard des besoins exprimés

Les verrous identifiés à la suite des entretiens et de l'atelier sont les suivants :

9.1. Il existe plusieurs notions de "performance"

La notion même de "performance" a donné lieu à plusieurs acceptions : pour certains participants, la performance intègre nécessairement une dimension économique, alors que pour d'autres, elle ne concerne que les résultats physiques atteints par le ou les gréements véliques ou le navire équipé. D'autres retours en-dehors de l'atelier ont souligné que seule la performance écologique était aujourd'hui acceptable, ie, le volume de carburant qui n'aura pas été consommé. Enfin, pour certains acteurs, on pourrait parler de "performance réglementaire" pour se référer aux résultats des calculs réglementaires. Il est donc nécessaire de préciser en complément du terme de « performance » l'indicateur dont on parle (les économies de puissance, l'énergie délivrée par le système, la finesse etc.) et dont la pertinence variera selon les cercles d'acteurs en présence.

Par ailleurs, lorsqu'on considère un système vélique seul, il semble que les participants s'accordent pour parler plutôt de « caractéristiques » que de « performances ».

9.2. La performance est uniquement prédictive

Dans la mesure où il n'existe encore que peu de navires équipés de systèmes véliques innovants, les évaluations des performances ont toutes un **caractère prédictif**, basé sur des simulations utilisant des outils numériques. La distinction entre cette performance prédictive (qui est le cas aujourd'hui) et la performance qui sera constatée en opération est claire. Cependant, la performance "constatée en opération" sera loin d'être facilement accessible car il n'existe pas de méthode qui permette d'équiper un navire de capteurs puis de déduire directement de mesures réalisées en mer la performance en opération en dehors du volume de carburant économisé. D'autant plus que **certains paramètres ne seront pas modélisables**, tels que l'intervention de l'équipage sur les systèmes véliques. Il faut donc avancer dès aujourd'hui sur ce sujet complexe car une **corrélation entre ces deux performances est nécessaire** pour que les acteurs puissent s'engager contractuellement.

9.3. Le traitement de la performance se fait au cas par cas

Lors des réponses au questionnaire, des entretiens et de l'atelier les croisements entre catégorie de besoin et niveau de maturité du projet ont été discutés. Au-delà des quatre croisements proposés pour guider les discussions, ce sont de multiples possibilités qui se présentent chaque jour aux évaluateurs des performances (cf le compte-rendu de l'atelier collectif en Annexe 3 de ce rapport). A ce jour, chaque cas est traité de manière spécifique grâce à l'expérience de ces évaluateurs qui vont décider de prendre en compte ou non tel ou tel effet dans leur évaluation, et donc d'utiliser telle ou telle donnée avec tel niveau de précision : la communauté des évaluateurs n'a **pas encore la capacité d'automatiser ce traitement**.

9.4. Le développement de méthodes collectivement consolidé est long

Malgré le point précédent, les participants à la démarche et notamment à l'atelier ont souligné le **besoin de méthodes communes**, et la nécessité de **simplifier le sujet des performances** plutôt que de le complexifier. L'un des experts volontaires pour guider les discussions a expliqué son expérience en matière de développement d'un VPP collectif adopté dans le milieu de la course au large pour permettre de comparer des résultats : une démarche entamée il y a 40 ans et qui s'enrichit toujours grâce à la contribution de nombreux acteurs. Cet exemple pourrait inspirer la dynamique actuelle autour de l'évaluation des performances des navires propulsés par le vent, en ayant conscience d'une construction de références qui nécessitera un temps long... raison de plus pour ne pas en perdre.



10. Propositions et recommandations pour la poursuite du projet

Au regard des résultats du projet, les recommandations sont donc les suivantes :

Immédiatement mais à visée à long terme :

- Profiter du travail initié dans le cadre du projet NORVENT et de la mobilisation qu'il a suscitée pour **entretenir une démarche de construction de références** qui permet de gagner en transparence pour les utilisateurs.
- Mobiliser un **petit groupe d'experts techniques** à l'échelon français via des sessions courtes et très ciblées (1 journée en présentiel sur un périmètre de réflexion très délimité)
- **Animer la démarche sur le long terme** via la filière (Wind Ship)
- Préparer des **sessions d'échange avec le niveau international** (groupes de travail de l'ITTC, de la IACS, etc.)

A très court terme :

- Organiser une à deux **sessions de travail** entre ce **groupe d'experts** (ou une partie) et le groupe de travail de l'ITTC pour contribuer activement à **l'émergence d'une proposition** sur les méthodes à utiliser en fonction de la fiabilité attendue de l'évaluation des performances et des effets physiques à considérer.
- Formaliser une **première grille de lecture commune** ou référentiel commun autour des évaluations des performances en s'appuyant sur le travail déjà mené dans le cadre de NORVENT :
 - Quel est le besoin (le contexte du projet) ?
 - Quel est le niveau de fiabilité attendu ?
 - Quels sont les effets physiques qu'on pourrait prendre en compte ?
 - Aérodynamique :
 - Navire
 - Système vélique
 - Hydrodynamique
 - Interactions
 - Quels sont les modèles disponibles pour représenter ces effets ?
 - Quelles sont les données d'entrée nécessaires ?

A moyen terme :

- **Préciser** cette grille de lecture /référentiel en hiérarchisant **pour chaque niveau de fiabilité** les effets à prendre en compte, et en réalisant un parangonnage (ou benchmark) des méthodes existantes (si possible par rapport à un cas de référence).
- Proposer une **standardisation des formats et des paramètres** à prendre en compte dans les polaires de système vélique.
- Proposer de **premières règles sur la mesure en mer** et l'utilisation de ces résultats pour évaluer la performance.



ANNEXES

Annexe 1 – Questionnaire

Questionnaire d'état de l'art des démarches d'évaluation des performances véliques

Le projet NORVENT a pour objectif de réaliser un état des lieux des besoins et des démarches utilisées pour l'évaluation des performances des systèmes de propulsion des navires par le vent. Il constitue la première étape d'une d'harmonisation et standardisation des évaluations, afin de crédibiliser fortement les résultats produits auprès des utilisateurs de ces services, un enjeu régulièrement relevé par les acteurs du secteur.

NORVENT s'appuie sur une collecte de données et des entretiens auprès des utilisateurs des résultats de prédiction de performance. Nous vous sollicitons car votre structure a été identifiée en tant qu'utilisateur de ces services d'évaluation de performance.

Vos réponses ne seront visibles que par Wind Ship et les résultats présentés à la fin du projet seront anonymisés. Ce travail donnera lieu à une courte note synthétisant un état de l'art des démarches utilisées. Celle-ci sera présentée lors d'un atelier collectif auquel vous serez conviés en février 2023, afin de produire des propositions pour avancer dans l'harmonisation des démarches.

Adresse e-mail *

marine.rialan@wind-ship.fr

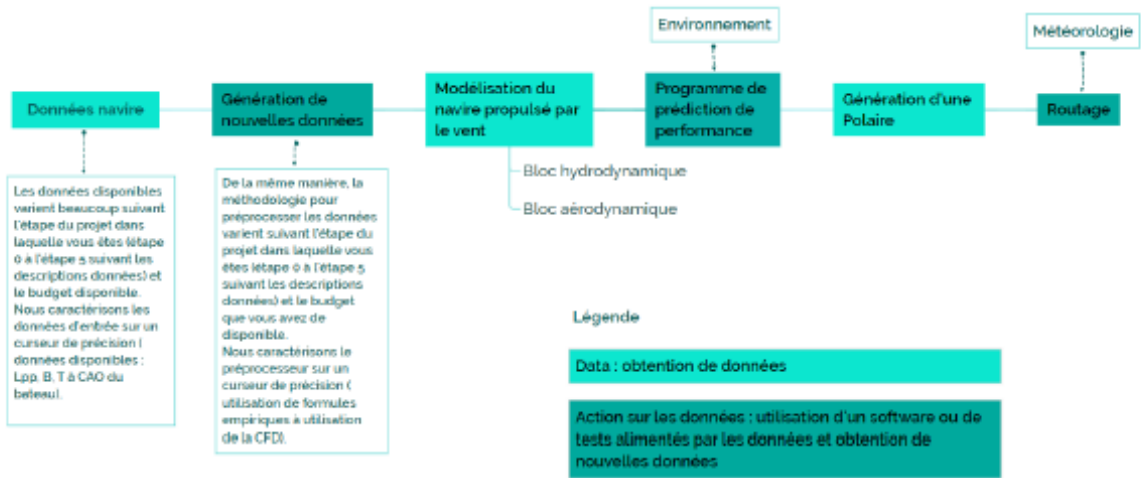
Démarche d'évaluation des performances

La prédiction de performance est constituée d'un enchaînement de phases de récupération de données et de méthodes pour traiter les données afin d'en obtenir de nouvelles.

- Un des déterminants majeurs de cette prédiction est constitué par les données d'entrée. Ces données varient beaucoup suivant leur disponibilité. C'est un premier point que nous souhaitons éclaircir (de quelles données disposez-vous, lesquelles générez-vous en complément).
- Un autre déterminant concerne les méthodes pour traiter ces données, en générer de nouvelles, puis les utiliser. C'est le second objectif de ce questionnaire.
- Enfin, nous souhaitons comprendre quelle vision de la performance est poursuivie (financière, gain écologique...) et de quelle manière ces données de performance sont livrées (format, précision..).

Ci-dessous, le schéma type du fonctionnement itératif permettant de prédire les performances:

Schéma de la démarche type prédiction de performance



Vous avez réalisé ou fait réaliser des évaluations de performance dans différents cas de figure (selon la définition présentée ci-dessous : catégorie de besoins/étape du projet). Nous vous demandons de remplir le questionnaire ci-dessous pour un seul des cas de figure que vous avez rencontrés : celui que vous avez traité le plus fréquemment.

NB : lors du remplissage de ce questionnaire, si vous n'êtes pas en mesure de répondre à une question, passez à la suivante. Un entretien oral permettra de préciser les points qui le nécessitent.

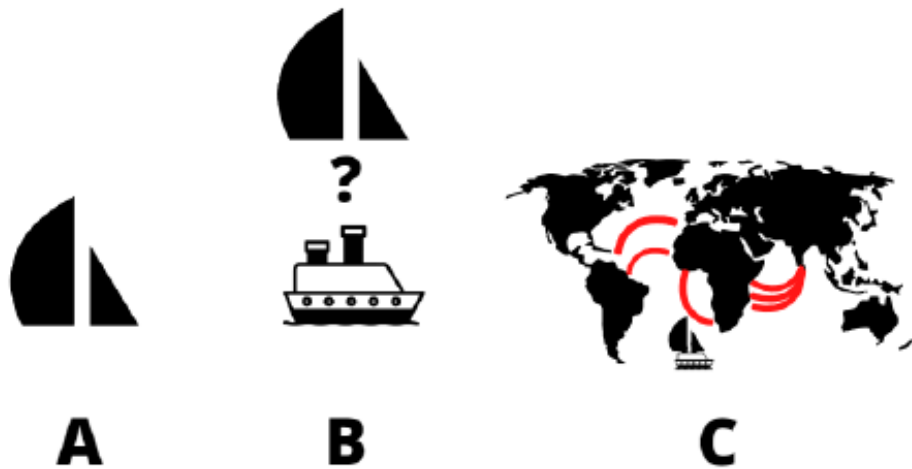
Définition des catégories de besoins de prédiction de performance

Les évaluations de performance ont lieu pour différents besoins et à différents moments d'un projet. Afin d'être tous d'accord sur les terminologies, nous proposons une catégorisation des besoins et un découpage des étapes clés d'un projet.

Nous avons recensé 3 grandes catégories de besoins de prédiction de performance (schématisées ci-dessous):

- **Catégorie A :** Volonté de caractériser la performance d'un système vélique en général.
- **Catégorie B :** Volonté d'évaluer la pertinence du vélique pour décarboner une flotte / un navire seul (en retrofit ou newbuilt).
- **Catégorie C :** Étude comparative de systèmes véliques et de configurations pour l'installation sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuilt)

Schéma des 3 catégories



Définition des étapes de projet pour l'évaluation des performances

Pour chaque catégorie, nous avons précisé les étapes du projet de navire assisté par le vent à évaluer.

- **Étape 0 :** Première intention sur l'utilisation du vélique (on souhaite évaluer ce que peut apporter dans l'absolu un système vélique particulier, ou évaluer si "le vélique" de manière générale est intéressant pour décarboner sa flotte ou son navire).
- **Étape 1 :** Preliminary Study. Cette étape correspond à un avant-projet préliminaire pendant une phase de "dériskage".
- **Étape 2 :** Concept Design. Un document permet d'interroger des systémiers ou des chantiers afin d'avoir une spécification technique et une cotation. Des plans détaillés sont disponibles.
- **Étape 3 :** Phase de contractualisation. Un plan de financement plus détaillé est nécessaire à ce stade, car les parties s'engagent sur une réduction des coûts / émissions de GES.
- **Étape 4 :** Essai en sortie de chantier. Ces essais sont réalisés selon les conditions de vent et de mer disponibles et les normes en vigueur.
- **Étape 5 :** Mesures en opération lors de l'exploitation du navire. Ces mesures se réalisent à long terme, dans l'ensemble des conditions de vent et de mer. Elles permettent l'acquisition de données pour valider les polaires de performance.

Êtes-vous :

- Armateur
- Affréteur /chargeur
- Financeur/Investisseur
- Equipementier
- Architecte naval / concepteur
- Société de classification
- Motoriste
- Bureau d'études
- Fournisseur d'outil numérique
- Bassin de carène
- Soufflerie

Pouvez-vous nous indiquer combien d'évaluation(s) de performance vous avez réalisé ou fait réaliser en tout ?

Objectifs de la démarche

Vos problématiques et besoins

Dans quelle catégorie étiez-vous lorsque vous avez réalisé l'évaluation des performances traitée dans ce questionnaire (la plus fréquemment réalisée) :

- Catégorie A : Volonté de caractériser la performance d'un système vélique en général.
- Catégorie B : Volonté d'évaluer la pertinence du vélique pour décarboner une flotte / un navire seul (en retrofit ou newbuilt).
- Catégorie C : Étude comparative de systèmes véliques et de configurations pour l'installation sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuilt)
- Autre : -----

Si autre, précisez:

L'évaluation des performances traitée dans ce questionnaire (la plus fréquemment réalisée) a-t-elle eu lieu au stade de :

- Etape 0 : Première intention sur l'utilisation du vélique
- Etape 1 : Preliminary Study. Cette étape correspond à un avant-projet préliminaire pendant une phase de "dérivage".
- Etape 2 : Concept Design. Un document permet d'interroger les systémiers afin d'avoir une spécification technique et une cotation. Des plans détaillés sont disponibles.
- Etape 3 : Phase de contractualisation. Un plan de financement plus détaillé est nécessaire à ce stade, car les parties s'engagent sur une réduction des coûts / émissions de GES.
- Etape 4 : Essai en sortie de chantier. Ces essais sont réalisés selon les conditions de vent et de mer disponibles.
- Etape 5 : Essai à long terme en opération. Ces essais se réalisent à long terme, dans l'ensemble des conditions de vent et de mer. Elles permettent l'acquisition de données et de revoir les polaires de performance.
- Autre :

Si autre, précisez

.....

Pouvez-vous nous indiquer combien d'évaluation(s) de performance vous avez réalisé ou fait réaliser pour cette étape ?

.....

Quels étaient vos besoins quant à l'évaluation des performances énergétiques du (ou des) système ciblé

(Plusieurs réponses possibles)

- Etude de la performance du système vélique pur
- Etude de l'opportunité ou de la pertinence du vélique sur un navire ou une flotte (en fonction des routes disponibles, de la ressource en vent disponibles sur ces routes et du ROI & l'OPEX...)
- Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes
- Etude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire
- Etude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire
- Evaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant
- Autre :

Si autre, précisez :

.....

Pouvez-vous nous donner plus de détails sur le ou les projets que vous avez étudiés (contexte, délais...) ?

.....

Attendez-vous une évaluation de performance :

Qualitative

Chiffrée

Autre :

Si autre, précisez:

.....

Sur quel projet portait l'évaluation ?

Un système vélique seul

Une flotte

Un navire existant (en retrofit)

Un nouveau navire

Un profil "type" de navire

Un profil précis d'un navire existant

Autre :

Si autre, précisez

.....

Quel a été le budget associé à cette étape (de manière indicative) ?

.....

Le budget a-t-il été contraignant dans le choix de la démarche réalisée cette étape ?

Quelles ont été ces contraintes à cette étape ?

- Limite dans les expérimentations à terre
- Limite dans le recours aux essais en soufflerie ou bassin
- Limite dans le choix des modèles numériques
- Limite dans les données d'entrées pour les modèles numériques
- Limite dans les essais mer
- Autre : -----

Si autre, précisez

Quel a été le délai dont vous disposiez pour cette étape ?

A-t-il été respecté ? Si non, pourquoi ?

Si non, quel a été le délai réel ?

Choix général de la démarche mise en œuvre

Quelles démarches ont été mises en place pour cette étape ?

- Collecte de données
- Tests en bassin de carène
- Tests en soufflerie
- Modélisation numérique du navire utilisant un système de propulsion vélique
- Réalisation d'une polaire de performance
- Réalisation d'un routage sur les lignes envisagées
- Tests à terre
- Tests en mer
- Utilisation de données de validation collectées lors de l'exploitation en mer
- Autre :

Si autre, précisez

.....

Dans quel ordre les étapes ont-elles été effectuées ?

	1	2	3	4	5	6	7	8
Collecte de données	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tests en bassin de carène	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tests en soufflerie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Modélisation numérique du navire utilisant un système de propulsion vélique	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Réalisation d'une polaire de performance	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Réalisation d'un routage sur les lignes envisagées	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tests à terre	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Tests en mer	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Utilisation de données de validation collectées lors de l'exploitation en mer

Vous a-t-on proposé un programme de travail ?

- Oui
 Non

Avez-vous participé à l'élaboration du programme en fonction des particularités de votre projet ? Avez-vous été conseillé dans ce choix ?

Paramétrage des données d'entrée et choix des modèles

Récolte des données

Partie hydrodynamique

Quelles données d'entrée sur le navire étaient disponibles pour cette étape ?

- Longueur, largeur et tirant d'eau du navire
 Courbes de résistance à l'avancement du navire
 Résultats de tests en bassin de carène
 General Arrangement
 Dossier technique de construction du navire
 Profil opérationnel du navire
 Etude CFD en dérive
 Carène en 3D
 Caractéristiques du ou des safrans
 Caractéristiques du ou des dérives
 Autre :

Si autre, précisez

.....

Qui a réalisé la collecte de données ?

.....

Le manque de disponibilité de données a-t-il contraint la démarche ? Si oui, pouvez-vous indiquer dans quelle mesure ?

.....

Les données utilisées ont-elles été imposées ? Si oui, par quelle partie ?

Evalueur

Fournisseur de données

Autre :

Quelles données vous semblent absolument essentielles à cette étape ?

.....

Des tests supplémentaires ont-ils dû être réalisés par manque de données ?

Tests en bassin de carène

Simulations numériques

CFD

Données de consommation du moteur

Essais en mer

Autre :

Si autre, précisez

.....

Était ce votre choix ou ont-ils été imposés ?

J'ai choisi de réaliser des tests supplémentaires

Les tests supplémentaires ont été imposés

Autre :

Quelles ont été les difficultés dans la réalisation des tests ?

.....

Avez-vous dû écarter des tests supplémentaires par manque de moyen ?

Oui

Non

Autre :

Partie aérodynamique

Quelles données d'entrée sur la partie aérodynamique étaient disponibles pour cette étape ?

Coefficients aérodynamiques

Résultats de test à terre

Résultats de test en soufflerie

Résultats de test en mer

Polaire de la voile

Position de la voile sur le navire

Résultats de test en CFD

Autre :

Si autre, précisez

.....

Qui a réalisé la collecte de données ?

.....

Le manque de disponibilité de données a-t-il contraint la démarche ? Si oui, pouvez-vous indiquer dans quelle mesure ?

.....

Les données utilisées ont-elles été imposées ? Si oui, par quelle partie ?

Évaluateur

Fournisseur de données

Autre :

Quelles données vous semblent absolument essentielles à cette étape ?

.....

Comment les coefficients aérodynamiques ont-ils été obtenus ?

.....

Des tests supplémentaires ont-ils dû être réalisés par manque de données ?

Tests en soufflerie

Simulations numériques

CFD

Essais à terre

Essais en mer

Autre :

Si autre, précisez

.....

Si des tests en soufflerie ont été réalisés, était-ce :

Un modèle 2D uniquement sur le profil

Un modèle 3D sur tout le propulseur

Autre :

Si autre, précisez

Si des tests en soufflerie ont été réalisés, quelle était la taille du modèle ? la vitesse du vent dans la soufflerie ?

Était ce votre choix ou ont-ils été imposés ?

- J'ai choisi de réaliser des tests supplémentaires
- Les tests supplémentaires ont été imposés

Quelles ont été les difficultés dans la réalisation des tests ?

Avez-vous dû écarter des tests supplémentaires par manque de moyen ?

- Oui
- Non

Choix des modèles

L'évaluation de la performance du système de propulsion vélique a-t-elle été réalisée en utilisant :

- Du calcul réglementaire type EEDI/EEXI (modèle de vent avec matrice IMO)
- Des statistiques de vent (voire houle) sur la route
- Autre : -----

Pourquoi avoir choisi ce type d'évaluation ?

Si vous avez travaillé avec un ou des fournisseur(s) d'outils de performance, le(s)quel(s) ?

.....

Pour quelle(s) raison(s) avez-vous choisi ce(s) fournisseur(s) ?

.....

Programme de prédiction des performances

Les modélisations ont-elles été menées sur la base de standards ? Si oui, lesquels ?

.....

Pourquoi avoir choisi ces standards ?

.....

Des paramètres ont-ils été ajoutés aux modèles ? Si oui, lesquels ?

.....

Pourquoi avoir ajouté des paramètres ?

.....

Quels ont été les effets pris en compte dans les modèles ?

- L'impact du système sur la résistance à l'avancement
- L'impact du système sur l'équilibrage du navire (gîte, assiette, dérive, angle de barre etc)
- L'impact du système sur la propulsion (variation du point de fonctionnement hélice et moteur)
- Autre :

Si autre, précisez

.....

Pourquoi ces effets ont-ils été pris en compte dans votre cas ? Pourquoi étaient ils importants dans les modélisations ?

.....

Y a-t-il d'autres effets pris en compte ? Lesquels ? Pourquoi ?

.....

Y a-t-il des effets que vous avez écartés du modèle ? Pour quelles raisons ?

.....

Y a-t-il des effets que vous auriez aimé prendre en compte mais que vous ne pouviez pas ? Si oui, lesquels ? Pourquoi vouliez-vous les prendre en compte ? Qu'est-ce qui vous a empêché de les prendre en compte ?

.....

Quels étaient selon vous les 3 ou 4 effets à prendre en compte absolument dans l'évaluation des performances pour le résultat que vous attendiez ? Pourquoi ?

.....

Pouvez-vous détailler la manière dont vous avez pris en compte l'impact du système sur le moteur thermique ?

.....

Y a-t-il d'autres effets ou des interactions [entre gréements et grément(s)-coque] pris en compte ? Si oui, lesquels ? Pourquoi ?

.....

Les performances aérodynamiques du système vélique ont-elles été couplées à des performances hydrodynamiques ? Si oui, de quelle manière ?

.....

Comment a été pris en compte l'automatisation des systèmes véliques ?

.....

Choix du routage

Quels sont les paramètres de l'environnement qui ont été pris en compte dans le routage ?

Etat de mer et vent

Vent seul

Courant

Autre :

Si autre, précisez

.....

Pourquoi avoir pris en compte ces paramètres ? Dans quelle mesure étaient-ils importants ?

.....

Comment ont-ils été pris en compte ?

.....

Combien de routages ont-ils été effectués ?

.....

Comment les économies de carburant ont-elles été calculées ?

.....

Résultats de l'évaluation de la performance

Vision de la performance

Qu'est-ce que la performance selon vous ?

L'OPEX

ROI

La réduction d'émissions de gaz à effet de serre

Autre :

Si autre, précisez

.....

Quels indicateurs utilisez-vous aujourd'hui pour exprimer la performance ?

.....

Selon vous, à cette étape, qui est le garant de la performance estimée ?

.....

Y a-t-il une contractualisation de cette garantie de performance ? Si ce n'est pas le cas, serait-ce intéressant à l'avenir ?

.....

Quelle serait selon vous la meilleure manière de contractualiser les objectifs de performance?

.....

Données de sortie et formatage

Quel a été le format du rendu ?

- Des données analytiques (chiffres bruts)
- Un rapport rédigé présentant la démarche
- Une classification
- Une comparaison entre des systèmes sur un critère
- Une comparaison entre des systèmes sur plusieurs critères indépendants pris séparément
- Une comparaison entre des systèmes sur plusieurs critères indépendants « mixés » pour un résultat unique
- Une comparaison entre des systèmes avec représentation graphique

Autre :

Si autre, précisez

.....

Le format a-t-il été satisfaisant selon vous? Si non, pourquoi?

.....

Auriez-vous préféré un autre type de format? Si oui, lequel? Avec quelles données ?

.....

Le niveau de précision des données était-il satisfaisant ? Si non, pourquoi ? Qu'auriez-vous préféré ?

.....

Avis global

La démarche utilisée pour évaluer la performance du système est-elle pertinente à votre avis ?

- Oui
- Non

Si oui, quels sont selon vous les points forts de la démarche ?

.....

Si non, pourquoi ? Qu'auriez-vous préféré ?

.....

Merci !

Merci d'avoir pris le temps de répondre à notre questionnaire.

Nous reviendrons vers vous lors d'un court entretien (30 à 45mn, selon vos disponibilités...) afin de comprendre au mieux vos attentes vis à vis des évaluations de performance et de détailler certaines de vos réponses.

Ce formulaire a été créé dans Association Wind Ship.

Google Forms

Annexe 2 – Compte-rendu de l’atelier NORVENT



Le projet NORVENT est réalisé avec le soutien financier de l’ADEME et de Bureau Veritas

Compte-rendu atelier collectif

[Projet NORVENT]

État de l’art des démarches de
prédiction de performance pour les
navires propulsés par le vent



Issue du réseau



Soutenue par



Résumé de l'atelier

Le projet NORVENT a pour objectif de réaliser un état des lieux des démarches utilisées pour évaluer les performances des systèmes de propulsion des navires par le vent et des besoins à l'origine de ces démarches. Il constitue la première étape d'une harmonisation des évaluations, afin de renforcer la confiance dans les résultats produits auprès des utilisateurs de ces services, un enjeu régulièrement relevé par les acteurs du secteur.

NORVENT, réalisé par l'association Wind Ship grâce au soutien de l'ADEME et de Bureau Véritas, s'appuie sur une collecte de données et une série d'entretiens menés auprès des utilisateurs des résultats de prédiction de performance. Une phase de bibliographie et un atelier collectif permettant de partager les résultats complètent ce travail qui doit aboutir à des recommandations formulées dans un rapport synthétique.

L'atelier collectif qui fait l'objet de ce compte-rendu a mobilisé 23 structures ayant répondu au questionnaire de la phase d'enquête afin de :

- Partager les résultats de l'enquête
- Discuter des conclusions de celle-ci
- Proposer des recommandations pour la suite de cette démarche

Il s'est déroulé le lundi 6 février 2023 de 13h à 18h à la Maison de la mer à Nantes. Il a regroupé 27 participants (voir Annexe 1) issus de 23 structures différentes : armateurs, affrêteurs, financeurs, motoristes, développeurs de technologies, architectes navals et concepteurs.

Trois objectifs étaient visés :

- a) Dégager une compréhension commune de « l'évaluation des performances »
- b) Catégoriser les besoins et qualifier les indicateurs pertinents et leur méthode d'obtention
- c) Identifier les bonnes pratiques et aboutir à des recommandations sur l'approfondissement de celles-ci dans le cadre de nouvelles actions R&D

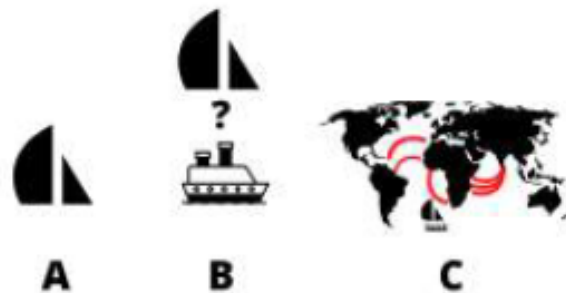
Afin de structurer la phase préalable d'enquête, l'équipe projet de Wind Ship, aidée par le groupe de travail technique mobilisé au sein de l'association, a proposé une catégorisation des besoins d'évaluation de performance :

- *Catégorie A* : Volonté de caractériser la performance d'un système vélique en général.
- *Catégorie B* : Volonté d'évaluer la pertinence du vélique pour décarboner une flotte

1

Compte-rendu de l'atelier collectif projet Norvent – Wind Ship – V0_21.02.2023

- / un navire seul sur une route générique (en retrofit ou newbuilt).
- **Catégorie C** : Volonté d'étudier comparativement des systèmes véliques et les configurations pour l'installation sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuilt)



- Une **catégorie D** a été ajoutée par la suite après avoir constaté un autre besoin pour des utilisateurs ayant des projets avec un niveau de maturité plus élevé : la volonté d'évaluer la performance d'un navire en opération par des essais en mer.

En complément de ces catégories, l'équipe projet a proposé de classer les besoins d'évaluations de performance en fonction du niveau de maturité des projets qui sont développés :

- **Étape 0** : Démonstration d'intention sur l'utilisation du vélique
- **Étape 1** : Preliminary Study
- **Étape 2** : Concept Design
- **Étape 3** : Phase de contractualisation
- **Étape 4** : Essai en sortie de chantier
- **Étape 5** : Mesures en opération lors de l'exploitation du navire

L'atelier a commencé par la présentation très synthétique des résultats issus du questionnaire en ligne et des entretiens (voir Annexe 2).

Puis deux sous-groupes de 16 personnes ont été constitués regroupant chacun une diversité de types de structures afin que les débats intègrent le plus de points de vue possibles pour converger vers une vision collective.

Afin de cibler les discussions lors de l'atelier de travail, l'équipe projet de Wind Ship, aidée par deux experts techniques volontaires pour guider les échanges techniques lors de cet atelier, a proposé d'examiner les croisements entre "catégorie de besoins des utilisateurs / maturité du projet" qui paraissent les plus récurrents dans l'utilisation des évaluations de performance.

- **Croisement n°1** : Performance du système vélique seul (Catégorie A / Niveau de maturité 0).
- **Croisement n°2** : Performances estimées dans le cadre des indicateurs imposés par la réglementation, type EEDI, CII, ... (Catégorie B / Niveau de maturité 0, 1 ou 2).

- *Croisement n°3* : Performances estimées lors de l'installation d'un système vélique sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuild) pour une route donnée (Catégorie C / Niveau de maturité 1, 2 ou 3).
- *Croisement n°4* : des essais en mer et en opération (Catégorie D / Niveau de maturité 4 et 5)

Pour chacun de ces 4 croisements, il a été proposé de travailler sur : (i) les indicateurs de performance associés à ces démarches (ii) les données utilisées pour les déterminer et leur méthode d'obtention et (iii) la qualité des résultats obtenus et leur niveau de garantie.

Les deux sous-groupes ont alors travaillé en 2X 45 min sur ces croisements, avec l'appui des 2 experts techniques pour guider les échanges puis un temps de restitution a permis aux rapporteurs de chaque groupe de synthétiser les résultats obtenus.

Quatre conclusions sont ressorties des discussions :

1- Il existe plusieurs notions de "performance"

NORVENT se concentre sur la "performance", mais celle-ci a donné lieu à plusieurs acceptions : pour certains participants, la performance intègre nécessairement une dimension économique, alors que pour d'autres, la discussion ne porte par moment que sur les résultats physiques atteints par l'objet concerné (le ou les gréements véliques ou le navire équipé). Enfin, pour certains acteurs, on pourrait sans doute parler de "performance réglementaire" pour se référer aux résultats des calculs réglementaires.

Il est désormais important de préciser en complément du terme de « performance » l'indicateur dont on parle (les économies de puissance, l'énergie délivrée par le système, la finesse etc.).

2- La performance va conserver encore longtemps son caractère prédictif mais il faut progresser sur l'évaluation des performances atteintes en opération

Dans la mesure où il n'existe encore que peu de navires équipés de systèmes véliques innovants, les évaluations de performance ont toutes un caractère prédictif, basé sur des simulations utilisant des outils numériques.

La distinction entre cette performance prédictive (qui est le cas aujourd'hui) et la performance qui sera constatée en opération semble claire pour tous les participants.

Cependant, la performance "constatée en opération" sera loin d'être facilement accessible car il n'existe pas de méthode qui permette d'équiper un navire de capteurs puis de déduire directement de mesures réalisées en mer cette performance en opération. D'autant plus que certains paramètres ne seront pas modélisables, tels que l'intervention de l'équipage sur les systèmes véliques. Il faut donc avancer dès aujourd'hui sur ce sujet complexe.

3- Foisonnement de cas autour des évaluations de performance

Les participants de l'atelier n'ont pas été tous d'accord avec les croisements retenus entre catégorie de besoin et niveau de maturité du projet. Au-delà des 4 croisements proposés pour guider les discussions, ce sont de multiples possibilités qui se présentent chaque jour aux évaluateurs de performance. A ce jour, chaque cas est traité de manière spécifique grâce à l'expérience de ces évaluateurs qui vont décider de prendre en compte ou non tel ou tel effet dans leur évaluation, et donc d'utiliser telle ou telle donnée avec tel niveau de précision.

Les catégories qui ont été identifiées ont bien du sens. De même, les niveaux de projet correspondent bien aux niveaux de maturité observés en réalité. Cependant, les catégories et les niveaux ont plus de croisements que ceux identifiés lors de cette session de travail. Par exemple, lorsqu'un acteur se situe dans la catégorie de besoin « système vélique seul » A, il était proposé de ne rester que dans de faibles niveaux de maturité de projet (un acteur est en train d'examiner en première approche les capacités de différents systèmes véliques pour guider un premier choix). Or dans cette même catégorie, un autre acteur peut être dans un niveau de maturité de projet élevé car il n'en est plus à l'intention mais à la contractualisation et le contrat engageant qu'il va signer va porter sur le système vélique seul.

Certains participants ont proposé de construire une grille détaillée de toutes les catégories et tous les niveaux de maturité de projets mais cette option n'a pas été retenue non plus car longue à mettre en œuvre et pas nécessairement plus adaptée.

Ainsi, Wind Ship a proposé de ne pas chercher à travailler sur une grille exhaustive des cas qui pourraient être rencontrés, mais de réfléchir d'une part sur les catégories qui représentent les usages possibles des évaluations de performance et d'autre part sur les méthodes utilisées pour prédire les performances en fonction du niveau de fiabilité attendu sur les résultats (niveau de fiabilité qui est en lien direct avec le niveau de maturité des projets).

4- "Il faut commencer à poser une méthode commune"

Les participants de l'atelier ont parlé du besoin de méthodes communes, de la nécessité de simplifier plutôt que de complexifier.

L'un des experts volontaires pour guider les discussions a expliqué son expérience en matière de développement d'un VPP collectif adopté dans le milieu de la course au large pour permettre de comparer des résultats : une démarche entamée il y a 40 ans et qui s'enrichit toujours grâce à la contribution de nombreux acteurs. Cet exemple pourrait

inspirer la dynamique actuelle autour de l'évaluation des performances des navires propulsés par le vent.

Au regard des résultats de cet atelier, les recommandations sont donc les suivantes :

Continuer le travail initié dans le cadre du projet NORVENT via la mobilisation d'un groupe de travail constitué d'acteurs du vélique à l'échelon français pour alimenter les démarches internationales [possibilité d'animation et mobilisation par Wind Ship et de réalisation de la mise en œuvre technique via un interlocuteur dédié].

- o A très court terme :
 - Organiser une à deux sessions de travail collectif avec le groupe de travail de l'ITTC pour contribuer activement à l'émergence d'une proposition sur les méthodes à utiliser en fonction de la fiabilité attendue de l'évaluation de performance et des effets physiques à considérer.
 - Formaliser une première grille de lecture commune autour des évaluations de performance en s'appuyant sur le travail déjà mené dans le cadre de NORVENT :
 - Quel est le besoin ?
 - Quel est le niveau de fiabilité attendu ?
 - Quels sont les effets physiques qu'on pourrait prendre en compte ?
 - o Aérodynamique :
 - Navire
 - Système vélique
 - o Hydrodynamique
 - o Interactions
 - Quels sont les modèles disponibles pour représenter ces effets ?
 - Quelles sont les données d'entrée nécessaires ?
- o A moyen terme :
 - Préciser cette grille de lecture en hiérarchisant pour chaque niveau de fiabilité les effets à prendre en compte, et en réalisant un parangonnage (ou benchmark) des modèles existants.
 - Proposer une standardisation de l'obtention des polaires de performance des systèmes véliques :
 - Conditions environnementales
 - Unités de mesure utilisées
 - Méthode : coefficients aérodynamiques obtenus en soufflerie ou via CFD ou via la littérature

Sommaire

Résumé de l'atelier	1
I. Introduction	8
II. Les objectifs de l'atelier	10
III. Le programme de l'atelier	11
IV. Premières réactions des participants suite à la présentation des objectifs	12
V. Présentation des résultats de l'enquête et des entretiens	13
VI. Formation des sous-groupes de travail et présentation des sujets de travail	15
VII. Synthèse des discussions dans les sous-groupes de travail	18
1- Conclusions d'ordre général	18
a) Les croisements proposés ne sont pas exhaustifs	18
b) Le besoin de transparence dans la méthode d'évaluation est identifié	18
2- Conclusions par catégories	19
a) Performance du système vélique seul	19
b) Performances estimées dans le cadre des indicateurs imposés par la réglementation, type EEDI	20
c) Performances estimées lors de l'installation d'un système vélique sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuilt) pour une route donnée	20
d) Performances atteintes sur les essais en mer et en opération	21
e) Témoignage de l'ADEME et de Bureau Veritas	22
VII. Conclusions et recommandations issues de l'atelier	23
IX. Atteinte des objectifs et intérêt de l'atelier	26
X. Annexe :	28
1- Annexe 1 - liste des participants	28
2- Annexe 2 – Support de présentation	29

I. Introduction

Le projet NORVENT a pour objectif de réaliser un état des lieux des démarches utilisées pour évaluer les performances des systèmes de propulsion des navires par le vent et des besoins à l'origine de ces démarches. Il constitue la première étape d'une harmonisation des évaluations, afin de renforcer la confiance dans les résultats produits auprès des utilisateurs de ces services, un enjeu régulièrement relevé par les acteurs du secteur.

NORVENT, réalisé par l'association Wind Ship grâce au soutien de l'ADEME et de Bureau Véritas, s'appuie sur une collecte de données et une série d'entretiens menés auprès des utilisateurs des résultats de prédiction de performance. Une phase de bibliographie et un atelier collectif permettant de partager les résultats complètent ce travail qui doit aboutir à des recommandations formulées dans un rapport synthétique.

Enfin, des échanges menés au niveau international avec l'institut SSPA qui intervient à la fois dans le cadre du projet Interreg Mer du Nord WASP et en tant que coordinateur du comité spécifique « propulsion par le vent » de l'International Towing Tank Conference (ITTC) ont permis de comparer le travail mené par SSPA auprès d'autres acteurs sur les indicateurs clés de performance et sur les procédures d'essais en mer.

L'atelier collectif qui fait l'objet de ce compte-rendu a mobilisé 23 structures ayant répondu au questionnaire de la phase d'enquête afin de :

- 1- Partager les résultats de l'enquête
- 2- Discuter des conclusions de celle-ci
- 3- Proposer des recommandations pour la suite de cette démarche

Il s'est déroulé le lundi 6 février 2023 de 13h à 18h à la Maison de la mer à Nantes. Il a regroupé 27 participants issus de 23 structures dont la liste est présentée en annexe et la typologie est la suivante :

Utilisateur / fournisseur	Type d'activité principale	Activité secondaire	Structure
Utilisateur d'évaluation de performance	Architecte naval / concepteur		1
	Armateur		3
	Equipementier		6
	Chantier naval	Bureau d'étude	1
	Financier		2

Utilisateur / fournisseur	Type d'activité principale	Activité secondaire	Structure
	Société de classification		1
Fournisseur de données et/ou d'évaluation de performances	Fournisseur d'outils numériques ou d'évaluations de performance		4
	Architecte naval / concepteur		2
	Bassin de carène		1
	Soufflerie		2
		Total	23 structures

Tableau 1 - structures participantes à l'atelier collectif NORVENT



Image 1 - atelier collectif NORVENT

II. Les objectifs de l'atelier

Une première phase d'enquête via un questionnaire préparé par Wind Ship avec l'aide de son groupe de travail technique, puis une série d'entretiens ont montré le besoin de vulgarisation, formalisation, et de partage des démarches de prédiction de performance, et l'ensemble des notions associées. Ce travail a permis de visualiser de manière concrète les problématiques qui sont au cœur des évaluations de performance et d'orienter les discussions sur la définition de la performance et des indicateurs pour la décrire.

D'autre part, les discussions de Wind Ship avec SSPA ont également permis de guider les objectifs de l'atelier. En amont de l'atelier, ont été partagés aux participants les premiers résultats de ces travaux menés à l'international : un dossier sur les indicateurs de performance, et un second sur des procédures d'essais en mer.

Wind Ship a décidé de ne pas traiter la question des essais en mer lors de l'atelier. En effet, il n'existe actuellement pas beaucoup de retours d'expérience sur les navires en opération, et les participants n'auraient pas pu se référer à des exemples concrets. L'équipe projet de Wind Ship a donc décidé de se concentrer sur les indicateurs de performance.

Les 3 objectifs proposés pour l'atelier ont finalement été les suivants :

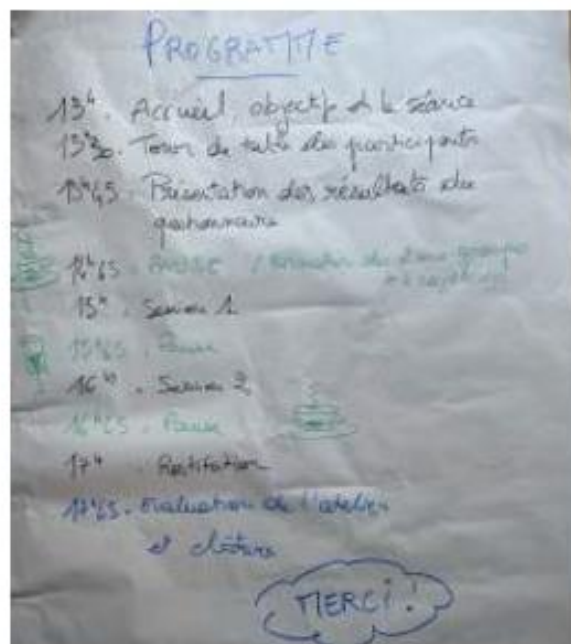
- 1- Dégager une compréhension commune de l'«évaluation des performances»
- 2- Catégoriser les besoins et qualifier les indicateurs pertinents et leur méthode d'obtention
- 3- Identifier les bonnes pratiques potentielles et aboutir à des recommandations sur l'approfondissement de celles-ci dans le cadre de nouvelles actions R&D



III. Le programme de l'atelier

Le programme proposé a été le suivant :

- 13h : accueil et présentation des objectifs de la séance
- 13h30 : Tour de table des participants
- 13h45 : Présentation des résultats du questionnaire
 - Structure du questionnaire
 - Définitions importantes
 - Présentation des catégories de besoin
 - Présentation des niveaux de maturité de projet et la fiabilité des résultats
 - Comparaison avec les démarches en cours dans d'autres cercles de réflexion (projet interreg Mer du Nord WASP notamment)
 - Présentation de la démarche de prédiction de performance
- 14h45 : Pause, formation des deux sous-groupes et nomination de rapporteurs pour les ateliers
- 15h : Session 1, groupe de travail sur les deux premières catégories A et B
- 15h45 : Pause
- 16h : Session 2, groupe de travail sur les deux dernières catégories C et D
- 16h45 : Pause
- 17h : Restitution et évaluation du succès des objectifs



IV. Premières réactions des participants suite à la présentation des objectifs

Suite à l'introduction de l'atelier par Lise Detrimont et Marine Rialan, les participants ont validé les objectifs de l'atelier et souligné l'importance du sujet.

Certains participants ont noté qu'il est important de considérer l'ensemble du système énergétique du navire, et pas simplement le système vélique. En effet, la plupart des navires de demain seront hybrides. Leur système énergétique constitue un seul et même système propulsif qui peut être constitué de différentes briques (moteur thermique, moteur éolien...). L'ensemble de ces briques doit donc être pris en compte afin d'optimiser le rendement propulsif. L'atelier préparé ne concerne que le système vélique, mais la remarque est importante : il faudra en effet très rapidement considérer l'ensemble du système propulsif du navire.

Deux autres questions ont rapidement émergé parmi l'audience :

- Quel lien avec les démarches internationales ?
- Est-ce que l'objectif final est d'aider à produire une proposition de norme ?

L'équipe de Wind Ship a précisé que le projet NORVENT n'a pas pour objectif de produire directement une norme mais des recommandations pour que la communauté maritime vélique progresse dans la mise en place d'une harmonisation (à terme, standardisation ?) des évaluations de performance et que les utilisateurs s'y retrouvent.

Les échanges avec l'équipe mobilisée au sein du SSPA dans le cadre du projet WASP interreg Mer du Nord et de l'ITTC ont été rappelés aux participants.

A terme, NORVENT participe à consolider une appréhension commune du sujet « évaluations de performances » puis à faire émerger des propositions qui alimenteront directement (via l'IWSA) et indirectement (via les échanges avec les projets internationaux) de futures normes qui pourraient être proposée à l'OMI ou au sein d'autres instances prescriptives.

V. Présentation des résultats de l'enquête et des entretiens

Marine Rialan a ensuite présenté de manière très synthétique les résultats de l'enquête et des entretiens (voir Annexe 2).

Une grande diversité a été constatée dans la typologie des répondants : (i) des utilisateurs d'évaluation de performance [5 armateurs, 1 affréteur/chargeur, 2 financeurs/investisseurs, 6 équipementiers, 6 architectes naval/concepteurs, 1 société de classification, 5 Bureaux d'Études et 1 motoriste] et (ii) des fournisseurs de données d'entrée ou d'évaluations de performance [5 fournisseurs d'outil numérique, 1 bassin de carène, 2 souffleries]. Cette diversité a contribué à enrichir les analyses en matière d'attentes et de besoins des acteurs.

Un des premiers objectifs du projet est d'engager le dialogue avec les parties prenantes afin d'aboutir à une compréhension commune sur le sujet. Pour commencer à travailler, il s'est révélé nécessaire de s'attarder sur certains termes car ils ne recouvraient pas systématiquement les mêmes contenus pour tous les acteurs. Wind Ship a indiqué aux participants qu'il convient de préciser lorsqu'ils utilisent certains concepts qui peuvent porter à confusion, ou dont la définition est subjective. Ce fut le cas pour la performance (de quelle performance parle-t-on ? Avec quel indicateur pour la représenter) ou la polaire (de quelle polaire parle-t-on ? De celle du navire ? Du système vélique ?). Pour fluidifier les échanges, il a été demandé de porter une attention particulière sur ces termes, et de les développer lorsqu'un participant les utilise à l'oral.

Lorsque la question de l'utilisation de la propulsion par le vent se pose, plusieurs étapes existent : d'abord connaître les caractéristiques de la technologie envisagée, ensuite estimer son adéquation avec la flotte visée avant d'étudier en détail une implantation possible sur un ou plusieurs navires. Suivant le cas de figure étudié par l'utilisateur de l'évaluation de performance, la structuration des données peut changer drastiquement. Afin de clarifier le travail, il a été proposé de lister les catégories de besoin ainsi que les grandes étapes d'un projet, allant de la démonstration d'intention d'utiliser une propulsion vélique jusqu'à l'exploitation d'un navire, comme développé dans le résumé du document, et rappelé dans les chapitres suivants. Globalement, les évaluations de performances ont été utilisées quasiment à part égale pour les 3 catégories citées - avec cependant une prédominance pour les évaluations en catégorie A. Près des 2/3 des utilisateurs se trouvent dans des étapes préliminaires de projet : étape 0, 1, ou 2. Cela s'explique par le peu de navires en opération actuellement, et un foisonnement de projets dans des niveaux de maturité peu élevés.

Suite à l'analyse des réponses au questionnaire et lors des entretiens, quatre constats ressortent :

- La définition de performance n'est pas encore claire
Les définitions de performance des navires propulsés par le vent sont subjectives et parfois un peu confuses.
- Deux notions différentes sont relevées par certains acteurs lors des entretiens : la notion de performance prédite/prédictive théorique versus la notion de performance opérationnelle, dépendante de nombreux facteurs liés à l'exploitation du navire (environnement mais aussi équipage).
- Une nécessité de renforcer la confiance entre les différents acteurs : la démarche globale de prédiction de performance paraît claire dans l'esprit de la plupart des répondants, mais la manière dont on la mesure/quantifie, alimente en données les modèles, et restitue les données en sortie est plus floue.
- Un besoin de standards publiés : un nombre important d'acteurs ont mis en lumière la nécessité d'avoir des guidelines/standards publiés (de type ITTC, et complétés éventuellement par de la certification de classe ...) qui permettent de guider chaque soufflerie, bassin, Bureau d'Étude faisant des calculs numériques CFD, des essais

VI. Formation des sous-groupes de travail et présentation des sujets de travail

Deux sous-groupes de 16 personnes ont été constitués regroupant chacun une diversité de types de structures afin que les débats intègrent le plus de points de vue possibles pour converger vers une vision collective.

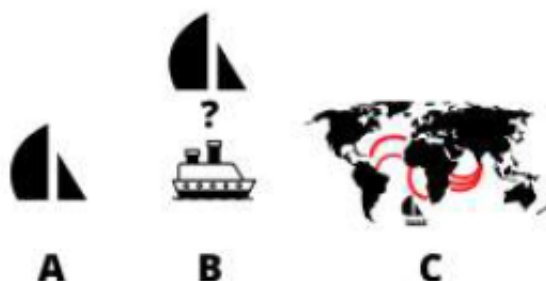
Dans chaque sous-groupe, un animateur Wind Ship était chargé de l'animation globale (Lise Detrimont pour un groupe, Marine Rialan pour l'autre) et un expert technique guidait les échanges. Deux experts techniques se sont portés volontaires : François Rongère de D-ICE Engineering et Philippe Pallu du Crain Technologies.

Des rapporteurs ont été chargés de restituer les discussions qui ont été menées dans les deux sous-groupes respectifs :

- Groupe A : Adrien Simonet (Neoline) et Jérôme Védrenne (CRAIN Technologies)
- Groupe B: Thibault Tincelin (Stirling Design International)

Afin de structurer la phase préalable d'enquête, l'équipe projet de Wind Ship, aidée par le groupe de travail technique mobilisé au sein de l'association, a proposé une catégorisation des besoins d'évaluation de performance :

- *Catégorie A* : Volonté de caractériser la performance d'un système vélique en général.
- *Catégorie B* : Volonté d'évaluer la pertinence du vélique pour décarboner une flotte / un navire seul sur une route générique (en retrofit ou newbuilt).
- *Catégorie C* : Volonté d'étudier comparativement des systèmes véliques et les configurations pour l'installation sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuilt)



- Une *catégorie D* a été ajoutée par la suite après avoir constaté un autre besoin pour des utilisateurs ayant des projets avec un niveau de maturité plus élevé : la volonté d'évaluer la performance d'un navire en opération par des essais en mer.

En complément de ces catégories, l'équipe projet a proposé de classer les besoins d'évaluations de performance en fonction du niveau de maturité des projets qui sont développés :

- *Étape 0* : Première intention sur l'utilisation du vélique. Le porteur de projet souhaite évaluer ce que peut apporter dans l'absolu un système vélique particulier, ou évaluer si "le vélique" de manière générale est intéressant pour décarboner sa flotte ou son navire.
- *Étape 1* : Preliminary Study. Cette étape correspond à un avant-projet préliminaire pendant une phase de "dérisking".
- *Étape 2* : Concept Design. Un document permet d'interroger des systémiers ou des chantiers afin d'avoir une spécification technique et une cotation. Des plans détaillés sont disponibles.
- *Étape 3* : Phase de contractualisation. Un plan de financement plus détaillé est nécessaire à ce stade, car les parties s'engagent sur une réduction des coûts / émissions de GES.
- *Étape 4* : Essai en sortie de chantier. Ces essais sont réalisés selon les conditions de vent et de mer disponibles et les normes en vigueur.
- *Étape 5* : Mesures en opération lors de l'exploitation du navire. Ces mesures se réalisent à long terme, dans l'ensemble des conditions de vent et de mer. Elles permettent l'acquisition de données pour valider les polaires de performance.

Afin de cibler les discussions lors de l'atelier de travail, l'équipe projet de Wind Ship, aidée par deux experts techniques volontaires pour guider les échanges techniques lors de cet atelier, a proposé d'examiner les croisements entre "catégorie de besoins des utilisateurs / maturité du projet" qui paraissaient les plus récurrents dans l'utilisation des évaluations de performance.

- *Croisement n°1* : Performance du système vélique seul (Catégorie A / Niveau de maturité 0).
- *Croisement n°2* : Performances estimées dans le cadre des indicateurs imposés par la réglementation, type EEDI, CII, ... (Catégorie B / Niveau de maturité 0, 1 ou 2).
- *Croisement n°3* : Performances estimées lors de l'installation d'un système vélique sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuild) pour une route donnée (Catégorie C / Niveau de maturité 1, 2 ou 3).
- *Croisement n°4* : des essais en mer et en opération (Catégorie D / Niveau de maturité 4 et 5)

Pour chacun de ces 4 croisements, il a été proposé de travailler sur : (i) les indicateurs de performance associés à ces démarches (ii) les données utilisées pour les déterminer et leur méthode d'obtention et (iii) la qualité des résultats obtenus et leur niveau de garantie.

Les deux sous-groupes ont alors travaillé en 2X 45 min sur ces croisements, avec l'appui des 2 experts techniques pour guider les échanges puis un temps de restitution a permis aux rapporteurs de chaque groupe de synthétiser les résultats obtenus.

VII. Synthèse des discussions dans les sous-groupes de travail

1- Conclusions d'ordre général

a) Les croisements proposés ne sont pas exhaustifs

Le groupe A a conclu qu'il n'y a pas de corrélation directe entre catégorie et niveau de maturité du projet. Dans chaque catégorie, on peut retrouver tous les niveaux de maturité de projet.

Ainsi, les croisements proposés lors de cet atelier ne sont pas exhaustifs et ne reflètent qu'une partie de cas rencontrés.

Ce constat est partagé par le groupe B. Par exemple, dans la catégorie A, le niveau 4 « contractualisation » existe pour les armateurs qui vont demander des garanties sur les performances du système vélique seul.

b) Le besoin de transparence dans la méthode d'évaluation est identifié

Le groupe A a jugé nécessaire de caractériser et lister l'ensemble des effets physiques en jeu dans les modèles et les hiérarchiser.

Les participants estiment qu'il y a un besoin concret de décrire correctement chaque effet physique qui peut être pris en compte dans le modèle numérique global du navire propulsé par le vent. Pour chaque cas (catégorie de besoin/niveau de maturité du projet), il faut alors préciser quel effet a été pris en compte et de quelle manière il a été modélisé. Cette démarche doit être suivie selon l'étape du projet et le raffinement de l'étude.

Le groupe B a également partagé ce constat. Il existe aujourd'hui des méthodes qui font consensus, par exemple pour calculer les coefficients aérodynamiques ou les coefficients hydrodynamiques. Il convient de les formaliser.

La problématique n'est pas tant sur les métriques, mais sur les méthodes pour les obtenir et leur degré de précision. Les questions qu'il convient de se poser sont :

- Quel type de méthode est utilisée ?
- Pour quel degré de précision ?

Pour chaque catégorie, il convient de lister les méthodes utilisées pour obtenir les métriques, et leur niveau de fiabilité. Les participants pensent à une hiérarchie du niveau d'erreur suivant la méthode utilisée.

2- Conclusions par catégories

a) Performance du système vélique seul

Il s'agit du croisement n°1 : Catégorie A / Niveau de maturité 0.

Le groupe A s'accorde sur la nécessité d'une homogénéité de pratique en termes de polaire de système vélique.

Pour ce groupe, la problématique ne réside pas dans les indicateurs, mais dans la manière de les obtenir. Il serait intéressant de construire une matrice de décision en fonction des attentes des décideurs, avec les caractéristiques à prendre en compte dans un système vélique pour différents cas, et commune à l'ensemble des équipementiers. Il conviendra au préalable de s'accorder sur des caractéristiques essentielles à prendre en compte pour un décideur.

Cette catégorie peut regrouper plusieurs attentes suivant l'acteur, par exemple :

- Pour l'équipementier, faire certifier son système ou vendre une technologie à un armateur
- Pour l'armateur, comparer des solutions

Il pourrait être intéressant pour les armateurs d'avoir des données fournisseurs sous forme de matrices de force en longitudinal et transversal indépendantes des matrices de vent réel ou de vent apparent.

Le groupe B s'accorde sur la nécessité de créer une méthode commune pour obtenir une polaire par unité de technologie. Cette méthode serait commune à tous les équipementiers et adaptée aux besoins de l'armateur. Celui-ci peut alors utiliser la ressource en vent sur la route qu'il va emprunter, et peut benchmarker les technologies qui sont le plus adaptées.

Pour cette catégorie, le groupe B n'a pas parlé de « performance » mais de « caractérisation de l'équipement ». Pour ce groupe, on ne peut pas parler d'indicateurs de performance mais de caractéristiques de l'équipement qui ne permettent pas de donner la performance du système. Comme pour l'éolien en mer, il pourrait y avoir trois informations fondamentales sur le système vélique :

- Les matrices de force (torseur de forces appliqués par la technologie sur le navire)
- La durée de vie de la technologie
- Des informations sur le vent maximal acceptable (les limites opérationnelles du système)

Concernant les indicateurs, on peut travailler sur les notions de CAPEX et OPEX (informations sur le coût du système disponibles) mais pas encore sur le ROI, car il n'est pas possible à ce stade de calculer de gain en fuel sans une route donnée.

b) Performances estimées dans le cadre des indicateurs imposés par la réglementation, type EEDI

Il s'agit du croisement n°1 : Catégorie B / Niveau de maturité 0, 1 et 2.

Pour le groupe A, cette catégorie nécessite une vraie méthode pour calculer les économies d'énergie avec un VPP qu'on intègre sous forme de coefficients aérodynamiques et hydrodynamiques afin d'équilibrer l'ensemble.

Pour le croisement n°2, il convient d'avoir des premières informations pour travailler sur le CII (qui n'apparaissait que pour le croisement n°3 dans l'exposé).

Le groupe A s'accorde de nouveau sur la nécessité d'une méthode pour obtenir non plus une polaire de l'unité de technologie vélique, mais sur le système vélique dans son ensemble (rajout de l'interaction entre les unités véliques entre elles, et avec le navire).

Pour ce groupe, le CII est le critère prioritaire pour les armateurs aujourd'hui.

L'EEDI n'est pas très compliqué à obtenir, alors que le CII est plus contraignant. La projection dans le temps du CII est un vrai sujet important au niveau réglementaire. Il y a un manque de précisions sur l'explication de la méthode et les référentiels utilisés. Lorsqu'une étude est faite, il est difficile de l'analyser car la méthode utilisée est floue, en utilisant des référentiels qui varient à chaque fois.

Pour le groupe B, l'EEDI a le mérite d'exister, et est dans tous les cas, incontournable pour les armateurs. C'est un bon outil de projection mais partiel et imparfait donc perfectible.

Le groupe confirme que le CII a bien sa place dans cette catégorie.

Le ROI a également sa place dans cette catégorie. On peut parler ici en termes de puissance propulsive (kW propulsifs).

Concernant la matrice de vent de l'OMI, les participants ne connaissent pas les routes en détail et ne peuvent pas ajouter d'autres éléments (houle...). C'est une contrainte. Cependant, le projet WISP étudie la matrice OMI pour proposer un routage statistique plutôt que prendre cette matrice OMI.

c) Performances estimées lors de l'installation d'un système vélique sur une flotte / un navire (en retrofit ou newbuilt) pour une route donnée

Il s'agit du croisement n°3 : Catégorie C / Niveau de maturité 0,1, 2, 3 et 4.

Pour le groupe A, il convient de définir une méthode de routage de référence pertinente. Plusieurs idées émergent :

- ⇒ Se baser sur une orthodromie (navire moteur seul) ?
- ⇒ Faire un routage adapté en faisant varier la vitesse ?
- ⇒ Faire un routage avec un navire sous voile qui ne modifie pas sa route pour comparer le gain du routage par rapport à un navire réellement routé ?

Il n'y a pas non plus d'accord sur le nombre de routes à prendre en compte, pour le nombre d'années de données météorologiques.

Un problème identifié est la résistance à la houle, que ce soit pour la partie aérodynamique comme hydrodynamique (la polaire de la voile modifiée sur houle et la résistance ajoutée de la carène sur houle). Des essais en bassin et en soufflerie peuvent permettre de définir des polaires définies dans la houle (qui sont difficiles à obtenir en CFD). Il existe un triptyque entre essais en bassin ; essais en mer et modèles numériques. Ils s'enrichissent mutuellement et ne sont pas efficaces l'un sans l'autre. Ainsi, il est important de créer de nouveaux référentiels pour les tests, afin de les confronter aux modèles mathématiques existants. Cependant, on ne peut les imposer car ils sont coûteux.

Il y a une nécessité de connaître les degrés d'influence des paramètres et de connaître les limites des différents outils.

L'architecte naval doit avoir accès à ces méthodes car il a une démarche itérative dans la conception du navire avec cette polaire (optimisation de la taille des soutes, de la carène). A chaque changement de design, vient une nouvelle étude de performance.

Le groupe B, quant à lui, a plutôt abordé cette catégorie sous l'angle de la contractualisation. A cette étape, il est possible de réaliser les calculs pour obtenir le ROI. Le groupe note que les performances et critères sont différents selon les contrats et les acteurs : affréteur, chantier, armateur...

d) Performances atteintes sur les essais en mer et en opération

Il s'agit du croisement n°4 : Catégorie D / Niveau de maturité 0,1,2,3,4 et 5.

La garantie de performance des systèmes n'est pas mesurable pendant les essais mer tels que faits actuellement selon la réglementation. Les essais mer traditionnels sont faits par temps calme, mer plate, et sans vent, ce qui obère directement les apports de la propulsion vélique. Il serait réducteur de tester les équipements véliques dans ces conditions.

De plus, ces essais sont faits sur une période donnée, sur quelle base peut-on les normer? Il n'existe pas de document écrit aujourd'hui sur lequel on peut se baser pour réaliser les tests, et faire une comparaison.

Les deux groupes s'accordent sur la nécessité de séparer les efforts qui s'appliquent sur le gréement des efforts qui s'appliquent sur le reste du navire parce qu'il y a trop de paramètres en jeu.

Le groupe A met en lumière l'importance d'avoir des aménagements contractuels qui donnent du temps pour tester les performances de l'ensemble.

Les participants mettent en lumière un double besoin :

- Un jumeau numérique avec des méthodes fiables et
- Des validations en essai mer pour recalibrer les jumeaux numériques

Les deux sont indispensables et indissociables.

La procédure d'essai mer proposée par la SSPA est, aux yeux des participants, encore trop compliquée dans la mise en œuvre et l'analyse des résultats.

Une des solutions serait de mettre des capteurs sur le navire et rejouer les scénarios météorologiques qui ont eu lieu en réalité pour analyser les réactions du navire et du gréement.

Certains participants ont posé la question de la réelle faisabilité par les armateurs de cette proposition.

e) Témoignage de l'ADEME et de Bureau Veritas

Philippe Cauneau, représentant de l'ADEME, a réagi à la fin de l'atelier. Monsieur Cauneau a rappelé que le sujet des évaluations de performance est certes complexe mais primordial aujourd'hui. Il a été agréablement impressionné de voir que la filière est constituée d'entreprises capables de discuter malgré une concurrence forte, c'est un signe de maturité. Les échanges doivent continuer en ce sens pour améliorer la transparence et la fiabilité de ces démarches, et l'ADEME s'engage à aller dans ce sens en poursuivant ces efforts pour l'aider. Enfin, Monsieur Cauneau a souligné l'importance de ne pas laisser de technologies de côté dans ce travail.

Aude Leblanc s'est exprimée pour le Bureau Veritas, a partagé l'avis de Monsieur Cauneau sur l'importance du sujet, et la poursuite des discussions dans un cadre collectif – d'autant que l'association internationale des sociétés de classification commence à son tour à s'intéresser à ce sujet, et qu'il faudra être prêt, en France, à présenter des éléments concrets et consolider, pour marquer la position des technologies françaises.

VII. Conclusions et recommandations issues de l'atelier

Quatre conclusions sont ressorties des discussions :

1. Il existe plusieurs notions de "performance"

NORVENT se concentre sur la "performance", mais celle-ci a donné lieu à plusieurs acceptions : pour certains participants, la performance intègre nécessairement une dimension économique, alors que pour d'autres, la discussion ne porte par moment que sur les résultats physiques atteints par l'objet concerné (le ou les gréements véliques ou le navire équipé). Enfin, pour certains acteurs, on pourrait sans doute parler de "performance réglementaire" pour se référer aux résultats des calculs réglementaires.

Il est désormais important de préciser en complément du terme de « performance » l'indicateur dont on parle (les économies de puissance, l'énergie délivrée par le système, la finesse etc.).

2. La performance va conserver encore longtemps son caractère prédictif mais il faut progresser sur l'évaluation des performances atteintes en opération

Dans la mesure où il n'existe encore que peu de navires équipés de systèmes véliques innovants, les évaluations de performance ont toutes un caractère prédictif, basé sur des simulations utilisant des outils numériques.

La distinction entre cette performance prédictive (qui est le cas aujourd'hui) et la performance qui sera constatée en opération semble claire pour tous les participants.

Cependant, la performance "constatée en opération" sera loin d'être facilement accessible car il n'existe pas de méthode qui permette d'équiper un navire de capteurs puis de déduire directement de mesures réalisées en mer cette performance en opération. D'autant plus que certains paramètres ne seront pas modélisables, tels que l'intervention de l'équipage sur les systèmes véliques. Il faut donc avancer dès aujourd'hui sur ce sujet complexe.

3. Foisonnement de cas autour des évaluations de performance

Les participants de l'atelier n'ont pas été tous d'accord avec les croisements retenus entre catégorie de besoin et niveau de maturité du projet. Au-delà des 4 croisements proposés pour guider les discussions, ce sont de multiples possibilités qui se présentent chaque jour aux évaluateurs de performance. A ce jour, chaque cas est traité de manière spécifique grâce à l'expérience de ces évaluateurs qui vont décider de prendre en compte ou non tel

ou tel effet dans leur évaluation, et donc d'utiliser telle ou telle donnée avec tel niveau de précision.

Les catégories qui ont été identifiées ont bien du sens. De même, les niveaux de projet correspondent bien aux niveaux de maturité observés en réalité. Cependant, les catégories et les niveaux ont plus de croisements que ceux identifiés lors de cette session de travail. Par exemple, lorsqu'un acteur se situe dans la catégorie de besoin « système vélique seul » A, il était proposé de ne rester que dans de faibles niveaux de maturité de projet (un acteur est en train d'examiner en première approche les capacités de différents systèmes véliques pour guider un premier choix). Or dans cette même catégorie, un autre acteur peut être dans un niveau de maturité de projet élevé car il n'en est plus à l'intention mais à la contractualisation et le contrat engageant qu'il va signer va porter sur le système vélique seul.

Certains participants ont proposé de construire une grille détaillée de toutes les catégories et tous les niveaux de maturité de projets mais cette option n'a pas été retenue non plus car longue à mettre en œuvre et pas nécessairement plus adaptée.

Ainsi, Wind Ship a proposé de ne pas chercher à travailler sur une grille exhaustive des cas qui pourraient être rencontrés, mais de réfléchir d'une part sur les catégories qui représentent les usages possibles des évaluations de performance et d'autre part sur les méthodes utilisées pour prédire les performances en fonction du niveau de fiabilité attendu sur les résultats (niveau de fiabilité qui est en lien direct avec le niveau de maturité des projets).

4. "Il faut commencer à poser une méthode commune"

Les participants de l'atelier ont parlé du besoin de méthodes communes, de la nécessité de simplifier plutôt que de complexifier.

L'un des experts volontaires pour guider les discussions a expliqué son expérience en matière de développement d'un VPP collectif adopté dans le milieu de la course au large pour permettre de comparer des résultats : une démarche entamée il y a 40 ans et qui s'enrichit toujours grâce à la contribution de nombreux acteurs. Cet exemple pourrait inspirer la dynamique actuelle autour de l'évaluation des performances des navires propulsés par le vent.

Au regard des résultats de cet atelier, les recommandations sont donc les suivantes :

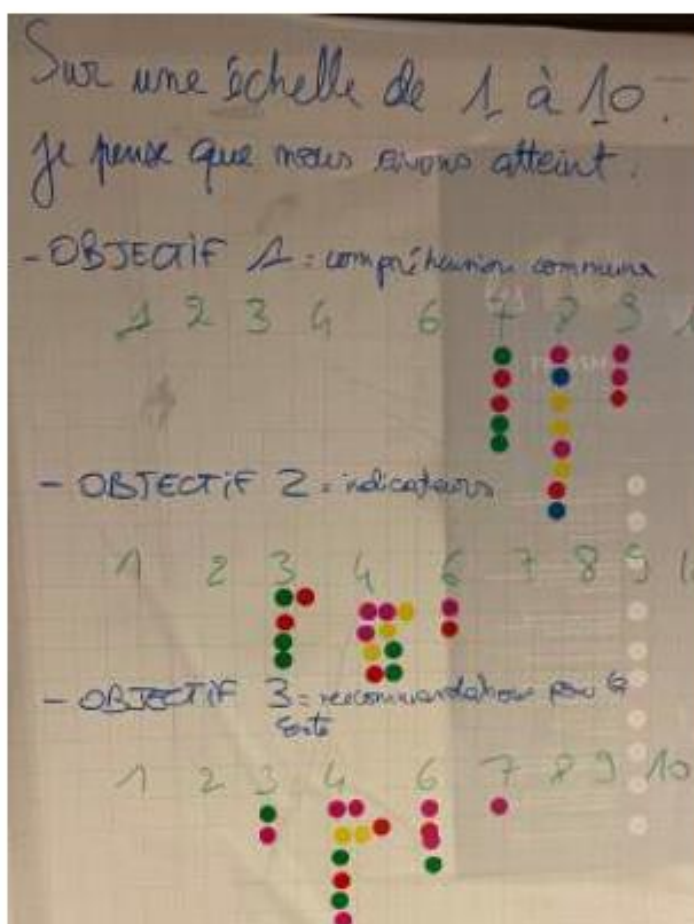
Continuer le travail initié dans le cadre du projet NORVENT via la mobilisation d'un groupe de travail constitué d'acteurs du vélique à l'échelon français pour alimenter les démarches internationales [possibilité d'animation et mobilisation par Wind Ship et de réalisation de la mise en œuvre technique via un interlocuteur dédié].

- A très court terme :
 - Organiser une à deux sessions de travail collectif avec le groupe de travail de l'ITTC pour contribuer activement à l'émergence d'une proposition sur les méthodes à utiliser en fonction de la fiabilité attendue de l'évaluation de performance et des effets physiques à considérer.
 - Formaliser une première grille de lecture commune autour des évaluations de performance en s'appuyant sur le travail déjà mené dans le cadre de NORVENT :
 - Quel est le besoin ?
 - Quel est le niveau de fiabilité attendu ?
 - Quels sont les effets physiques qu'on pourrait prendre en compte ?
 - Aérodynamique :
 - Navire
 - Système vélique
 - Hydrodynamique
 - Interactions
 - Quels sont les modèles disponibles pour représenter ces effets ?
 - Quelles sont les données d'entrée nécessaires ?
- A moyen terme :
 - Préciser cette grille de lecture en hiérarchisant pour chaque niveau de fiabilité les effets à prendre en compte, et en réalisant un parangonnage (ou benchmark) des modèles existants.
 - Proposer une standardisation de l'obtention des polaires de performance des systèmes véliques :
 - Conditions environnementales
 - Unités de mesure utilisées
 - Méthode : coefficients aérodynamiques obtenus en soufflerie ou via CFD ou via la littérature
 - _
 - Proposer de premières règles sur la mesure en mer et l'utilisation de ces résultats pour évaluer la performance.

IX. Atteinte des objectifs et intérêt de l'atelier

Wind Ship a proposé aux participants d'évaluer la réussite de chaque objectif sur une échelle de 1 à 10. Les moyennes obtenues ont été :

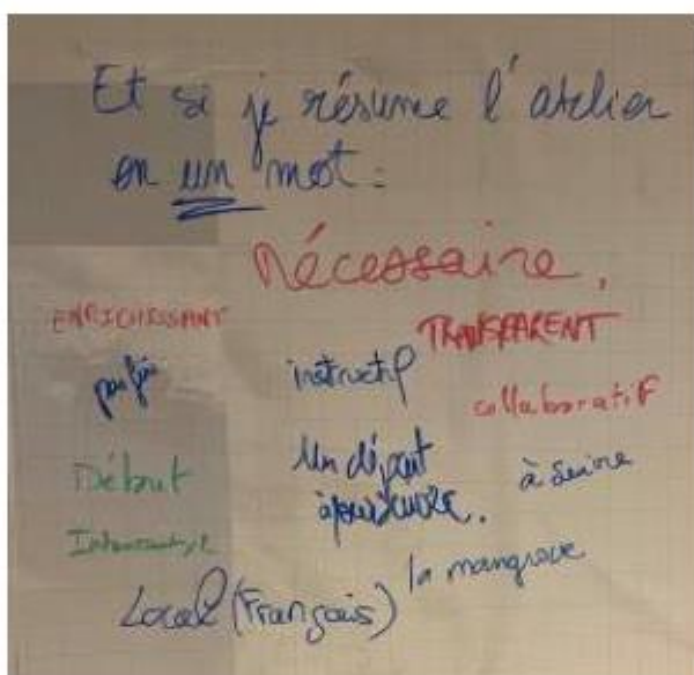
- Objectif 1 : Dégager une compréhension commune de l'"évaluation des performances"
Moyenne de 7.9/10
- Objectif 2 : Catégoriser les besoins et qualifier les indicateurs pertinents et leur méthode d'obtention
Moyenne de 3.9/10
- Objectif 3 : Identifier les bonnes pratiques potentielles et aboutir à des recommandations sur l'approfondissement de celles-ci dans le cadre de nouvelles actions R&D
Moyenne de 4.6/10



L'objectif 1 a été globalement atteint. Cependant, l'atelier a mis en valeur la difficulté de s'accorder sur les objectifs 2 et 3. Un long travail reste à réaliser pour mettre en place une vision et une méthode commune.

En second lieu, nous avons demandé aux participants de qualifier l'atelier en un mot. Les mots qui sont ressortis ont été :

- Nécessaire
- Enrichissant
- Transparent
- Instructif
- Collaboratif
- Local
- Intéressant (2)
- Pas fini
- Début
- Un départ à poursuivre



Les participants qui se sont exprimés ont trouvé l'atelier intéressant. Ils ont apprécié les échanges qui se sont déroulés dans la confiance (« transparent » ; « collaboratif »). Le sujet est qualifié de « priorité », mais la filière n'est qu'au début d'une démarche complexe et qui durera dans le temps (« pas fini » ; « début » ; « un départ à poursuivre »).

Par ailleurs, les participants sont intéressés par une démarche s'inscrivant dans les dynamiques internationales ("local")

Enfin, les participants sont enclins à poursuivre ces échanges.

X. Annexe :

1- Annexe 1 - liste des participants


Groupe A

- François Rongère, D-ICE Engineering
- Brendan Guillouzouic, Ayro
- Jeremy Ohana, ECN (LHEEA)
- Jerome Vedrenne, CRAIN technologies
- Adrien Simonet, Neoline
- Vincent Seguin, Mauric
- Michel Rodet, Adrena
- Francesco Stella, CWS
- Pierre Arthur Fortin, LDA
- Arthur Topin, Wisamo
- Clodoald Robert, CNAM
- Philippe Cauneau, ADEME

Groupe B

- Benjamin Bouscasse, ECN (LHEEA)
- Yves de Montcheuil, Syroco
- Valentin Ménard, Beyond the Sea
- Pierre-Emmanuel, BVs
- Guillaume Lebrec, Ponant
- Sofien Kerkeni, D-ICE Engineering
- Corinne Fournier, BPGO
- Florent Bickert, Airseas
- Thibault Tincelin, SDI
- Aude Leblanc, BV
- Bertrand Malas, ECN (LHEEA)
- Marc Dufresne, CSTB
- Antoine Debled, ADD Techno
- Victor Depoers, Zephyr & Borée
- Philippe Pallu de la Barrière, CRAIN technologies

2- Annexe 2 – Support de présentation



Wind Ship
association

NORVENT

État des lieux des besoins et des démarches utilisées pour l'évaluation des performances des systèmes de propulsion par le vent

Financé par:



RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
*Liberté
Égalité
Fraternité*



ADEME
AGENCE DE LA
TRANSITION
ÉCOLOGIQUE



BUREAU
VERITAS

06/02/2023 Wind Ship - Atelier projet NORVENT 1

1

Introduction de la journée

- Rapide présentation de Wind Ship
- Historique du projet NORVENT
- Objectifs de la journée
- Déroulé et modérateurs
- Participants

Merci pour votre mobilisation et votre contribution au succès de cet après-midi d'échanges

06/02/2023 Wind Ship - Atelier projet NORVENT 2

2

Accélérer la transition
écologique du
maritime grâce au
développement et
déploiement de la
propulsion des
navires par le vent

Un réseau international



06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

3

3

Amorcer la filière en France

QUATRE OBJECTIFS

Développer l'image et la notoriété des solutions
Améliorer les conditions de compétitivité de la filière
Construire des projets collectifs qui font avancer la filière
Guider les nouveaux arrivants



06/02/2023

MISSIONS



Difuser des informations fiables



Collaborer avec les institutions et organisations publiques, privées



Développer des liens fructueux, projets collectifs



Promouvoir le savoir-faire de la filière



Wind Ship - Atelier projet NORVENT

4

4

Un projet collectif

Amorcer la filière de la propulsion des navires par le vent en France

Action collective professionnelle pour développer un transport maritime et plus largement une navigation de travail (incluant la croisière, la pêche et les navires de service) de moindre impact, en structurant une filière compétitive de la propulsion par le vent en France

Finalité



Décarboner le transport maritime « ici et maintenant »

Une filière qui assume la responsabilité sociale et environnementale de ses activités en participant à la préservation des ressources naturelles et en générant un mieux-être individuel et collectif

« Une véritable filière est créée, soit notamment : un portefeuille de compétences, des succès commerciaux, des créations d'entreprises, des flux « talents » favorisant rencontres et partage, un centre d'essai, une visibilité nationale et internationale, un référentiel des technologies et de leurs performances validées par un tiers, des outils financiers adaptés, des événements sur l'eau »

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

5

5

6



Réseau international Windship



statut consultatif
depuis déc. 2021

Expert ESSF et
STEERER



Membership & Organisation

- **Structure** – NPC, elected board, member-driven
- **Growth** – 12 members (2014) – 100+ active (2021)
- **Wider Network** – 1000+
- **Advisory** – IMO, EU, National Govts

HUB DEVELOPMENT

- **Europe – Atlantic** (Nantes, Fra)
- **Europe – North Sea & Baltic** (development)
- **North America** (CAN/US) (development)
- **E. Asia** (JP-KOR-CHN-SING) (early development)
- **South Pacific** (FI, IOM)

IWSA Activities

- **Network** – members, events, publications
- **Promote** – communications
- **Incubate** – projects, accelerator, hubs
- **Educate** – seminars, research
- **Facilitate** – standards, policy

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

7

7

Historique projet NORVENT

- **Création de Wind Ship en décembre 2019, identification de pistes**
 - « Outil »
 - construire un référentiel « objectif » d'évaluation de la performance des technologies de la propulsion par le vent
 - « Go to market »
 - Construire collectivement un référentiel de normalisation avec un organisme de classification
- **Performances du vélique, un sujet récurrent :**
 - En 2022, travail sur le livre blanc
 - Au sein du GT Tech (essais mer, validation des modèles)
 - Au niveau international : soumission OMI sur EEDI, dans les instances de réflexion européennes (ESSF) et dans organisations prescriptives (ITTC)

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

8

8

Rôle de Wind Ship

C'EST

- Une plateforme d'échange et de construction collective

CE N'EST PAS

- Une MOE scientifique et technique qui va prescrire des règles
- Proposition : identifier les pratiques, croiser les regards des sachants et non experts pour une compréhension commune et des recommandations pour la suite

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

9

9

Finalité de NORVENT

- Une montée en compétence collective
- S'assurer que les technologies en France disposent des mêmes avantages que les autres pour se positionner sur le marché international
- Être prêt à délivrer des résultats reconnus

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

10

10

Objectifs de la journée, modération et programme

- Objectifs
- Animation
 - Technique : François Rongère (D-ICE Engineering) et Philippe Pallu de la Barrière (CRAIN Technologies)
 - Globale : Marine et Lise (Wind Ship)
- Principes:
 - écoute bienveillante
 - ne pas monopoliser la parole
 - « on a le droit de ne pas savoir »
 - respecter la confidentialité des échanges qui ont lieu ici
- Programme / rapporteurs / maîtres du temps

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

11

11

Déroulé de l'atelier

- Partie 1 - Résultats du questionnaire
- Partie 2 - Présentation de la démarche d'évaluation de performance
- Partie 3 - Constitution des groupes de travail

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

12

12

Partie 1 - Résultats du questionnaire

Wind Ship
R&D



06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

13

13

Typologie des répondants

Utilisateur / fournisseur	Type d'activité principale	Activité secondaire	Répondants
Utilisateur d'évaluation de performance	Architecte naval / concepteur		3
	Armateur		5
	Équipementier		6
	Chantier naval	Bureau d'étude	1
	Financier		1
	Société de classification		1
	Motoriste		1
Fournisseur de données et/ou d'évaluation de performances	Fournisseur d'outils numériques ou d'évaluations de performance		3
	Architecte naval / concepteur		1
	Bassin de carène		1
	Soufflerie		2
		Total	25 répondants

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

14

14

Terminologies communes

Wind Ship

- **Démarche d'évaluation des performances:** Suite d'actions menées selon une méthode en utilisant des outils de simulation ou de mesure pour déterminer les gains liés à l'utilisation d'une technologie
 - **Définitions de performance?**
- **Polaire:** Représentation graphique angulaire d'une grandeur physique -> il faut toujours préciser: polaire de performance ? du système vélique? du navire ?
- **Jumeau numérique:** Assemblage de modèles permettant de rendre compte de la physique mise en jeu dans l'opération d'un navire.
- Un système vélique = un ou plusieurs gréements d'une ou plusieurs technologies installés sur un navire.

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

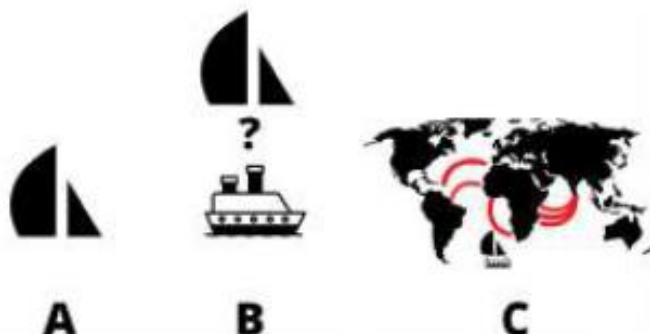
15

15

Les catégories de travail

Nous avons proposé de classer les besoins de performance en trois grandes catégories : A / B / C

- **Catégorie A :** Volonté de caractériser la performance d'un système vélique seul, de manière générique.
- **Catégorie B :** Volonté d'évaluer la pertinence du vélique pour décarboner une flotte / un navire seul avec une route générique.
- **Catégorie C :** Étude des choix de système vélique et des configurations pour installer une propulsion par le vent sur une flotte / un navire (en retrofit ou new built)



06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

16

16

PREDICTION / MESURE → **maturité du projet**
fiabilisation des évaluations / réduction des incertitudes

Niveau 0: Première intention
 Niveau 1: Esquisse / Preliminary study
 Niveau 2: Concept
 Niveau 3: Contractualisation
 Niveau 4: Essais en mer
 Niveau 5: Opération

A
B
C

Quelles données sont disponibles à cette étape ?
 Quelles sont les résultats attendus?
 Garantie de performance ?

06/02/2023 Wind Ship - Atelier projet NORVENT 17

17

Croisement avec le travail mené par le projet WASP sur les indicateurs de performance et leur utilisation

Type	Specific	Describing	Usage
Type A	Wind propulsion Unit 	Unit performance	Comparing technologies, design optimisation
Type B	Wind propulsion Unit Ship 	Design index	Regulations, financial incentives
Type C	Wind propulsion Unit Ship Route 	Fuel saving (compared to same ship without WPT)	Business case, providers performance guarantee
Type D	Achieved 	Fuel saving Achieved after some time of operation	Cost Saving split, reduced fee, rating

General
 ↓
 Case specific

06/02/2023 Wind Ship - Atelier projet NORVENT 18

18

Catégories et étapes des projets concernés par les évaluations de performance

Globalement, les évaluations de performances ont été utilisées quasiment **à part égale pour les 3 catégories citées** - avec cependant une prédominance pour les évaluations en catégorie A.

Plus en détail:

- Les armateurs : environ 30 évaluations; catégories B et C
- Les équipementiers: plusieurs dizaine d'évaluations, la plupart du temps en interne; catégories A, B et C.
- Les évaluateurs de performances: plusieurs dizaine évaluations; catégories A, B et C.
- Les souffleries et bassins de carène contactés ont été assez peu sollicités et de manière logique :
 - uniquement en catégorie A pour les souffleries
 - et en catégorie B pour les bassins

Près des **% des utilisateurs se trouvent dans des étapes préliminaires de projet** : étape 0, 1, ou 2.

Plus en détail:

- Les armateurs : étape 0, 1 ou 5
- Les équipementiers: étapes 0,1 et 2
- Les évaluateurs de performances : tous niveaux de maturités
- Les souffleries et bassins de carène contactés ont été sollicités:
 - en étape 0 et 2 pour les souffleries
 - et en étape 1 pour les bassins

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

19

19

Besoins des utilisateurs

- Etude de la performance du système vélique pur
- **Étude de l'opportunité ou de la pertinence du vélique sur un navire ou une flotte (en fonction des routes disponibles, de la ressource en vent disponibles sur ces routes et du ROI & l'OPEX...)**
- Sélection d'une technologie par comparaison entre plusieurs systèmes
- Etude de l'impact de l'installation d'un système vélique sur le comportement du navire
- Etude de la configuration pour l'installation d'un système vélique sur le navire
- **Evaluation de la puissance développée par le système vélique en comparaison avec une puissance « équivalente » carburant**

Estimation de la réduction d'énergie et des gains en fuel
Calcul de l'OPEX, du CAPEX et du ROI du projet

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

20

20

Constat n°1: la définition de performance n'est pas encore claire

- Les définitions de performance des navires propulsés par le vent sont **subjectives** et parfois **confuses**.
- Différents besoins ont été exprimés avec des indicateurs de performance variés mais qui ne correspondent pas forcément à la catégorie dans laquelle les projets sont menés.
- Un système vélique seul constitue un élément de performance, on peut parler de ses caractéristiques (coefficient aérodynamique) qui peuvent permettre dans certains cas de donner des ordres de grandeur de prédiction de performance (quand un navire concerné n'a que peu d'interactions avec le système et le système peu d'effets sur le navire).

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

21

21

Constat n°2: évaluations de performance vs prédiction de performance

Un aspect repose sur 2 notions, relevées par certains acteurs lors des entretiens :

- la notion de performance prédite/prédictive théorique versus
- la notion de performance opérationnelle, dépendante de nombreux facteurs liés à l'exploitation du navire (environnement mais aussi équipage).

Il convient de définir plus précisément les deux types de performance afin de d'identifier sur quel(s) critère(s) peut s'engager un équipementier ou un chantier. Les deux performances sont cependant complémentaires.

Aujourd'hui, les évaluations de performance portent uniquement sur du prédictif, car les utilisateurs n'ont pas encore de navires en opération.

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

22

22

Constat n°3: Nécessité de renforcer la confiance entre les différents acteurs



La démarche globale de prédiction de performance paraît claire dans l'esprit de la plupart des répondants, mais la manière dont on la mesure/quantifie, alimente en données les modèles, et restitue les données en sortie est plus floue. Il y a une confiance à renforcer entre l'ensemble des acteurs de la "chaîne de production" de l'évaluation de performance.

— une opportunité pour :

- harmoniser la restitution des données par les évaluateurs de performance aux demandeurs
- Faciliter le travail de tous les acteurs par la clarification des méthodes utilisées pour obtenir les données

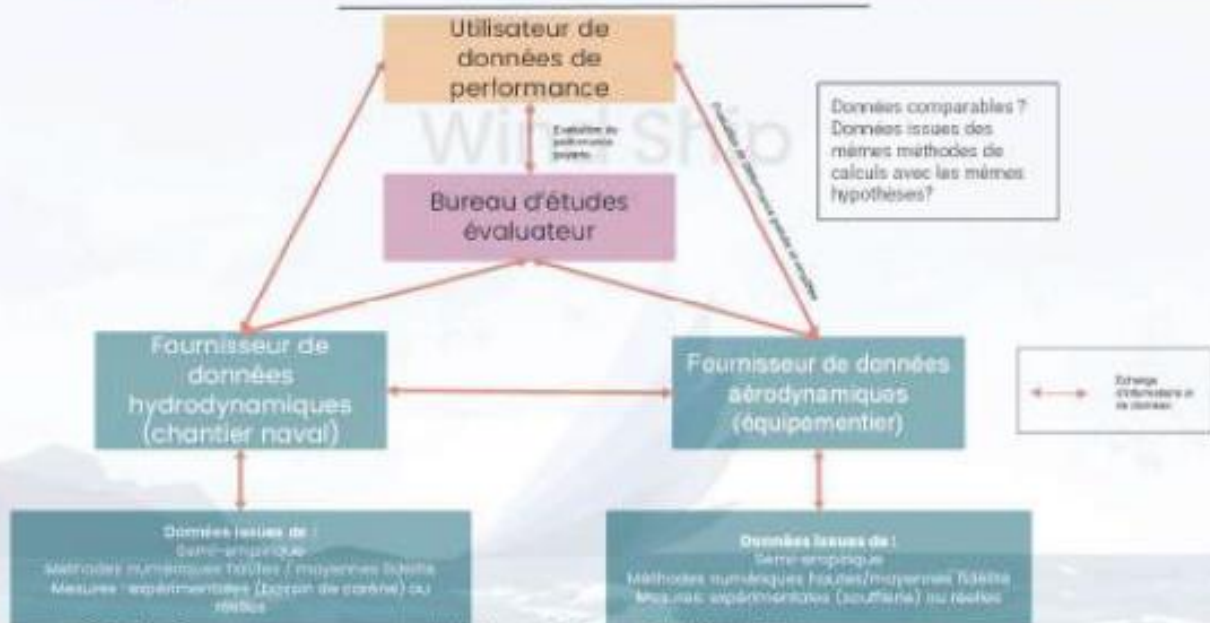
06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

23

23

Échange d'informations dans la démarche de prédiction de performance



06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

24

Constat n°4: Besoin de standards publiés

Wind Ship

Un nombre important d'acteurs ont mis en lumière la nécessité d'avoir des guidelines/standards publiés (de type ITTC, et complétés éventuellement par de la certification de classe ...) qui permettent de guider chaque soufflerie, bassin, Bureau d'Étude faisant des calculs numériques CFD, des essais ...

Il convient de s'accorder sur un certain nombre de paramètres qui permettront de guider ces acteurs dans le choix des méthodes, des conditions expérimentales etc. En d'autres termes, cela permettrait de mettre en place un set de règles communes pour garantir une fiabilité des tests.

→ choix conjoint sur l'ensemble des paramètres les plus importants à prendre en compte, et les méthodes pour les représenter.

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

25

25

Partie 2 - Présentation de la démarche de performance



06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

26

26

Modèle numérique du navire propulsé par le vent

Wind Ship

Définition : approche systémique physique permettant de modéliser de manière modulaire et multiphysique chacun des efforts s'appliquant sur le navire en interaction avec son environnement (vent, vagues, courant)

Le navire évolue à l'interface entre deux fluides:

Hydrodynamique	Aérodynamique
<ul style="list-style-type: none"> • Modèles d'efforts sur la carène (résistance en eau calme, manoeuvrabilité/anti-dérive, résistance ajoutée sur houle) • Modèles d'efforts sur les safrans/appendices • Modèles d'efforts développés par la propulsion mécanique • Modèles d'interactions coque/propulsion/safrans 	<ul style="list-style-type: none"> • Modèles d'efforts de vent sur les superstructures/coque • Modèles d'efforts développés par les systèmes de propulsion véliques • Modèles d'interactions coque/superstructures/gréements & gréements entre eux

06/02/2023

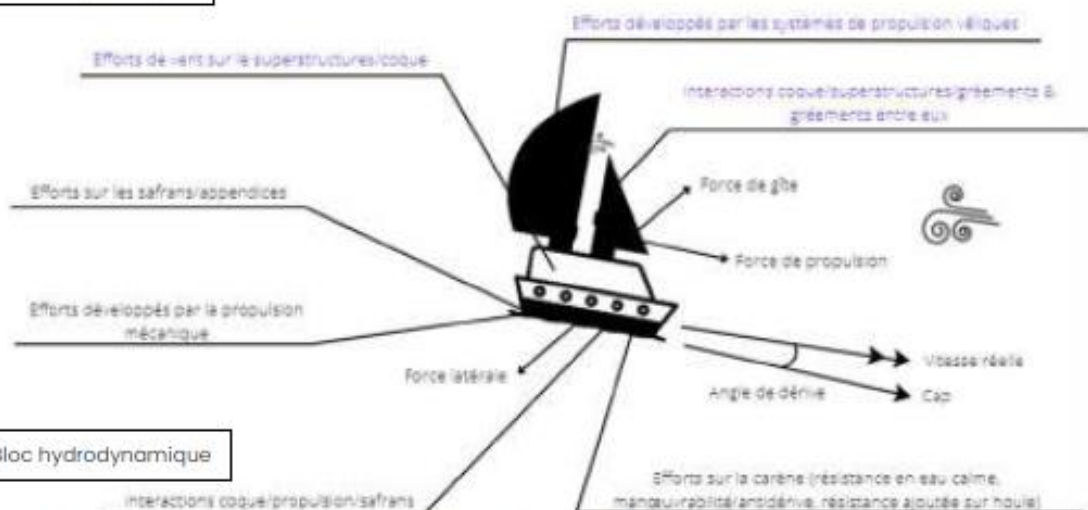
Wind Ship - Atelier projet NORVENT

27

27

Les effets physiques en jeu dans les modèles

Bloc aérodynamique



06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

28

28

Définition d'un modèle

Représentation simplifiée d'un système ou d'un phénomène physique permettant de reproduire son fonctionnement. Les modèles sont des cadres mathématiques qui doivent être alimentés en données spécifiquement adaptées au système à l'étude.

Données des modèles. Quel que soit le modèle, la source de données peut être générée à partir de différentes méthodes à multi-fidélité (du plus au moins précis/coûteux):

1. Mesures (expérimental / réel)
2. Méthodes numériques hautes / moyennes fidélité (CFD / théorie potentielle)
3. Formules semi-empiriques / extrapolations sur bases de données

06/02/2023

Wind Ship - Atelier projet NORVENT

29

29

Partie 3 - Constitution des groupes de travail

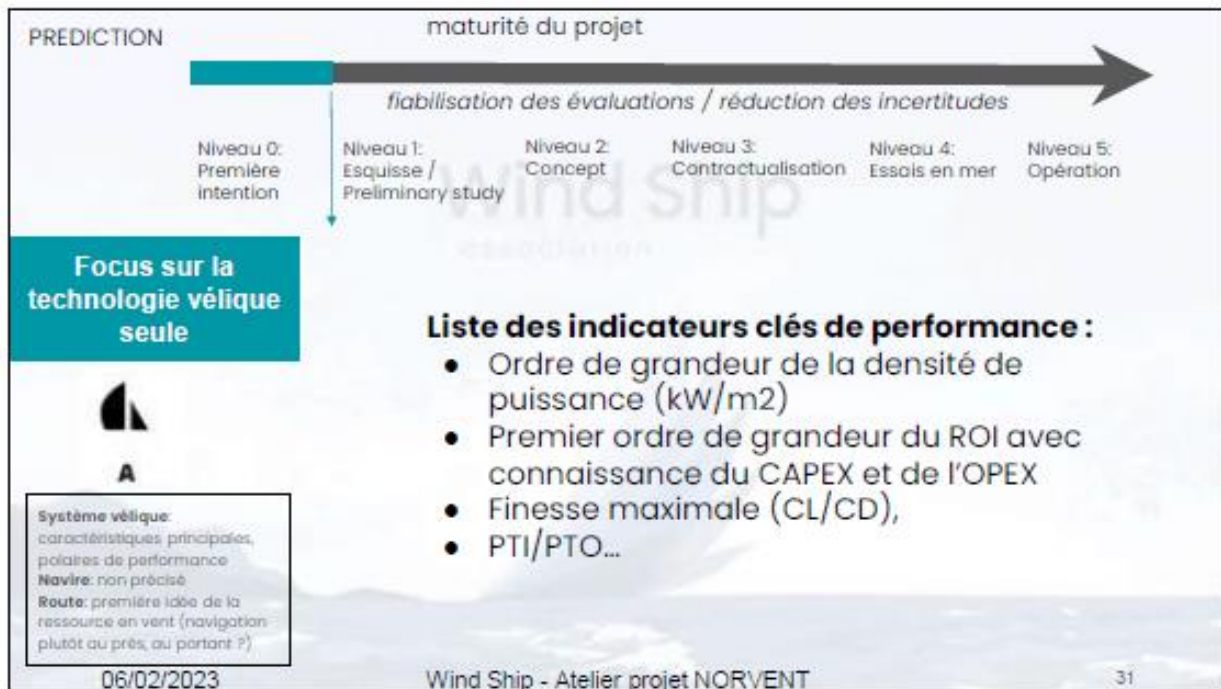
Proposition : travail en groupe sur les croisements entre les catégories, les besoins attendus et les résultats scientifiquement acceptables pour répondre aux besoins.

06/02/2023

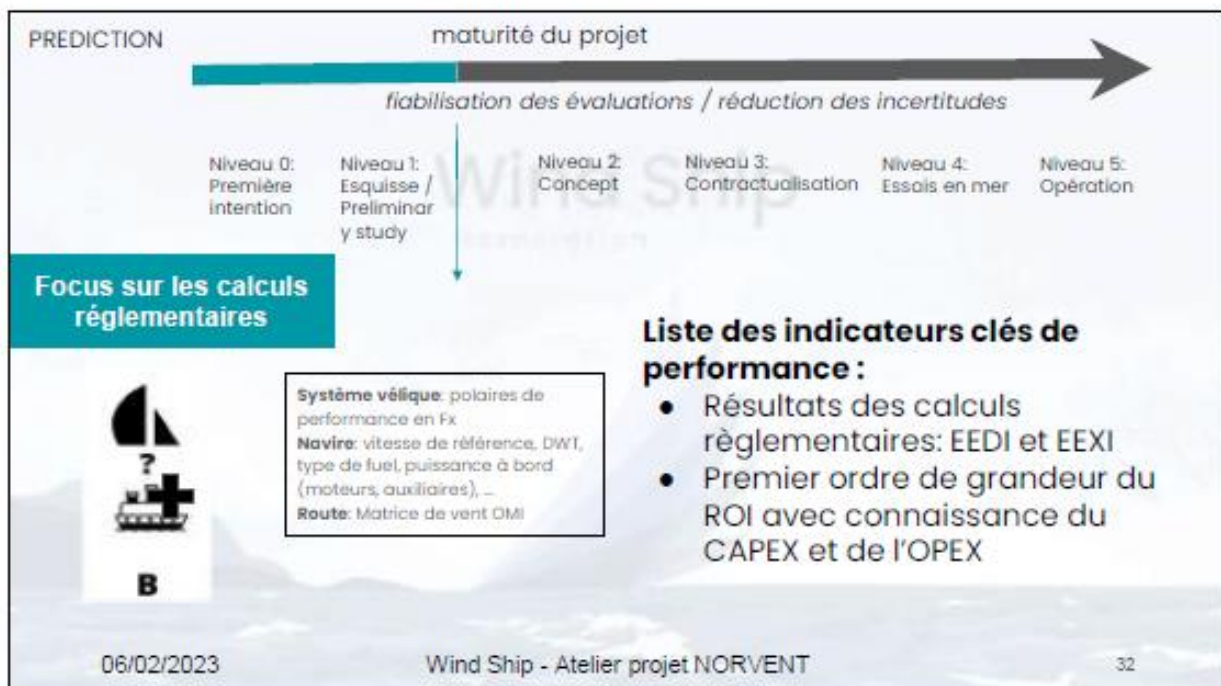
Wind Ship - Atelier projet NORVENT

30

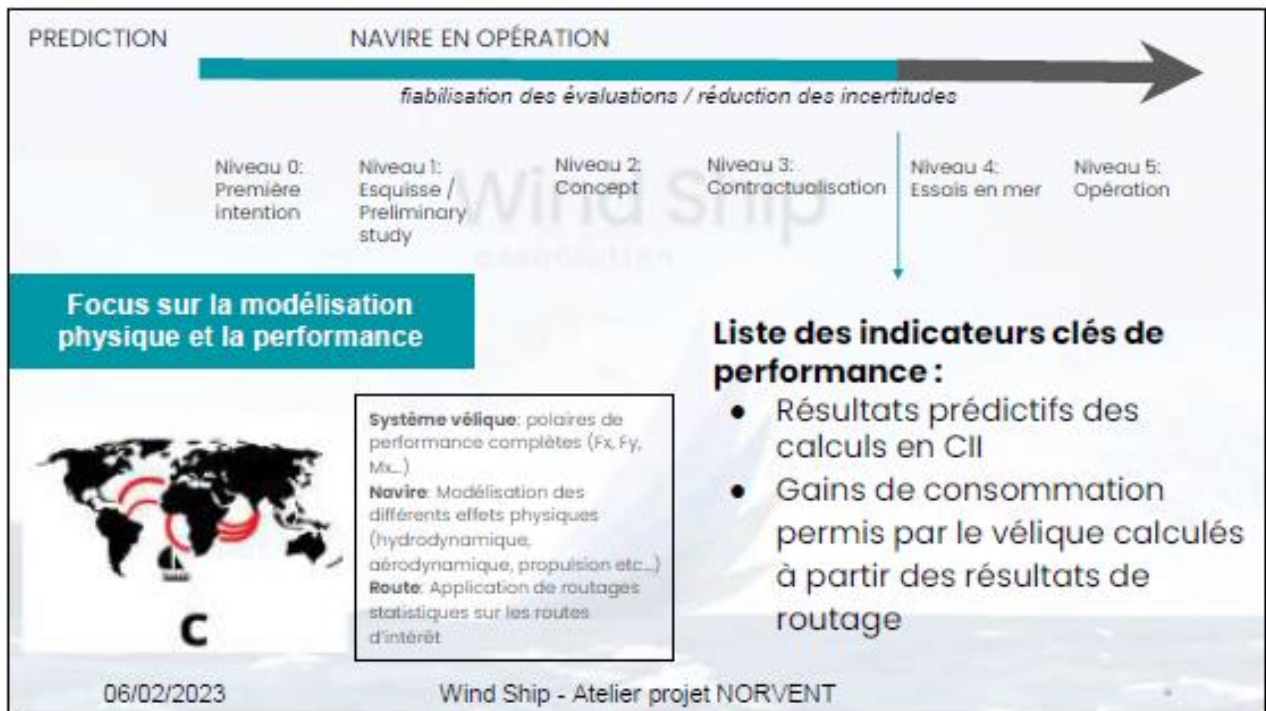
30



31




32



33



34



Merci! Wind Ship

Contactez-nous:

Lise Detrimont
Délégue Générale
lise.detrimont@wind-ship.fr

Marine Rialan
Cheffe de projets
marine.rialan@wind-ship.fr

Annexe 3 – Liste non exhaustive d’outils d’évaluation des performances

Type d’outil	Nom	Exploitant ou fournisseur	Usage possible dans les démarches d’évaluation des performances	Spécificités/moyens disponibles	Accès et utilisation
Soufflerie		CSTB	<p>Les tests en soufflerie permettent l’étude de certains paramètres influents dans les modèles, tels que :</p> <ul style="list-style-type: none"> -les effets du vent sur les structures de tout type -La tenue au vent -Le comportement aéroélastique de structures 	<ul style="list-style-type: none"> -2 circuits fermés indépendants -5 zones d'essais distinctes -6 ventilateurs (3200 kW au total) reproduisent les écoulements d'air dans 4 veines d'essais 	Payant
Bassin de carène		Ecole centrale de Nantes	Faciliter l’étude des paramètres influents dans l’optimisation des performances globales du navire par des tests réalisés sur des maquettes en bassin de traction.	<ul style="list-style-type: none"> - 140 m de long, 5 m de large, avec une profondeur constante de 3 m. -Equipé d'un chariot de remorquage capable d'aller dans les deux sens, à des vitesses pouvant atteindre 8 m/s. -Wave maker générant des vagues d'une hauteur maximale de 0,5 m. -Plage permettant aux vagues de déferler 	Payant
Bassin de carène		DGATH	Faciliter l’étude des paramètres influents dans l’optimisation des performances globales du navire par des tests réalisés sur des maquettes en bassin de traction.	<ul style="list-style-type: none"> -Grand tunnel hydrodynamique -Cuve à houle Roger-Brard de 30 m de long, 10 m de large, profondeur variable. Bassin de traction de 550 m de long, 15 m de large et 7 m de profondeur capable d'atteindre la vitesse de 12 m/s. Son générateur de houle peut créer des vagues d'1 m d'amplitude. -Cuve d'expérimentation hydro balistique (moyen spécifique) -Petit tunnel hydrodynamique 	Payant
Bassin de carène		Lège Université	Faciliter l’étude des paramètres influents dans l’optimisation des performances globales du navire par des tests réalisés sur des maquettes en bassin de traction.	<ul style="list-style-type: none"> -Fond amovible (permettant de réaliser des tests à faible profondeur), - rives à angles variables - Membre de l'ITTC 	Payant

Type d'outil	Nom	Exploitant ou fournisseur	Usage possible dans les démarches d'évaluation des performances	Spécificités/moyens disponibles	Accès et utilisation
Bassin de carène		Maritime Research Institute - MARIN	Faciliter l'étude des paramètres influents dans l'optimisation des performances globales du navire par des tests réalisés sur des maquettes en bassin de traction.	-Gamme d'installations de test de modèles, d'outils logiciels, de simulateurs, d'installations numériques et de techniques de mesure pour tester, simuler et surveiller les navires et les opérations, y compris le facteur humain	Payant
Bassin de carène		SSPA	Faciliter l'étude des paramètres influents dans l'optimisation des performances globales du navire par des tests réalisés sur des maquettes en bassin de traction.	Générateurs de vagues L'outil numérique SEAMAN combiné aux tests permet l'étude du comportement dans les mers obliques Base de données contenant plus de 8 000 formes de coque de navire → fournit la base de l'analyse des résultats et des conseils pour l'optimisation de la forme de coque des navires marchands, ainsi que des embarcations à grande vitesse et planantes.	Payant
Outil numérique	Flettner Savings Calculator	Lloyd's Register	Estimation des économies de carburant pour différents types de navires équipé d'un rotor sur toute route maritime commerciale	Outil développé à l'aide de données de performances en service acquises auprès du Maersk Pelican qui a été équipé d'un système de rotor Flettner (FRS) en septembre 2018. Lloyd's Register a utilisé ces données avec des méthodes de calcul des performances de navires, des coefficients aérodynamiques publiés de types génériques de navires marchands et des statistiques mondiales moyennes sur le vent pour les océans du monde, pour développer l'outil.	Gratuit Outil interactif en ligne
Outil numérique	SIMWP	CRAIN technologie	Estimer les performances hydrodynamiques et aérodynamiques et analyser des flux et des rendements énergétiques à bord du navire.	Outil modulaire basé sur une expérience importante en matière de navires de course et de plaisance. L'outil développé est donc conçu pour optimiser les paramètres de fonctionnement afin d'atteindre un rendement optimal selon un critère choisi par l'utilisateur et en fonction d'un ensemble de contraintes qui peuvent être liées aux équipements, à la sécurité, etc.	Payant Cet outil n'est pas directement disponible. Il est utilisé par le CRAIN pour réaliser des prestations sur les performances des systèmes véliques

Type d'outil	Nom	Exploitant ou fournisseur	Usage possible dans les démarches d'évaluation des performances	Spécificités/moyens disponibles	Accès et utilisation
Outil numérique	Esperado et Deperado	D-ICE Engineering	Prédiction et calcul des polaires de performance	Analyses statiques ou dynamiques. Analyses de résistance, y compris les charges de fatigue et ultimes. Études de conception de navires Résistance des navires, conception de la puissance/des hélices, formes de coque, etc. Études de stabilité des navires	Payant Ces outils ne sont pas directement disponibles. Ce sont des codes de calcul internes des points d'opération utilisés par la société D-ICE pour réaliser des prestations sur les performances des systèmes véliques
Outil numérique	SATORI	D-ICE Engineering	Routage statistique		Payant Produit en ligne proposé sous forme d'abonnement
Outil numérique	MORO	D-ICE Engineering	Routage statistique		Payant Cet outil n'est pas directement disponible. C'est un code de calcul interne de routage.
Outil numérique	OCEANICS	D-ICE Engineering	Système de navigation permettant d'optimiser et sécuriser les opérations ainsi que de réduire significativement la consommation des navires	OCEANICS propose en connecté : - un pilote automatique - un DP - un ECDIS - un module de routage opérationnel - un système de monitoring - un module d'aide à la décision - le hardware de pilotage, de calcul, d'interfaçage avec les systèmes du bord (propulsion, direction, systèmes véliques etc...)	Payant Produit disponible pour équiper directement un navire
Outil numérique	Efficient Ship	Syroco	Estimation de l'impact des technologies véliques à l'échelle d'un navire ou d'une flotte sur les performances, les émissions et les coûts d'exploitation.	Plateforme basée sur le jumeau numérique du navire qui modélise : - Modèles de comportement et d'efficacité hydrodynamique et aérodynamique	Payant Accès via une licence

Type d'outil	Nom	Exploitant ou fournisseur	Usage possible dans les démarches d'évaluation des performances	Spécificités/moyens disponibles	Accès et utilisation
			L'outil permet aussi l'étude du routage, de la stratégie de mix énergétique et le calcul de conformité réglementaire (EEDI, EEXI...).	<ul style="list-style-type: none"> - Modèles d'efficacité énergétique des systèmes de propulsion - Conditions paramétriques : routes, météo & mer, disponibilités et prix des ports/des énergies - Capteurs embarqués (navire connecté) 	
Outil numérique	Pelican Performance Prediction Software	Blue Wasp	<p>Programme de prévision des performances pour les navires assistés par le vent</p> <p>Garantit des évaluations pour soutenir le processus de conception et l'analyse des investissements.</p>	<p>Modules de force intégrés permettant d'éviter les tests CFD</p> <p><u>Pour l'aérodynamique :</u></p> <p>→ Large base de données de systèmes de propulsion éolienne</p> <p>→ Modèle mathématique validé en soufflerie pour les effets d'interaction aérodynamique entre plusieurs systèmes éoliens</p> <p><u>Pour l'hydrodynamique</u></p> <p>→ Ensemble de données dérivées de plus de 1500 simulations CFD validées sur 60 variantes de coque représentant un large éventail de types de navires</p>	<p>Payant</p> <p>Cet outil n'est pas directement disponible. Il est utilisé par Blue Wasp pour réaliser des prestations sur les performances des navires propulsés par le vent.</p>
Outil numérique	xWASP_CN	Ecole Centrale Nantes	Programme de prévision des performances pour les navires assistés par le vent	xWASP_CN a deux modes : PPP (Programme de prédiction de puissance) et VPP (Programme de prédiction de vitesse). Ces modes correspondent à deux stratégies de contrôle d'un navire hybride utilisant à la fois des systèmes de propulsion éolien et mécanique. Ces deux modes sont hérités respectivement de la conception navale et de la technologie des voiliers.	<p>Open source</p> <p>En ligne</p>
Outil numérique	Blue Route https://blueroute.application.marin.nl/	Maritime Research Institute - MARIN	Ce site Web est développé pour montrer les avantages de la navigation assistée par le vent pour des itinéraires de navigation personnalisés dans le monde entier.	La performance dans BlueRoute a été calculée à l'aide des méthodes définies dans le MEPC.1/Circ.815 par l'OMI avec un raffinement supplémentaire. Néanmoins, les prédictions doivent être considérées comme relativement simples, car certains changements opérationnels plus détaillés de l'efficacité ne sont pas modélisés.	<p>Gratuit</p> <p>En ligne</p>

Annexe 4 – Rapport sur les indicateurs clés de performance du projet WASP (traduit en français par Wind Ship)

Caractéristiques INDICATEURS CLÉS DE PERFORMANCE POUR LES NAVIRES ÉOLIENS

- S Werner, RISE Maritime, Suède
- F Gerhardt, RISE Maritime, Suède
- S Kontos, RISE Maritime, Suède

RÉSUMÉ

L'industrie de la propulsion maritime par le vent évolue rapidement et de nouvelles technologies émergent sur le marché. Cela nécessite des moyens normalisés d'exprimer les performances techniques des technologies de propulsion par le vent (WPT) de manière transparente. La communauté de la propulsion par le vent ne s'est pas encore mise d'accord sur des indicateurs clés de performance (KPI) communs. Cela complique les comparaisons, met en péril l'équité et retarde les décisions d'investissement.

Un certain nombre d'indicateurs de performance clés différents décrivant la capacité d'un WPT à économiser la consommation d'énergie d'un navire sont abordés dans ce document. Celles-ci ont été recueillies dans le cadre d'ateliers de l'industrie et d'entretiens en coopération avec l'International Wind Ship Association (IWSA), l'International Towing Tank Conference (ITTC) et le projet Interreg de l'UE WASP.

Après une explication des hypothèses sous-jacentes et des méthodes de calcul, les KPI investis sont illustrés pour un navire générique équipé de différents systèmes de propulsion par le vent typiques.

Un ensemble de KPI recommandés sont suggérés par les auteurs. Nous espérons que cette proposition suscitera de nouvelles discussions au sein de l'industrie et facilitera le processus d'élaboration de mesures utiles et normalisées pour évaluer les technologies de propulsion par le vent.

NOMENCLATURE

ρ_{Une}	densité d'air
η_D	Efficacité propulsive totale du navire
A	zone projetée du WPU
C_D	Coefficient de force du WPT aligné sur le vent apparent
C_L	Coefficient de force du WPT perpendiculaire au vent apparent
C_P	Coefficient de la contribution de puissance du WPT
C_X	Coefficient de force du WPT dans la direction longitudinale du navire
C_{X0}	Coefficient de force du WPT dans la direction longitudinale du navire au vent de face
C_Y	Coefficient de force du WPT dans la direction transversale du navire
AWA	Angle de vent apparent, course relative au-dessus du sol (degrés)
AWS	Vitesse de vent apparent(m/s)
EEDI, EEXI	Energy Efficiency Design Index
ESP	Potentiel d'économie d'énergie d'un WPT (J)
F_X	Force du WPT dans la direction longitudinale du navire
OMI	Organisation maritime internationale
ITTC	International Towing Tank Committee
KPI	Indicateur clé de performance
P	Puissance de propulsion du navire
PSP	Potentiel d'économie d'énergie d'un WPT (W)
P_{in}	Puissance absorbée, consommation de WPT (W)
TWA	Angle de vent réel, trajectoire relative au-dessus du sol (degrés)
TWS	Vitesse de vent réel (m/s)
V_s	Vitesse du navire
W	Matrice de vent W
WPT	Technologie de propulsion par le vent
WPU	Unité de propulsion par le vent



INTRODUCTION

L'industrie de la propulsion maritime par le vent évolue rapidement et de nombreuses nouvelles technologies de propulsion par le vent (WPT) émergent sur le marché. Ces systèmes modernes ont peu en commun avec les voiles en toile de l'ancien temps et vont des rotors aux cerfs-volants en passant par des ailes aspirées ou des voiles rigides qui ressemblent à des ailes d'avion verticales [1]. Toutes ces technologies ont leurs forces et leurs faiblesses spécifiques, qui doivent être évaluées et quantifiées lors de la sélection d'un WPT et pour une application particulière. La communauté de la propulsion par le vent ne s'est toutefois pas encore mise d'accord sur des indicateurs clés de performance (KPI) communs. Certaines technologies sont décrites à l'aide de coefficients aérodynamiques, d'autres par exemple les économies de carburant attendues. Les chiffres du gain en pourcentage sont couramment utilisés, mais ce qui est inclus dans la comparaison n'est souvent pas clair. Cela complique la comparaison des technologies, met en péril l'équité et retarde les décisions d'investissement.

Avant ce contexte, le projet Interreg North Sea Region WASP, l'International Wind Ship Association (IWSA) et l'International Towing Tank Conference (ITTC) ont uni leurs forces pour développer et proposer des KPI pour les navires propulsés par le vent. Dans le cadre de cet effort, plusieurs réunions de groupes de discussion ont eu lieu à l'automne 2022. Ces ateliers en ligne étaient ouverts à toutes les parties prenantes de la communauté de la propulsion par le vent et visaient à faire connaître les idées et à discuter des implications des différentes alternatives aux KPI. La figure 1 résume et regroupe les participants.

Dans l'article, nous présentons plusieurs KPI possibles. Leurs avantages et inconvénients sont discutés sur la base des ateliers de l'industrie, de la communication écrite avec les représentants de l'industrie ainsi que de la propre expérience des auteurs des applications de propulsion par le vent pour les navires commerciaux.

L'ITTC publiera de nouvelles lignes directrices concernant la prévision de la puissance pour les navires à propulsion par le vent en 2024. Les présents travaux ont été menés en étroite coopération avec le 30^e Comité de spécialistes de l'IFCT pour les navires à énergie par le vent et à propulsion par le vent, et les résultats influenceront les nouvelles normes de l'industrie du CTBT.

Les auteurs invitent les lecteurs qui ont des commentaires ou des suggestions supplémentaires à nous contacter et à poursuivre la discussion.



Graphique 1. Une variété d'indicateurs de performance clés pour les navires assistés par l'éolien sont utilisés dans l'industrie. L'ITTC, l'IWSA et le projet WASP ont organisé des réunions de groupes de discussion avec l'industrie dans le but de dériver des KPI harmonisés. Les types d'entreprises d'affiliation des participants sont indiqués dans le graphique de droite.

2. CATÉGORIES DE KPIS



Dans le présent document, les indicateurs de rendement clés sont regroupés en plusieurs catégories et examinés séparément. Les catégories vont de A à D, comme le montre la figure 2. Comme illustré, un indicateur de catégorie A évalué les performances du WPT à un niveau général, tandis qu'un indicateur de catégorie C décrit le résultat d'une évaluation plus spécifique (du navire). Étant donné que les indicateurs des quatre catégories ont des objectifs différents, ils doivent également répondre à des exigences différentes. Ceci est résumé dans la partie droite de la figure 2.





La catégorie A contient des indicateurs qui décrivent les caractéristiques des unités de propulsion par le vent sans la présence d'un navire. S'ils sont adimensionnalisés correctement, ils devraient permettre une comparaison équitable entre les technologies à un niveau général.

La catégorie B comprend des indicateurs spécifiques au navire obtenu en « naviguant » sur un itinéraire standard prédéfini. Ces indices peuvent être utilisés pour les évaluations réglementaires, où des définitions efficaces, transparentes et équitables sont plus importantes que des chiffres précis sur les économies de carburant. Un KPI typique de cette catégorie est l'indice nominal d'efficacité énergétique (EEDI), où l'influence de l'installation de technologies de propulsion par le vent est évaluée en faisant naviguer le navire spécifique le long d'une route mondiale standard.

Les indicateurs de catégorie C sont généralement utilisés dans le contexte de l'analyse de rentabilité des WPT ou pour communiquer les attentes en matière de rendement entre les parties prenantes commerciales. Les KPI de cette catégorie doivent donc exprimer avec précision les économies d'énergie ou de carburant attendues pour un navire particulier négociant selon un schéma spécifique. Le présent document accorde une attention particulière aux KPI dans cette catégorie, car l'absence d'indicateurs normalisés de catégorie C est actuellement un problème important pour les armateurs et les autres parties prenantes. Les décisions d'investissement sont souvent retardées parce qu'il est difficile de comparer des technologies concurrentes.

La catégorie D comprend des indicateurs de performance obtenus pendant l'exploitation. Cette question ne sera pas examinée plus en détail dans le présent document.

Comme on peut le constater, les indicateurs de ces quatre catégories ont des objectifs très différents et il est de la plus haute importance que tous les acteurs de l'industrie le comprennent. Les KPI des catégories C et D, par exemple, sont basés sur des paramètres spécifiques du navire et de sa route et ne peuvent pas être utilisés pour comparer et classer les WPT de manière générale.

Category	Assesing	Describing	Typical usage	Requirement to a KPI			
				Fair "apple to apple" comparison	Ship specific	Accurate energy saving	Based on logged data
CAT A 	Wind propulsion Unit (WPU) alone	Unit performance	Comparing technologies, design optimisation	X	-	-	-
CAT B 	WPU & Ship	Design index	Regulations, financial incentives	X	X	O	-
CAT C 	WPU & ship & route	Energy or fuel saving (compared to same ship without WPT)	Business case, providers performance guarantee	-	X	X	-
CAT D 	Performance achieved in operation	Energy or fuel saving achieved after some time of operation	Cost-saving splitting, reduced fees, rating	-	-	-	X

Graphique 2. Catégorisation des KPI utilisés dans cette étude. A droite, attentes concernant les KPI possibles. Ici, (x) indique « obligatoire », (O) « facultatif » et (-) « non requis ».

3. CAS DE TEST

Tout au long du présent document, des cas types sont utilisés pour illustrer les KPI proposés. Ils utilisent la même coque et la même hélice mais ont des systèmes de propulsion par le vent différents. Il est important de noter que ces exemples sont des cas purement fictifs. Pour souligner cela, ils sont « anonymes » et seront appelés WPT 1, 2 et 3.

Les scénarios d'essai sont conçus de telle sorte que WPT1 et WPT3 ont un potentiel d'économie de carburant assez similaire, tandis que le WPT 2 a un potentiel d'économie nettement plus élevé.

L'exemple de navire est un transporteur général / vraquier de 5000 tpl d'une longueur de 90 m. Les principaux paramètres des cas de test sont donnés dans le tableau 1.

Tableau 1. Les trois cas les plus utilisés tout au long de cet article

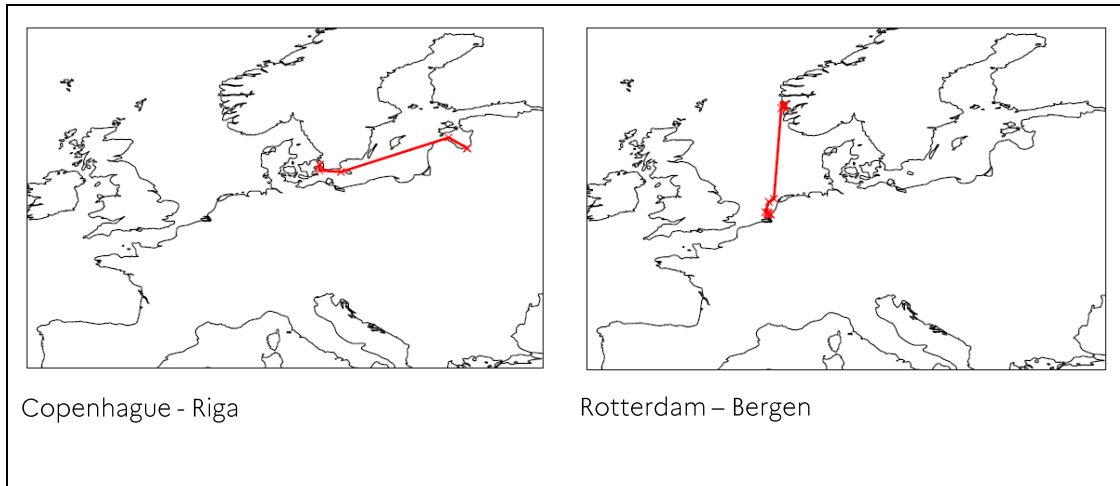
	WPT 1	Le WPT 2	WPT 3
Bateau	5000 tpl de marchandises générales, L=90m		
Max C_L	9.6	5.8	1.3
Max C_D	3.6	1.9	0.1
Actif/passif	Actif	Actif	Passif
P surface projetée [m ²]	54	114	200
Encombrement du pont [m ²]	7	64	136
Pliable / inclinable	Non	oui	Non

Les KPI des catégories C et D nécessitent une route ou des données d'opération du navire. Dans ce contexte, quatre exemples d'itinéraires sont analysés :

- Rotterdam-Bergen (aller-retour)
- Copenhague-Riga (aller-retour)
- New York- Manche (aller-retour)

Commerce mondial selon la « matrice EEDI » [2].

Les trois premiers itinéraires sont illustrés à la figure 3 et un graphique de l'itinéraire EEDI peut être trouvé dans OMI (2021) [2].



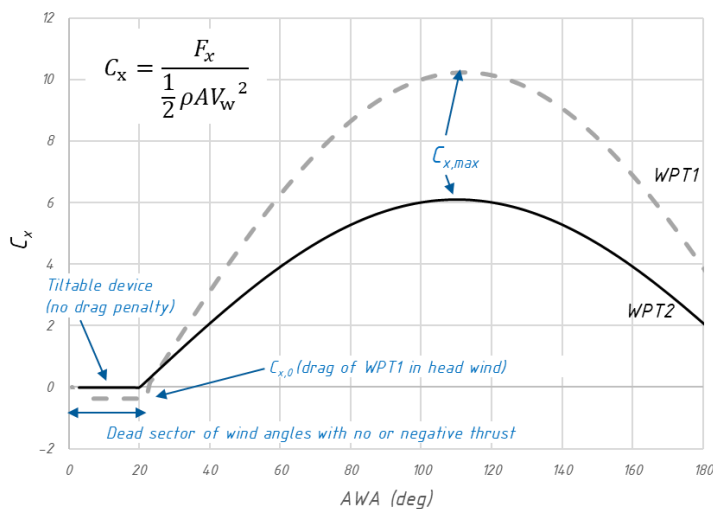
Graphique 3. Exemples d'itinéraires utilisés pour les calculs d'indicateurs de performance clés.

4. ALTERNATIVES AUX KPI

Cette section présente et explique les indicateurs de performance possibles qui ont été élaborés et discutés en étroite collaboration avec l'industrie. Les KPI ont également été appliqués aux trois cas types, WPT1, WPT2 et WPT3. Les résultats sont résumés dans des tableaux à code couleur où les trois conceptions sont classées de la performance la plus élevée (vert) à la performance la plus faible (rouge) à l'aide des KPI. Un rapport plus complet, contenant des informations générales supplémentaires et des KPI supplémentaires, sera publié au printemps 2023 [3].

4.1 CATÉGORIE A – TECHNOLOGIE UNITAIRE

Les indicateurs de cette catégorie devraient décrire les caractéristiques des unités de propulsion par le vent seules, sans tenir compte d'un navire. Les « caractéristiques » dans ce contexte peuvent signifier les forces qu'ils produisent (force de poussée, force latérale, portance, traînée) à différents angles de vent ou à la puissance propulsive qu'ils sont capables de fournir. La figure 4 illustre certaines caractéristiques typiques, qui seront abordées plus en détail ci-dessous. Les résultats pour les cas de test sont donnés dans le tableau 2.



Graphique 4. Exemples de caractéristiques des WPT, illustrées par le coefficient de poussée (C_x) vs courbes d'angle de vent apparent pour deux WPT différents

4.1 a) Indicateurs de performance clés unidimensionnels adimensionnels pour les technologies seules

Coefficient de portance maximal $C_{L,max}$

La force est définie comme la composante de force aérodynamique perpendiculaire à l'écoulement. Le coefficient de portance maximal avant décrochage sévère, $C_{L,max}$, est couramment utilisé dans l'aéronautique pour décrire les ailes et les surfaces portantes. Il peut être obtenu par des essais en soufflerie ou par calculs d'écoulement visqueux. Bien que ce paramètre ait une signification physique, il ne décrit pas bien le fonctionnement d'un dispositif de propulsion par le vent sur un navire. Un KPI similaire qui décrit mieux la situation spécifique du navire est le coefficient de poussée C_x .

Coefficient de poussée maximale $C_{x,max}$

En résolvant la « portance » et la « traînée » (composante de force aérodynamique dans la direction de l'écoulement) en composants parallèles et perpendiculaires à l'axe médian du navire, la « poussée » et la « force latérale » produites par le WPT peuvent être obtenues. Un KPI utile pourrait être la valeur maximale du coefficient de poussée sur tous les angles de vent, $C_{x,max}$, voir Figure 4.

Secteur mort

Les angles de vent où le WPT ne contribue pas à la réduction de puissance peuvent être appelés le « secteur mort ». Il y a à la fois des secteurs morts au vent et sous le vent. Cependant, le secteur au vent est plus critique car, pour les navires rapides modernes, les petits angles de vent apparents se produisent plus fréquemment que les angles de vent arrière. La taille du secteur mort varie considérablement entre les différents types de WPT, et elle varie également avec la vitesse du navire. Il s'agit donc d'une caractéristique importante à prendre en considération. D'autre part, le « routage météo » peut réduire l'effet négatif d'un secteur mort important et cela pourrait éventuellement rendre ce KPI moins pertinent. Le secteur mort au vent est illustré à gauche de la figure 4.

C_L / C_D

Le rapport portance/traînée est une indication de la « finesse » du WPT. Des rapports portance / traînée élevés sont équivalents à de petits secteurs morts au vent et permettent à un navire de naviguer près du vent.

Traînée du WPT au ralenti par vent de face, C_{x0}

Certains WPT peuvent être inclinés ou repliés sur le pont lorsque le vent n'est pas favorable. Les WPT qui ne sont pas inclinables créent une résistance qui n'est souvent pas négligeable. Il s'agit d'une caractéristique importante qui distingue les différentes technologies les unes des autres. La figure 4 illustre cela pour deux WPT différents.

Efficacité des besoins en énergie

Les dispositifs actifs, tels que les rotors ou les ailes aspirées, nécessitent une certaine entrée d'alimentation (entrée P_{in}) pour fonctionner. C'est bien sûr une caractéristique importante de ces technologies. Un KPI approprié qui répond à ce problème pourrait être le rapport entre la puissance requise et la puissance qui peut être livrée au navire. Les deux puissances (entrée et sortie) varient avec le vent ainsi qu'avec la vitesse du navire. Une expression simplifiée qui est indépendante de la vitesse du navire pourrait être :

$$\eta_{WPU} = \frac{P_{in}}{\left(\max(C_x) \frac{1}{2} \rho A \cdot AWS^3\right)} \quad (1)$$



ou la vitesse du vent AWS est de 10 m/s, et P_{in} est la consommation d'énergie à l'AWS = 10 m/s et l'AWA est pris là où C_x est maximal. P_{in} devrait inclure toutes les pertes, mécaniques, aérodynamiques et autres, c'est-à-dire que c'est la puissance qui doit être fournie par le moteur principal pour entraîner un WPT actif.

En regardant les résultats des cas de test (Tableau 2), la différence entre les appareils 1, 2 et 3 est clairement visible, WPT1 consommant la plus grande puissance.

KPI relatifs aux contraintes géométriques

En l'absence de contraintes de design ou financières, le plus grand appareil est susceptible de donner la plus grande économie de carburant. En réalité, le dispositif gagnant sera celui qui maximisera la puissance dans les limites de design données. Ces limitations peuvent par exemple être l'espace du pont, le tirant d'air ou le poids. Lors d'un projet de développement de concept, il pourrait être pertinent d'utiliser des coefficients basés sur ces paramètres. À titre d'exemple, le tableau 2 inclut $C_{L,max}$ / (surface de pont requise par le WPU).

4.1 b) Combinaisons d'indicateurs de performance clés non dimensionnels pour les unités autonomes

Combinaisons de coefficients simples

Comme le montre le tableau 2, il n'est pas possible de classer les WPT sur la base d'un seul KPI, car le classement des trois appareils est différent pour les différents KPI. Une façon de contourner ce problème pourrait être d'utiliser une combinaison de plusieurs KPI, y compris au moins :

$$[C_{x,max}; C_L/C_D; C_{x0}; \eta_{WPU}].$$

Alternativement, une représentation graphique telle que le tracé des coefficients suivant les angles de vent pourrait être utile.

Coefficient de force de poussée C_x courbe sur angle de vent

La façon la plus explicative de décrire les caractéristiques aérodynamiques des WPT est de montrer le coefficient de poussée complète (C_x) par rapport à la courbe d'angle de vent apparent. Cela peut être fait soit en coordonnées cartésiennes (comme dans la figure 5, graphique de gauche) ou sous forme de diagramme polaire. Ces courbes fournissent une image assez complète des performances du WPT et de nombreux autres KPI discutés peuvent être obtenus à partir des graphiques (par exemple, largeur du secteur mort ou $C_{x,max}$). L'inconvénient de cette approche est évidemment qu'il ne s'agit pas d'un chiffre unique, mais d'une solution qui nécessite l'interprétation d'un expert.

Coefficient de puissance nette C_{pnet}

Un coefficient de puissance pourrait être un moyen d'inclure l'effet de la puissance consommée (PTI) et la puissance que le WPT peut fournir au navire. Cela permettrait de comparer plus équitablement les appareils « actifs » et « passifs ». Idéalement, puisqu'il s'agit toujours d'un coefficient unitaire autonome, il devrait être indépendant des paramètres spécifiques au navire et de la vitesse du vent. Cependant, cela n'est pas possible à dériver. La vitesse du navire affecte le classement entre les WPT à haute efficacité et à haut rendement. De plus, pour une comparaison équitable entre les dispositifs actifs et passifs, l'efficacité propulsive du navire η_D doit être incluse. Sinon, le P_{in} est trop grand par rapport à la puissance qui peut être utilisée pour la propulsion. Une valeur standard de 0,7 pourrait être utilisée pour η_D , même si cela est également injuste pour le dispositif actif si l'efficacité réelle de propulsion est faible.

Un coefficient de puissance standard pourrait alors être dérivé comme suit :



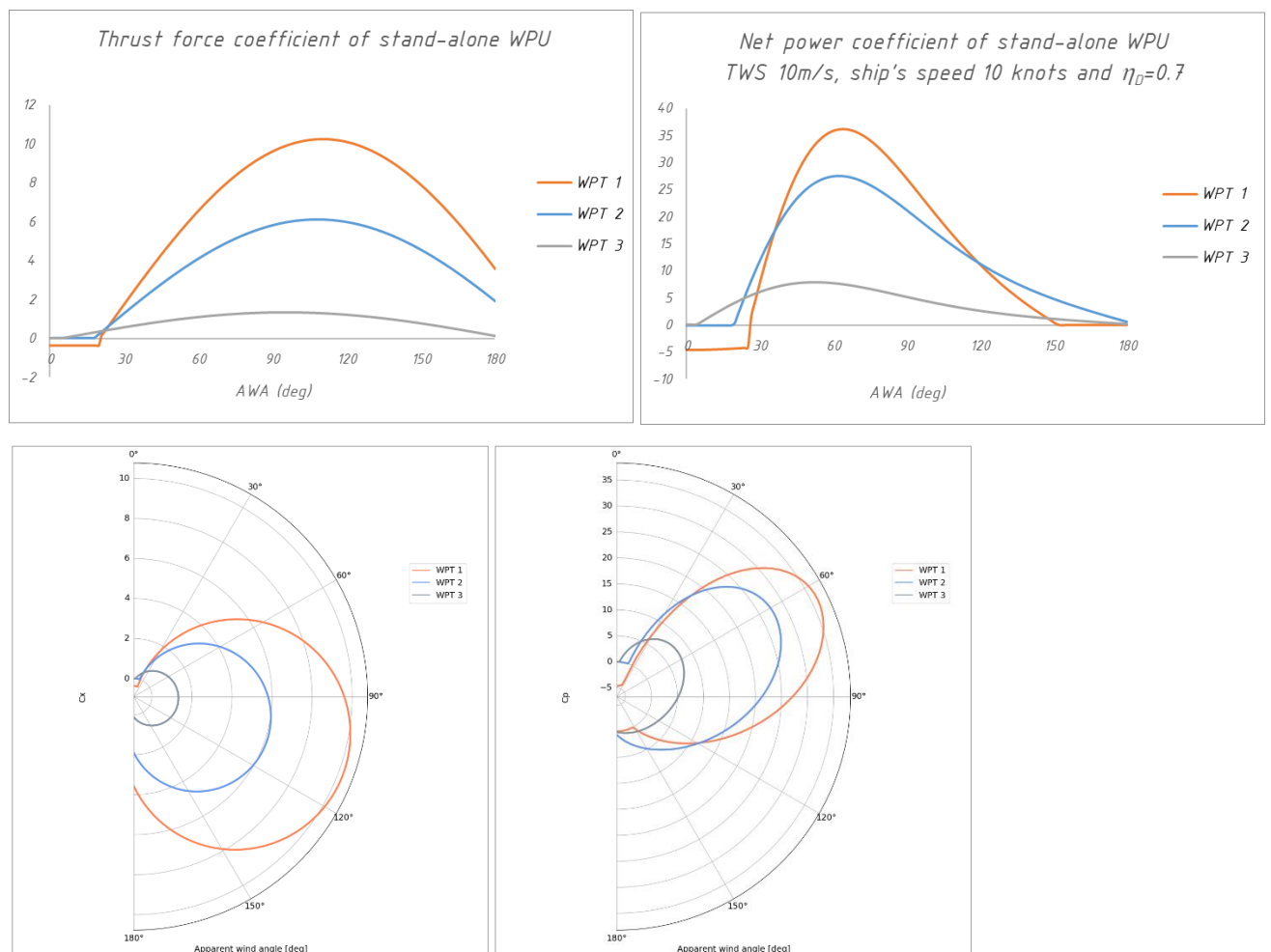
$$C_{P_{net,V_s}} = \frac{\frac{C_x}{2} \rho A \cdot AWS^2 \cdot V_s - P_{in}}{\frac{1}{2} \rho S \cdot V_s^3} \quad (2)$$

Où $\eta_D = 0,7$, S est la surface mouillée typique d'un navire.

La vitesse du navire doit être indiquée en indice dans le nom du coefficient, par exemple $C_{P_{net,10kt}}$ pour une vitesse de navire de 10 nœuds. Ce coefficient n'est pas indépendant de la vitesse du vent, il faut donc donner une vitesse de vent réelle de référence, par exemple 10 m/s.

De la même manière que pour la courbe de poussée, l'image la plus complète est donnée en présentant la $C_{P_{net}}$ courbe sur AWA ou TWA. La figure 5 (à droite) montre la courbe des trois scénarios de test. La courbe $C_{P_{net}}$ révèle une relation différente entre les WPT que la courbe C_x . En incluant la consommation d'énergie, les performances relativement inférieures au vent des dispositifs actifs WPT2 avec le plus grand besoin de puissance sont plus claires.

Les tracés sur l'angle apparent du vent peuvent être des tracés polaires ou cartésiens. Les auteurs sont d'avis que les diagrammes cartésiens présentent les différentes caractéristiques d'une manière plus claire.



Graphique 5. C_x coefficient de force de poussée (C_x) et coefficient de puissance nette (C_p) pour les cas d'essai. Avec les diagrammes cartésiens, les différences de caractéristiques peuvent être plus nettes.

4.1 c) Indicateurs de performance clés dimensionnels pour les technologies seules

Puissance WPU nominale [kW]

Les unités de propulsion par le vent sont généralement proposées dans des tailles standard. Au début de la phase de conception, lors de l'analyse du marché et de la présélection des appareils possibles, il pourrait être pratique d'avoir un indicateur facile et indépendant du navire, de la taille d'une unité ou de sa puissance. Cela pourrait être réalisé via une puissance nominale dérivée de la même manière que le « $f_{eff} \cdot P_{eff}$ » dans MEPC.1/Circ.815 (2013) [4]. :

$$Rated\ WPU\ Power_{10} = \sum_{i,j}^{n,m} \left[\frac{F_x \cdot V_s}{\eta_D} - PTI \right]_{i,j} \times [W_{i,j}] \quad (3)$$

Où

- $W_{i,j}$ est la matrice météorologique EEDI x (avant 2021)
- $\eta_D = 0,7$
- F_x est la matrice de force aux vents correspondants
- $V_s = 10$ nœuds

Les valeurs de puissance nominale pour d'autres vitesses standard des navires (par exemple 15 et 20 nœuds) peuvent être calculées de la même manière.

Ce KPI est une façon de décrire un appareil tout en incluant la taille. Il s'agit d'un nombre théorique qui donne une indication du potentiel théorique d'une unité. Il faut comprendre que cela ne tient pas compte des effets des forces latérales aérodynamiques et que l'efficacité η_D propulsive peut être différente pour un navire spécifique.

Indices de la route du vent

Une autre façon de produire un KPI dimensionnel « indépendant du navire » est d'utiliser un navire standard sur une route standard et de montrer le potentiel d'économie de carburant. Il existe toutefois un certain risque qu'une telle analyse soit interprétée à tort comme une analyse de rentabilité propre à un navire. Cela peut conduire à des conclusions trompeuses et à des décisions non fondées.

Tableau 2. Résultats des KPI de catégorie A pour les cas de test. Le vert signifie la performance la plus élevée, le rouge le plus bas.

KPI suggérés	Unité	WPT 1	Le WPT 2	WPT 3
Coefficient de portance max C_L		9.6	5.8	1.3
Coefficient de poussée max C_x		10.3	6.1	1.3
Max C_L/C_D		2.7	3.1	11.1
C_x à AWA=0 (s'il n'est pas tiltable)		-0.4	0.0	0.0
Max C_L / empreinte du pont		1.4	0.1	0,01
Secteur mort au vent, basé sur C_x	Deg	21	19	5
Secteur mort au vent, basé sur C_p (10 nœuds)	Deg	27	19	5
η_{WPU}		15%	4%	0%
Max net coefficient de puissance C_p (10 kn)		3.8	2.9	0.7
Puissance WPU nominale (9 nœuds)	Kw	38	63	44



4.2 CATÉGORIE B : INDICES – CAS SPÉCIFIQUE DU NAVIRE SUR L'ITINÉRAIRE GÉNÉRIQUE

Plusieurs indices de cette catégorie existent déjà (par exemple EEDI, EEXI [2,4]) et d'autres sont en cours d'élaboration. Il est prévu que le règlement sur l'EEDI soit révisé au cours des prochaines années. Le présent document se concentre principalement sur les indicateurs de performance réels du type de catégorie C, qui seront examinés dans la section suivante.

Nous limitons donc ci-dessous la discussion des indicateurs de catégorie B aux controverses autour de la « matrice météorologique ». Dans les orientations EEDI/EEXI actualisées sur le traitement des technologies innovantes d'efficacité énergétique à partir de 2021 [2], 50 % des conditions de vent les plus défavorables peuvent être supprimées de la matrice météorologique, c'est-à-dire ignorées aux fins de la classification EEDI.

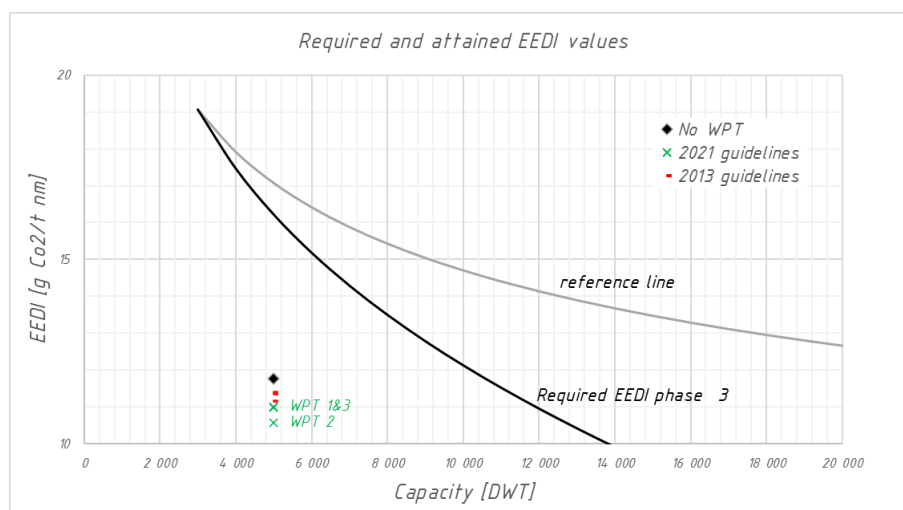
Comme on peut le voir dans le tableau 2, cela modifie le classement entre WPT1 et WPT3 (en raison des caractéristiques aérodynamiques différentes décrites dans la section précédente), même si les différences entre eux sont marginales.

Pour cette raison, certains membres de l'industrie critiquent la version 2021 du règlement pour n'être pas technologiquement neutre. D'autres voix appuient le changement, avec l'argument selon lequel l'élimination des conditions météorologiques défavorables reflète de meilleures opérations des navires utilisant le routage météorologique.

La formule EEDI peut également être critiquée pour ne pas inclure les effets de force secondaires, ce qui, en théorie, ne permet pas un traitement équitable de tous les types de WPT. Pour la propulsion assistée par le vent modéré, cela est négligé, mais pour les installations plus puissantes et pour les navires à propulsion par le vent primaire, l'équation simplifiée n'est pas appropriée.

Tableau 3. Valeur EEDI/EEXI pour un navire fictif doté de trois technologies de propulsion par le vent différentes, selon les règlements de l'OMI avant et après 2021. La révision 2021 peut modifier la vitesse entre des appareils de performances similaires (comme WPT1 et WPT3).

Règlement de l'OMI	Unité	WPT 1	Le WPT 2	WPT 3
MEPC.1/Circ.896, (OMI, 2021)	g CO ₂ /(t*nm)	10.97	10.57	11.01
MEPC.1/CIRC.815 (OMI, 2013)	g CO ₂ /(t*nm)	11.40	11.16	11.35



Graphique 6. Valeur EEDI/EEXI pour un navire fictif avec 3 technologies de propulsion par le vent différentes.



4.3 CATÉGORIE C – ATTENTES DE PERFORMANCE POUR UN NAVIRE ET UNE ROUTE SPÉCIFIQUE

4.3 a) Économie d'énergie, économie de carburant, ou économie de CO₂ ?

L'objectif des indicateurs de cette catégorie est de communiquer une attente réaliste quant au potentiel d'économie d'un WPT. Ils sont généralement utilisés comme aide à la décision pour les analyses de rentabilité ou pour les accords entre les parties prenantes commerciales.

L'économie due à un WPT en termes absolus peut être exprimée en puissance, en carburant, en énergie ou en économie de CO₂. Bien que ce choix n'affecte pas le classement entre les WPT pour le même navire, il peut faire une différence dans la mesure dans laquelle un KPI résonne avec les différentes parties prenantes de l'industrie du transport maritime. Les propriétaires et les exploitants ont tendance à penser en tonnes de stockage par jour, les ingénieurs sont plus familiers avec l'énergie ou les chiffres basés sur l'énergie, les législateurs se concentreront principalement sur les économies de CO₂.

Si nous considérons les navires équipés de moteurs diesel conventionnels et d'économies d'énergie pour des vitesses opérationnelles constantes, il existe une relation presque linéaire entre la puissance prévue, le carburant et les économies d'énergie. Cela permet une conversion facile entre les expressions enregistrées en post-traitant simplement les résultats de simulation d'itinéraire.

Pour les systèmes de propulsion hybrides, et si l'optimisation du routage et de la vitesse est incluse, la relation n'est pas si simple et doit être modélisée dans la simulation de voyage. Certains des avantages et des inconvénients des différentes unités d'épargne sont résumés ci-dessous.

Ces points ont été soulevés lors des discussions avec les intervenants de l'industrie.

Économie de carburant

- Les armateurs peuvent se rapporter au carburant (tonnes/jour et kg/h).
- Tonnes/miles facilite la mise à l'échelle vers différents itinéraires.
- Peut être utilisé dans une période de transition où HFO est toujours la norme dans l'expédition.
- Besoin d'une modélisation de l'efficacité des machines ou de stipulation d'une consommation spécifique fixe de fuel (COAS).
- Pas facile pour les systèmes de propulsion hybrides.

Économie d'énergie

- L'utilisation de l'énergie de propulsion au lieu du carburant permet de laisser de côté l'efficacité du moteur.
- Pour des cas spécifiques, les propriétaires de navires peuvent le traduire en gain en fuel eux-mêmes.
- Plus de pérennité en tenant compte des carburants futurs.

Économies CO₂ évitées

- Paramètre évalué dans le cadre de l'EEDI, du CII et des systèmes d'échange de quotas d'émission/
- Intérêt pour la société au sens large.

Gain en puissance



- La puissance de propulsion est une mesure que les chantiers, les concepteurs, les armateurs et les exploitants connaissent bien.
- Il ne nécessite aucune modélisation du rendement du moteur ni aucune hypothèse de carburant et de propulsion hybride.
- Les fournisseurs de WPT ne disposent pas toujours d'informations sur les détails du système de propulsion ou de l'efficacité du moteur. Dans ce cas, la puissance constitue une option sûre pour la prédiction d'économie.

Compte tenu de ces avantages et inconvénients, il semble que le « gain en puissance » soient le moyen le plus réalisable d'exprimer les performances du WPT et constituent également un concept familier aux propriétaires et aux exploitants. Dans cet article, nous nous concentrerons donc dans ce qui suit sur les KPI basés sur la puissance.

4.3 b) KPI pour les gains

Un certain nombre de KPI possibles sont suggérés ci-dessous, et les résultats correspondants pour les cas tests sont donnés dans le tableau 4.

On suppose qu'un gain ΔP en énergie a été calculé à l'aide d'un modèle numérique ou d'une formule.

Nous ne discuterons pas ici des méthodes de prédiction en tant que telles, mais nous nous concentrerons sur la façon dont les résultats pourraient être présentés.

Tableau 4. KPI exprimant l'attente de gain en puissance les cas fictifs de test. EEDI signifie matrice météorologique d'avant 2021.

Le vert signifie la performance la plus élevée, le rouge le plus bas.

	Unité	Route	Vitesse du navire (nœuds)	WPT 1	Le WPT 2	WPT 3
Puissance WPU nominale / Puissance propulsive du navire	%	EEDI	9	4.3%	7.1%	4.9%
ΔP sur des parties de trajet, eau calme	%	EEDI	9	6.0%	9.7%	6.0%
	%	Rot-Bergen	9	8.6%	13.2%	8.0%
	%	Rot-Bergen	13	4.5%	7.3%	4.4%
	%	Cop-Riga	9	6.1%	9.7%	6.0%
	%	NY-Royaume-Uni	9	10.2%	16.1%	9.5%
ΔP sur des parties de trajet, y compris S.M.	%	EEDI	9	5.3%	8.7%	5.4%
	%	Rot-Bergen	9	7.4%	11.6%	7.1%
	%	EEDI	9	4.5%	7.2%	4.5%



	Unité	Route	Vitesse du navire (nœuds)	WPT 1	Le WPT 2	WPT 3
ΔP vs Total consommation de carburant	%	Rot-Bergen	9	6.2%	9.7%	5.9%
ΔP max, TWS=10m/s	%		9	27%	37%	19%
ΔP max, TWS=10m/s	Kw		9	258	345	180
ΔP de conception	Kw		9	170	233	160
ΔP météo la plus probable	Kw	Rot-Bergen	9	92	104	100
ΔP météo la plus probable	Kw	Cop-Riga	9	-7	11	0
ΔP moyenne annuelle, sur des parties de trajet, incl. vagues	Kw	EEDI	9	57	91	56
	Kw	Rot-Bergen	9	80	124	76
	Kw	Rot-Bergen	13	102	165	99
	Kw	Cop-Riga	9	57	91	56
	Kw	NY-Royaume-Uni	9	95	151	90

Pourcentage

Le pourcentage d'économie de carburant est le KPI le plus courant dans les communications autour de la propulsion par le vent aujourd'hui. On pourrait penser qu'un pourcentage d'économie est un KPI clair qui peut être utilisé pour la comparaison entre différentes installations, car il est adimensionnel. Souvent, les demandes de gain en pourcentage sont publiées sans autre description des cas spécifiques. Il s'agit toutefois d'une approche problématique.

La première question est de savoir ce que les économies ont été liées, c'est-à-dire quel nombre avoir dans le dénominateur. Le graphique de gauche de la figure 7 montre le pourcentage d'économie d'énergie des trois scénarios de test calculés de différentes manières. Tout d'abord, l'économie de carburant est prévue pour les tests en eau calme. La puissance de propulsion du navire lorsqu'il utilise le WPT est comparée à la puissance de propulsion lorsqu'il n'y a pas de WPT, pour la même étape maritime et la même vitesse :

$$\Delta P\% = \frac{P_{no\ WPT} - P_{with\ WPT}}{P_{no\ WPT}} \quad (4)$$

Deuxièmement, le Sea Margin, ou la résistance supplémentaire dans les vagues, est incluse dans la prédiction. Il s'agit des procédures standards pour certaines organisations, tandis que d'autres ne l'incluent pas. Il a un effet significatif sur les économies de carburant ou d'énergie prévues en termes absolus (tonnes, kW), mais il a un effet significatif sur le pourcentage, puisqu'il augmente le dénominateur en eq (4). Pour WPT2, par exemple, cela fait passer l'économie de 13% à 11,5%.



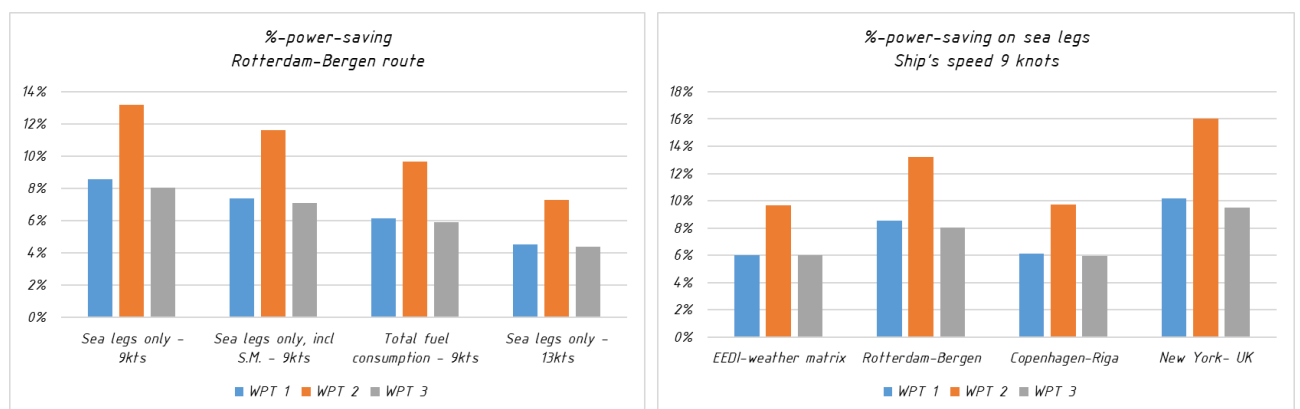
Pour le troisième groupe de chiffres de la figure 7, la comparaison est effectuée par rapport à la consommation totale de carburant du navire, c'est-à-dire pas seulement au carburant utilisé pour la propulsion. Le dénominateur comprend donc les manœuvres portuaires, la charge hôtelière, etc. Cela fait que l'économie diminue encore plus, à 10% pour le WPT2. Il convient de noter que les tendances entre les WPT sont préservées : dans tous les cas, le WPT 2 reste le « gagnant ».

Enfin, le pourcentage d'économie est également indiqué pour une vitesse de navire plus élevée, 13 nœuds, pour illustrer à quel point cela peut affecter le nombre d'économies. L'économie est maintenant tombée à 7%. Les tendances sont toujours les mêmes, mais il ne s'agit pas d'une conclusion générale puisque certaines technologies fonctionnent mieux pour des vitesses plus élevées que d'autres.

La figure 7 montre que les économies d'énergie diffèrent considérablement d'un itinéraire à l'autre. Pour le WPT2, par exemple, l'économie d'énergie est de 10 % pour l'itinéraire le moins favorable et de 16 % pour le plus favorable. Les tendances entre les trois WPT sont préservées, bien que l'avantage du WPT1 par rapport au WPT3 diffère d'un itinéraire à l'autre.

Ces exemples illustrent qu'un pourcentage d'économie, retiré de son contexte, peut être trompeur. Un nombre de pourcentage donne la fausse impression qu'il peut être universellement comparé à d'autres prédictions d'économie en pourcentage. Pour les raisons évoquées ici, tous les partenaires de l'industrie participant à l'étude sont sceptiques quant à l'utilisation de ce KPI.

Elle pourrait toutefois être utile en tant que limite, par exemple lorsqu'une règle est applicable ou non.



Graphique 7. Le pourcentage d'économie d'énergie peut être calculé de différentes manières et pour différentes conditions, ce qui se traduit par des attentes différentes en matière de rendement.

Estimation précoce

Dans la section précédente sur les KPI de catégorie A, une « puissance du WPU » a été définie dans le but d'être utilisée dans l'estimation très précoce du potentiel d'économie. En comparant la puissance WPU nominale avec la puissance propulsive du navire à la même vitesse du navire, nous pouvons obtenir une estimation approximative du potentiel d'économie d'énergie. Pour les trois cas de test, cela indique une économie d'environ 7%. L'économie moyenne prévue avec plus de précision pour la météo EEDI a montré environ 10%. La puissance WPU nominale pourrait donc être utilisée comme première approximation pour économiser du carburant.

Réduction de puissance



La performance du WPT pourrait également être exprimée en réduction de puissance en kW, $\Delta P = P_{no\ WPT} - P_{with\ WPT}$. Plusieurs options pour un KPI standardisé lié à ΔP ont été suggérées par les partenaires industriels impliqués dans cette étude :

- Max ΔP pour TWS=10m/s (dans la meilleure direction du vent)
- ΔP à un « point de conception » spécifié qui pourrait être par exemple TWS 10 m/s, TWA=60 deg
- ΔP aux conditions météorologiques les plus fréquentes
- ΔP sur un itinéraire donné, une période de plus d'un an pour inclure la météo de toute la saison
- ΔP de l'équation EEDI (avant ou après 2021), mais en utilisant les statistiques météorologiques pour un itinéraire réel.

La figure 8 montre ces options pour les cas de test. L'avantage de l'option i) – iii) est que la prévision ne nécessite aucun outil d'analyse de routage. Cependant, la sélection d'un point où ΔP est extrait peut donner des prédictions importantes sur la réduction de puissance (graphique de gauche en Figure 8) par rapport à l'économie moyenne sur un itinéraire (graphique de droite sur la figure 8). Par exemple, la réduction de puissance maximale du WPT 2 est de 345kW (37%), alors que la réduction de puissance moyenne annuelle sur une route favorable est d'environ un tiers de celle-ci (124 kW, 12%). La communication de ces deux chiffres entraînerait des attentes et des analyses de rentabilité assez différentes. Le ΔP maximum donne également une comparaison trompeuse entre les dispositifs de portance élevée, comme expliqué ci-dessus à propos du maximum C_x . Le même inconvénient est vrai pour l'option permettant de dériver ΔP à un « point de conception » spécifié.

Choisir la météo la plus fréquente comme point de conception est complètement trompeur. Les conditions météorologiques les plus fréquentes pourraient bien être des vents de face, où les WPT ne peuvent même pas être utilisés.

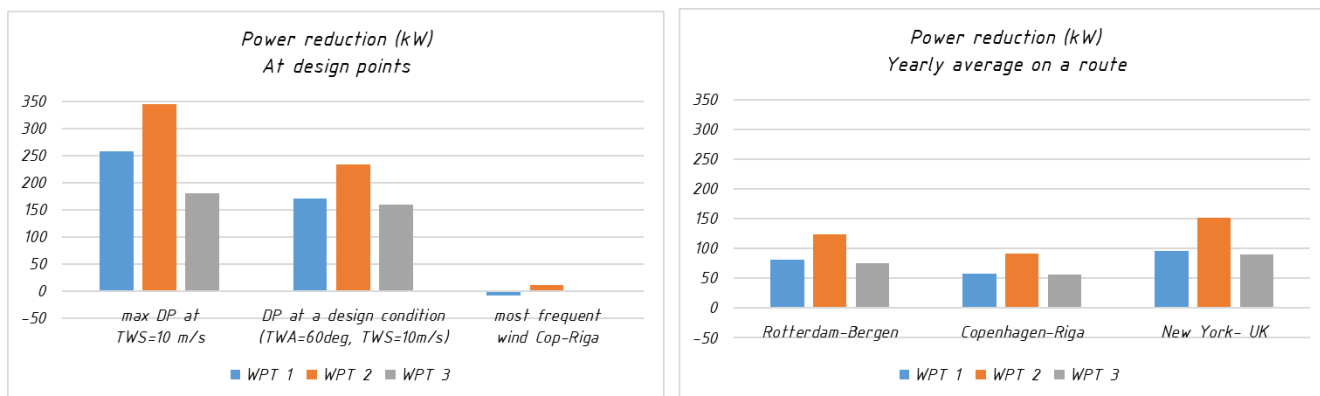
Certains partenaires de l'industrie suggèrent que ΔP soit dérivé pour un itinéraire donné, y compris l'optimisation de l'itinéraire. Cela donnerait un KPI plus favorable à tous les WPT, mais cela favoriserait surtout les dispositifs à forte portance/trainée par rapport aux dispositifs à forte portance. On peut soutenir que l'inclusion de l'optimisation des itinéraires refléterait mieux l'exploitation réelle. En revanche, on peut soutenir que le KPI devrait refléter les performances techniques et non les mesures opérationnelles. Le succès de la route dépend de facteurs tels que la compétence de l'équipage, la sécurité, les exigences logistiques, etc. Ceux-ci sont très difficiles à intégrer dans un KPI standardisé.

La solution pourrait être de distinguer clairement les KPI incluant et n'incluant pas le routage.

Potentiel d'économie d'énergie (PSP)

Peu importe la précision avec laquelle nous essayons de modéliser l'économie d'énergie sur un itinéraire, il s'agit toujours d'une valeur théorique. Les économies réelles réalisées en exploitation dépendront de nombreux aspects pratiques qui ne peuvent pas être prévus dans les prévisions, tels que le temps de maintenance, la modification de la route et de la vitesse, la modification de l'efficacité de la coque due à l'encrassement, les compétences de l'équipage, le fonctionnement du système de contrôle automatisé du WPU, le givrage et l'usure. Pour cette raison, il serait judicieux de désigner le ΔP prédit comme le « Power Saving Potential ». Cela indiquera qu'il s'agit d'un nombre idéal dérivé dans certaines conditions. Le PSP devrait pouvoir être vérifiée au cours d'un essai en mer court et contrôlé. Après cela, c'est au propriétaire, à l'exploitant et à l'équipage d'utiliser ce potentiel de la meilleure façon.





Graphique 8. Le gain peut être calculée de différentes manières et dans différentes conditions. Ce qui se traduit par des attentes différentes en matière de rendement.

4.3 c) Autres indicateurs de performance clés

D'autres indicateurs qui pourraient être exprimés dans une description ou une offre du WPT comprennent :

- La plage d'opérabilité, telle que la limitation de la vitesse du vent de pointe. Pourrait être exprimé en pourcentage de la matrice EEDI.
- L'empreinte au sol sur le pont, le tirant d'air, le poids et le centre de gravité
- Le bruit et les vibrations
- CAPEX OPEX, LCC/LCA
- Exigences en matière de formation de l'équipage

5. CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONSS

Les indicateurs clés de performance (KPI) pour les navires d'assistance par le vent ont été discutés dans un large groupe d'intervenants de l'industrie. Les besoins de l'industrie peuvent être résumés comme suit:

Il serait utile de disposer d'un ensemble d'indicateurs de performance clés convenus, en particulier pour exprimer le potentiel d'économie de carburant spécifique au navire lors de la phase d'analyse de rentabilité et d'approvisionnement.

Les KPI qui seront communiqués aux propriétaires et aux exploitants de navires devraient être tangibles pour leur entreprise.

Il serait utile que les KPI reflètent la méthode de prédiction utilisée pour calculer la valeur.

Il serait utile de disposer d'un ensemble de définitions d'indicateurs de performance clés qui soit cohérent et puisse accompagner le processus de conception du navire du stade de la conception initiale à l'étape de l'exploitation, ajoutant progressivement de plus en plus de complexité.

Sur la base des discussions et de l'étude de cas de cet article, les auteurs présentent ici leurs recommandations. Ces questions seront traitées ultérieurement par le Comité de spécialistes de l'ITTC pour les navires à propulsion par le vent et pour une inclusion future dans les langues officielles de l'ITTC. Les lecteurs qui ont des commentaires ou des suggestions supplémentaires sont les bienvenus pour contacter les auteurs.

5.1 KPI recommandés pour les unités de propulsion par le vent autonomes

Les recommandations des auteurs :

Les coefficients de la technologie seule adimensionnels sont utiles pour comprendre les caractéristiques d'un WPT, mais pas directement le potentiel d'économie de carburant. Ceci est pertinent pour les

experts travaillant avec la conception ou l'évaluation de navires propulsés par le vent. Cependant, il ne devrait pas être le premier choix lors de la communication du rendement avec la communauté en général.

Il n'existe pas de coefficient adimensionnel unique qui décrit toutes les caractéristiques importantes d'un WPT. La meilleure démonstration de l'image complète est une courbe de coefficient de puissance en fonction de l'angle apparent du vent (eq. 2).

La « puissance WPU nominale » pourrait être un moyen standard d'exprimer la puissance potentielle d'un seul appareil et de présélectionner les WPU appropriés au cours de la phase de conception initiale.

Il est important que les conditions standard pour les KPI adimensionnels soient définies, par exemple, par l'ITTC. Cela pourrait être :

- Profil de vent uniforme/rectangulaire
- Zone A définie comme zone projetée/plateforme du WPT
- Densité d'air standard de 1,204 kg/m³

5.2 KPI recommandés pour les attentes en matière de performances et l'analyse de rentabilité

La contribution du WPT à la propulsion du navire peut être exprimée sous forme de gain en puissance, d'économie de carburant, d'énergie ou de CO₂. Nous recommandons d'utiliser le gain en puissance en standard. Cependant, rien n'empêche de les montrer tous dans un rapport de prédiction.

Certains partenaires de l'industrie demandent que les KPI dérivés par différentes organisations soient véritablement compatibles les uns avec les autres, y compris en termes de méthode de dérivation. Pour s'assurer que tous les acteurs de l'industrie dérivent des indicateurs réellement comparables, il faudrait qu'une organisation puisse élaborer des procédures détaillées prescrivant des méthodes de prescription pour les simulations CFD et les tests en soufflerie. Ce n'est pas une solution réalisable. Une véritable comparaison « pomme à pomme » ne peut être réalisée que si la même plateforme de simulation est utilisée pour les cas à comparer. Cependant, nous pensons que ce serait une amélioration par rapport à la situation actuelle si l'industrie se mettait d'accord sur un certain nombre de KPI liés à certains niveaux de confiance. Dans cette section, nous présentons une suggestion sur la façon dont cela pourrait être réalisé.

Un potentiel d'économie d'énergie (PSP) est obtenu en comparant l'exigence de puissance pour un navire avec WPT par rapport au même navire sans WPT sur la même route et à la même vitesse. Cela peut être fait avec une multiplication matricielle d'une matrice météorologique ou par des simulations de voyage, dans les deux cas en utilisant des conditions météorologiques rétrospectives couvrant toute l'année. La prévision de puissance doit inclure la consommation d'énergie du WPT s'il est actif, la traînée du dispositif de ralenti s'il n'est pas inclinable et la plage d'opérabilité. Le PSP est la performance idéale, en supposant une opérabilité de 100% dans la plage de fonctionnement. L'économie réelle peut être moindre en raison de détails pratiques réels tels que les réparations, la logistique, etc. Il peut également être plus élevé, de routage intelligent et la gestion de l'énergie est utilisé à bord.

La PSP peut être dérivée à l'aide de méthodes et données d'entrée de différents niveaux de confiance. Au début de l'élaboration d'un concept ou d'une étude de faisabilité pour un réaménagement, des méthodes de faible fiabilité et des données basées sur des estimations suffisent. Au fur et à mesure que le projet avance, des prévisions plus précises sont nécessaires pour le soutien de l'analyse de rentabilisation et les attentes en matière de rendement entre le fournisseur et les armateurs. Le tableau 5 présente un système de KPI pour différents niveaux de confiance. Une description générale des méthodes de modélisation de puissance correspondante est présentée dans le tableau 6. Les détails devraient être donnés, par exemple, dans les prochaines Directives de l'ITTC.



Tableau 5. Indicateurs de performance clés recommandés pour les attentes en matière de performances et l'analyse de rentabilisation

KPI	Unité	Usage	Modélisation de puissance	Modélisation météorologique
Puissance WPU nominale	Kw	Comparaison générale, analyse du marché	Puissance du WPU seul	EEDI
PSP-I	Kw	Une première idée	Niveau I	EEDI ou itinéraire prévu du navire
PSP-II	Kw	Évaluation précoce de l'analyse de rentabilité	Niveau II	L'itinéraire prévu du navire
PSP-III	Kw	Analyse de rentabilité et attentes en matière de performances	Niveau III	L'itinéraire prévu du navire
ESP-IV	Kw	Analyse de rentabilité avancée et attentes en matière de performances	Niveau IV	L'itinéraire prévu par le navire (y compris routage possible, optimisation de la vitesse)

*) Voir tableau 6.

Les niveaux I à III sont recommandés pour les navires assistés par le vent qui n'utilisent pas le routage météorologique ou d'optimisation de la vitesse.

Le niveau IV est recommandé pour les navires qui utilisent un routage météorologique étendu, les navires à propulsion primaire par le vent et les navires dotés de systèmes de propulsion hybrides avancés. La modélisation peut inclure différents profils de vitesse et différents itinéraires pour le cas avec et sans WPT. Pour ce niveau, il est possible de déduire l'économie d'énergie plutôt que l'économie d'énergie moyenne. Pour les navires à propulsion primaire par le vent, la comparaison peut même être comparée à d'autres tailles et vitesses de navires. L'économie d'énergie devrait alors être liée à un flux de cargaison constant.

Tableau 6. Suggestion de spécification de méthode pour dériver le potentiel d'économie d'énergie à différents niveaux de confiance. Les détails doivent être donnés, par exemple, dans les Directives de l'ITCC

	Niveau I	Niveau II	Niveau III	Niveau IV
Degré de liberté (DoF)	1	4	4	4-6
Forces du WPT	Générique	Fidélité faible/moyenne*)	Haute fidélité*)	Haute fidélité
Puissance requise du WPU actif	Générique	Spécifique	Spécifique	Spécifique
Efficacité propulsive des navires	h_D fixe	Courbes de l'hélice en eau libre POW	POW + effet de la dérive sur les hélices	POW + effet de la dérive sur les hélices
Interaction WPU-WPU		Basse/moyenne fidélité	Haute fidélité	Haute fidélité

Interaction WPU-coque		<i>Basse/moyenne fidélité</i>	<i>Haute fidélité</i>	<i>Haute fidélité</i>
Effet hydrodynamique de la force latérale		<i>Basse/moyenne fidélité</i>	<i>Haute fidélité</i>	<i>Haute fidélité</i>
Talon		<i>Basse/moyenne fidélité</i>	<i>Haute fidélité</i>	<i>Haute fidélité</i>
Effets des mouvements des navires et des variations du vent, y compris le temps de réponse des systèmes de contrôle				<i>Optionnel</i>
Propulsion hybride (diesel électrique) avec optimisation de la gestion de l'énergie				<i>Optionnel</i>

*) Les méthodes de fidélité faible/moyenne peuvent être, par exemple, des données haute-fidélité ou des modèles de régression à partir de cas similaires, ou des méthodes de ligne portante spécifiques aux cas.

**) La haute-fidélité fait référence à la CFD spécifique au cas, au test sur modèle ou au test grandeur nature.

Il est recommandé de ne pas utiliser %-savings comme KPI. En cas d'utilisation, la méthode standard devrait être de comparer la puissance de propulsion avec le dispositif, y compris la consommation d'énergie, à la puissance sans WPT, tous deux dérivés avec le même outil numérique pour la même route, la même vitesse, et incluant la résistance ajoutée des vagues ou une marge de mer appropriée.

6. REMERCIEMENTS

Le travail est rendu possible grâce au financement par la région Interreg de la mer du Nord de l'UE, le projet WASP.

Les auteurs tiennent à remercier tous ceux qui ont participé aux ateliers de l'industrie ou qui ont contribué d'une autre manière avec des commentaires et des suggestions.

Les membres du *30e Comité de spécialistes de l'IFCT pour les navires à énergie par le vent et à propulsion par le vent* ont apporté leur contribution avec des idées et des discussions précieuses.

7. RÉFÉRENCES

CHOU, T., KOSMAS, V., RENKEN, K., ACCIARO, M. (2020), *New Wind Propulsion Technology - A Literature Review of Recent Adoptions*, Interreg North Sea Europe Wind Assisted Ship Propulsion (WASP) report D 5.B.

OMI, MEPC.1/Circ.896, (2021) *Orientations sur le traitement des technologies innovantes d'efficacité énergétique pour le calcul et la vérification de l'EEDI et de l'EEXI atteintes*, 2021.

WERNER, S. (2023) « *Performance Indicators for Wind Assisted Ships* », rapport RISE RE40201042-06-00-A.

OMI, MEPC.1/Circ.815 - 2013 *Directives sur le traitement des technologies innovantes d'efficacité énergétique pour le calcul et la vérification de l'EDI E atteint* (MEPC.1/CIRC.815, 2013)



8. BIOGRAPHIE DES AUTEURS

Le Dr Sofia Werner, chercheuse principale au sein des navires éoliens chez RISE Maritime (anciennement SSPA), est responsable de la recherche et du développement de méthodes au sein des navires éoliens à la SSPA. Son expérience antérieure comprend les essais de réservoirs de remorquage et la conception de navires à l'aide de CFD. Elle préside actuellement le 30e Comité de spécialistes de l'IFCT pour les navires à énergie par le vent et par le vent.

Le Dr Frederik Gerhardt occupe actuellement le poste d'architecte naval principal chez RISE (anciennement SSPA). Il est responsable du développement du secteur d'activité de RISE Wind-Powered Ships. Son expérience antérieure comprend des essais de tenue en mer et de manœuvre ainsi que des recherches sur l'aérodynamique des yachts. Il préside actuellement le 30e Comité de l'entretien en mer de l'IFCT.

Le Dr Stavros Kontos occupe actuellement le poste de spécialiste principal de la simulation chez RISE. Il est responsable du développement du module de propulsion par le vent de SEAMAN-Winds et de l'évaluation des performances des navires assistés par le vent. Son expérience antérieure comprend le développement de méthodes numériques pour la modélisation hydrodynamique des vagues et des structures flottantes.



Annexe 5 – Liste des terminologies communes bâties avec le projet WASP

Concept	Définition
Démarche d'évaluation des performances	Suite d'actions menées selon une méthode en utilisant des outils de simulation ou de mesure pour déterminer les gains liés à l'utilisation d'une technologie
Polaire	Représentation graphique angulaire d'une grandeur physique (vitesse, puissance...). Il est important de toujours préciser de quelle polaire il est question : polaire de performance du système vélique seul, du [navire + système vélique], etc.
Système vélique	Un ou plusieurs gréements d'une ou plusieurs technologies de voile ou d'aile installées sur un navire.
ROI	Le retour sur investissement (ROI) est un ratio financier utilisé pour calculer l'avantage qu'un investisseur recevra par rapport à son coût d'investissement. ROI = Bénéfice net / Coût de l'investissement ou ROI = Gain d'investissement / Base d'investissement
Méthode	Une procédure, une technique ou un mode d'enquête systématique employé par ou propre à une discipline particulière
Métrique	Un étalon de mesure
Modèle	Cadre mathématique permettant une représentation simplifiée d'un effet physique
Jumeau numérique	Assemblage de modèles permettant de rendre compte des différentes physiques mises en jeu dans l'opération d'un navire.
Simulation numérique	Solveur qui met en œuvre les modèles pour obtenir des données



Procédure	Processus suivi pour conduire une expérience, succession d'opérations à exécuter pour accomplir une tâche déterminée
Loi	Énoncé d'un ordre ou d'une relation de phénomènes qui, pour autant qu'il soit connu, est invariable dans les conditions données
Cadre	Une structure conceptuelle de base
Norme	Règle, principe, critère auquel se réfère tout jugement Standard de développement ou de réalisation établie généralement dérivée de la réussite moyenne ou médiane d'un grand groupe



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- G. Bordogna, A.A.K. Rijkens, N.J. van der Kolk, 2022. Performance evaluation of a flettner rotor with a flap.

Cet article présente une analyse intégrée du concept de rotor Flettner + Flap. Le rotor Flettner est un cylindre rotatif qui, en raison de l'effet Magnus, peut générer des forces aérodynamiques importantes par rapport à sa surface. Malheureusement, outre la portance, cela inclut une force de traînée substantielle, ce qui se traduit par des performances sous-optimales si l'on considère le rapport portance/traînée. Le rapport entre la portance et la traînée d'un propulseur éolien est un facteur déterminant pour les performances au vent. Un navire assisté par le vent navigue généralement à la voile et au moteur, opérant le plus souvent dans des conditions de vent apparent au près, dans lesquelles les performances du rapport portance/traînée du rotor Flettner pourraient être un manque à gagner. Le concept Flettner Rotor+Flap est une modification de la conception du rotor Flettner standard. Le volet, qui peut être réglé à n'importe quelle position angulaire autour du rotor, permet de fixer le point de séparation. Cela améliore les propriétés aérodynamiques du rotor Flettner, en particulier son rapport portance/traînée. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel de prédiction des performances Pelican de Blue Wasp, montrent que le volet augmente significativement la poussée aérodynamique générée par le rotor Flettner pour des conditions de navigation au vent. L'amélioration de l'efficacité du rotor Flettner + volet en termes de portance et de traînée se traduit également par un angle de virement de bord plus faible, ce qui signifie que le navire est en mesure de naviguer plus près du vent, augmentant ainsi son profil opérationnel. Des différences d'angles de virement de bord d'environ 15 degrés sont signalées. L'évaluation d'une route maritime en mer du Nord montre que la différence d'économie de carburant entre un navire déployant le rotor Flettner+Flap et le rotor Flettner standard peut atteindre 35 %.

- L Khan, JJR Macklin, BCD Peck, O Morton, JB RG Souppez,2021. A review of wind-assisted ship propulsion for sustainable commercial shipping: latest developments and future stakes.

Avec la crise actuelle du réchauffement climatique et les préoccupations contemporaines en matière de durabilité, l'industrie du transport développe et met en œuvre de nouvelles solutions pour réduire les gaz à effet de serre. Avec près de 90% des marchandises mondiales dépendant du transport maritime, responsable de 3% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) liées à l'énergie en 2019, il est essentiel de réduire les émissions. La dernière législation de l'Organisation Maritime Internationale a imposé des objectifs encore plus sévères en matière d'oxyde de soufre. D'autre part, l'intensité des émissions de CO₂ devra être réduite de 70 % en 2050, par rapport aux chiffres de 2008. Alors que les mesures d'exploitation et les carburants alternatifs sont adaptés à court terme pour répondre à ces nouvelles contraintes réglementaires, à mesure que l'utilisation des carburants fossiles diminue, la solution à long terme semble résider dans les navires assistés par le vent. Pour relever le défi des émissions des navires, un éventail de stratégies a été mis en œuvre. Celles-ci peuvent être classées en solutions opérationnelles et technologiques. Par conséquent, cette étude vise à identifier des solutions viables qui pourraient réduire les émissions, en se concentrant sur trois technologies importantes, à savoir les voiles, les rotors et les cerfs-volants. En outre, cet examen fournit des conseils sur les avantages et les risques associés à chaque technologie et recommande des lignes directrices pour la prévision des performances et les contraintes associées. Enfin, les enjeux futurs de la propulsion assistée par le vent sont mis en évidence, notamment la nécessité d'une validation à grande échelle, le défi de l'évaluation de l'impact environnemental et économique et les problèmes structurels associés aux systèmes de propulsion assistée par le vent.

- Guillaume Verdier,2004. Historique des Bassins de carène.

L'auteur retrace l'histoire des bassins de carène et de l'étude des performances en bassin.

- Thomas Sauder, Sverre A. Alterskjær,2022. Hydrodynamic testing of wind-assisted cargo ships using a cyber-physical method. Ocean Engineering, 243: 1-16.



Une nouvelle méthode empirique pour étudier les cargos assistés par le vent est présentée. Le modèle physique du navire, y compris les unités de propulsion, interagit en temps réel avec un modèle numérique de voile pendant les essais en marche libre. Les charges provenant des voiles (virtuelles) sont appliquées sur le modèle physique à l'aide d'un robot actionné par câble. Toutes les composantes des charges, à l'exception du pilonnement, sont appliquées avec une précision et une répétabilité élevée. La méthode est décrite en détail et appliquée pour étudier les avantages de l'assistance du vent sur un vraquier de 190 m, équipé de quatre voiles de rotor. Les indicateurs clés de performance pour l'assistance du vent sont établis lors de la navigation dans des profils de vent stable de différentes directions et vitesses, et une analyse de propulsion est effectuée. Une conclusion importante est que l'augmentation de la résistance hydrodynamique due au gîte, à la gîte et au gouvernail (qui équilibrent les charges transversales des voiles) est plutôt limitée pour ce navire, sauf lorsqu'il navigue au près par vent fort. Il est également démontré que les expériences dans un environnement de vent instable (virtuel) peuvent être menées avec succès. L'effet des turbulences sur les mouvements de ce navire est très limité. La conclusion discute des autres types d'études qui peuvent être permises par cette nouvelle méthode empirique cyber-physique.

- Tillig, F., Ringsberg, J. ,2020. Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships. *Ocean Engineering*, 211: 1-23. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107603>

Cette étude présente une nouvelle approche pour capturer analytiquement les effets d'interaction aérodynamique et hydrodynamique sur les navires assistés par le vent. Les effets d'interaction aérodynamique sont capturés en résolvant analytiquement l'équation de Navier-Stokes pour un écoulement potentiel incompressible. Les méthodes développées sont mises en œuvre dans un modèle de prévision des performances à 4 degrés de liberté appelé "ShipCLEAN", y compris une méthode nouvellement développée pour le contrôle du régime des rotors Flettner sur un navire afin de maximiser les économies de carburant. La précision du modèle est prouvée par une vérification sur modèle et en grandeur réelle. Pour présenter la variabilité du modèle, deux navires d'étude, un pétrolier et un roulier, sont équipés d'un total de 11 arrangements différents de rotors Flettner. Les économies de carburant et les temps de retour sur investissement sont évalués en utilisant des conditions météorologiques réalistes de navires voyageant sur une route de l'océan Pacifique (pétrolier) et de la mer Baltique (roulier). Les résultats vérifient l'importance d'utiliser un modèle de performance de navire à 4 degrés de liberté, l'interaction aérodynamique et hydrodynamique et l'importance de contrôler le régime de chaque rotor individuellement. Des économies de carburant de 30 % pour le pétrolier et de 14 % pour le roulier.

- Nicholas Jonas VAN DER KOLK,2020. Sailing Efficiency and Course Keeping Ability of Wind Assisted Ships.

L'article débute par une discussion sur la physique des voiliers et les aspects de modélisation. Les deux chapitres suivants, représentant l'essentiel du travail de cette thèse, sont consacrés à l'acquisition des données de performances des navires en appui à cette modélisation. Dans la mesure du possible, les performances de navigation pour les coques et la configuration des appendices ont été analysées à l'aide d'un outil de simulation de dynamique des fluides computationnelle Navier Stokes (RANSCFD) moyenné par le nombre de Reynolds. De plus, des données empiriques pour un vaste ensemble de variations systématiques des appendices pour les navires assistés au vent ont été recueillies comme décrit. Enfin, l'article développe une évaluation technico-économique de l'aide éolienne dans le contexte actuel du marché et de la réglementation.

- Van der Kolk, Nico; Bordogna, Giovanni; Mason, J.C.; Desprairies, P.; Vrijdag, Arthur,2019. Case study: Wind-assisted ship propulsion performance prediction, routing, and economic modelling.

Dans cet article, un modèle de navire pour la performance des navires assistés par le vent est combiné avec un outil de routage pour évaluer les économies de carburant disponibles grâce à l'installation d'un et de deux rotors Flettner lors d'un voyage le long d'une route du Grand Cercle. Le tout est associé à une analyse économique pour évaluer la viabilité commerciale de ces concepts hybrides. L'étude de cas est réalisée en collaboration avec les chantiers navals DAMEN, qui ont fourni une conception pour un concept d'assistance éolienne pour naviguer dans la mer Baltique, qui, depuis janvier 2015, est une zone de contrôle des émissions où une teneur limite en soufre de 0,1 % est appliquée aux carburants des navires. Les résultats de cette étude de cas sont présentés en termes d'économies de carburant et



d'analyse du délai de récupération, le cas de référence étant un navire identique naviguant sans propulseurs éoliens. Pour le cargo général de 5 150 tpl naviguant à une vitesse de 10 nœuds, des économies moyennes de carburant de 2,99 % ont été obtenues en mer Baltique pour le scénario Flettner simple, et de 6,11 % pour le scénario Flettner double. Une discussion des principales contraintes d'ingénierie et de conception pour ces navires est incluse.

- Sofia Werner, Jonny Nisbet, Fredrik Olsson, 2022. Sea Trial Methodology for Wind Assisted Ships.

La technologie de la propulsion par le vent a le potentiel de réduire considérablement la consommation de carburant des navires de charge et d'améliorer l'EEDI/EEXI. Le nombre d'installations de propulsion éolienne devrait augmenter rapidement dans les années à venir, et donc le nombre de technologies et de fabricants différents. Ce développement nécessite des procédures standardisées pour la validation des performances des technologies de propulsion par le vent en grandeur nature. Cependant, de telles procédures standardisées ou directives font encore défaut. Cet article propose une méthodologie basée sur des essais en mer de courte durée, combinée à la modélisation numérique des jumeaux et à l'analyse statistique des voyages. La méthode est démontrée à l'aide d'essais en grandeur réelle pour trois navires de charge dotés d'une technologie de propulsion par le vent. Différentes stratégies de conduite et d'analyse des essais sont discutées.

- Wind Assisted Ship Propulsion. WP4. D2.B. Matériel éducatif. (2021)
<https://northsearegion.eu/wasp/>

Le PowerPoint décrit le projet WASP cofinancé par le programme Interreg de la région de la mer du Nord de 2014 à 2020 : Introduction à la propulsion par le vent de navires, applications dans la navigation, technologies, adoption par les navires commerciaux, exemples d'études de cas, transition verte vers la décarbonisation dans l'industrie maritime, obstacles, réglementations visant à promouvoir les technologies de propulsion par le vent; aperçu du projet WASP, objectifs clés et cycle, structure du projet, présentation du lot 3 : Ingénierie de la propulsion par le vent, du lot 4: Surmonter les obstacles commerciaux et réglementaires, navires et installations et du lot 5 : Fonctionnement de la propulsion par le vent, présentation des technologies et performances, résultats des lots, indicateurs de résultat et de sortie.



INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1: Définitions clés du projet NORVENT	9
Tableau 2: Niveaux de maturité de projet représentés par le projet WASP	13
Tableau 3: Répondants au questionnaire	14
Tableau 4: Besoins des utilisateurs de performances	17
Tableau 5: Besoins des évaluateurs de performances.....	19
Tableau 6: Liste d'indicateurs clés de performance proposée en atelier.....	28

FIGURES

Figure 1: Catégorie de besoins des utilisateurs d'évaluation de performances.....	10
Figure 2: Représentation des étapes de projet.....	11
Figure 3: Echelle des croisements catégorie de besoin / maturité de projet	12
Figure 4 - Catégories de besoins des utilisateurs de performance projet WASP	12
Figure 6: Démarche de prédiction de performances	22
Figure 7 - Les effets physiques en jeu dans le système [navire + système vélique].....	23



SIGLES ET ACRONYMES

ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AFPIA	Association pour la Formation Professionnelle dans les Industries de l'Ameublement
CFD	Computational Fluid Dynamics
CAPEX	Les CAPEX ou dépenses d'investissement (de l'anglais capital expenditure) se réfèrent aux immobilisations, c'est-à-dire aux dépenses qui ont une valeur positive sur le long terme.
EEDI	Indice de conception de l'efficacité énergétique d'un nouveau navire
EEXI	Indice de rendement énergétique des navires existants
ITTC	Intertional Towing Tank Conference
OPEX	Les OPEX ou dépenses d'exploitation (de l'anglais operational expenditure) sont les charges courantes pour exploiter un produit, une entreprise, ou un système.



L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



Projet NORVENT

Le projet NORVENT a pour objectif de réaliser un état des lieux des besoins et des démarches utilisées pour l'évaluation des performances des systèmes de propulsion des navires par le vent. Il constitue la première étape d'une harmonisation des évaluations, afin de crédibiliser fortement les résultats produits auprès des utilisateurs de ces services, un enjeu régulièrement relevé par les acteurs du secteur.

NORVENT s'est appuyé sur une collecte de données et des entretiens auprès des utilisateurs des résultats de prédiction de performances (armateurs, financeurs, bureaux d'étude, fournisseurs d'outils numériques et d'évaluations de performances, motoristes, développeurs de technologies, architectes navals et concepteurs), ainsi qu'à l'organisation d'un atelier d'échange collectif afin de produire une note de synthèse et des recommandations.

Bureaux d'études, centres d'essais et laboratoires de recherche universitaires travaillent à l'évaluation des performances des systèmes de propulsion des navires par le vent. Ces évaluations ne font pas encore l'objet d'une harmonisation : méthodes, modèles de simulation numériques et phénomènes physiques pris en compte sont choisis par l'évaluateur au cas par cas. Le projet NORVENT a procédé à un premier état des lieux de ces démarches d'évaluation des performances afin de commencer à forger une vision commune.

