



**DISCUSSIONS STRUCTURÉES SUR LE COMMERCE ET LA DURABILITÉ
ENVIRONNEMENTALE ("DISCUSSIONS STRUCTURÉES")**

COMMUNICATION PRÉSENTÉE PAR LE ROYAUME-UNI

La communication ci-après, datée du 23 mai 2023, est distribuée à la demande de la délégation du Royaume-Uni.

ÉNERGIE ÉOLIENNE EN MER

Note technique présentée par le Royaume-Uni

Table des matières

1 INTRODUCTION	2
1.1 Résumé analytique	2
1.2 Importance de l'énergie éolienne en mer pour la réalisation des objectifs d'atténuation des changements climatiques.....	2
1.3 Considérations relatives au cycle de vie concernant les turbines éoliennes en mer	3
2 RÔLE DES SERVICES.....	4
2.1 Services techniques	4
2.2 Services auxiliaires	4
2.3 Obstacles au commerce des services	5
3 DIAGRAMMES DE CHAÎNES DE VALEUR.....	6
3.1 Turbine éolienne.....	8
3.1.1 Nacelle	8
3.1.2 Rotor	11
3.1.3 Mât.....	13
4 EXEMPLES DE SERVICES (TECHNIQUES ET AUXILIAIRES) INTERVENANT DANS LE CYCLE DE VIE D'UN PROJET ÉOLIEN EN MER.....	15

1 INTRODUCTION

1.1 Résumé analytique

La présente note examine les marchandises et services associés à la production et au commerce de l'énergie éolienne en mer. Nous commençons par replacer dans son contexte la présente étude, en résumant l'importance de la technologie de l'énergie éolienne en mer pour répondre aux objectifs d'atténuation des changements climatiques, en particulier celui d'émissions nettes nulles. Nous décrivons les services environnementaux qui sont importants tout au long du cycle de vie de l'énergie éolienne en mer et prenons note de certains obstacles au commerce. Nous élaborons également des "diagrammes de chaînes de valeur" spécifiques (bien qu'indicatifs), décrivant les marchandises et services tout au long des phases du cycle de vie de l'énergie éolienne en mer. Le présent document contient trois diagrammes de chaînes de valeur. Un ensemble plus complet de diagrammes couvrant l'ensemble du cycle de vie figure dans une annexe distincte (INF/TE/SSD/W/26/Add.1).

Nous espérons continuer d'étoffer le présent rapport, en partageant, dans le cadre des Discussions structurées, des renseignements additionnels portant sur d'autres obstacles au commerce et d'autres idées de mesures pouvant être adoptées pour les surmonter.

Le présent rapport individuel fait suite à la note technique antérieure présentée par le Royaume-Uni intitulée "Élaboration de notre base d'éléments factuels concernant les biens environnementaux"¹, partagée dans le cadre des Discussions structurées en mars 2023.

1.2 Importance de l'énergie éolienne en mer pour la réalisation des objectifs d'atténuation des changements climatiques

Les solutions d'énergie éolienne seront importantes pour la réalisation des objectifs d'atténuation des changements climatiques du fait qu'elles réduiront les émissions de gaz à effet de serre en remplaçant la production d'énergie thermique et en réduisant les coûts d'exploitation par rapport à la production d'électricité basée sur les combustibles fossiles.

Il est bien connu que l'énergie éolienne a un impact positif important qui contribue à la réalisation des objectifs environnementaux. Il est fait référence ci-après à plusieurs ressources utiles et crédibles qui appuient cette idée. Nous prévoyons que les arguments en faveur de l'énergie éolienne pourront être revus, et que d'autres éléments factuels pourront être ajoutés au présent document dans de futures versions.

Le **Centre-Réseau des technologies climatiques (CRTC) des Nations Unies** indique clairement que, du fait de la nature renouvelable de l'énergie éolienne, de la grande disponibilité des ressources et du caractère relativement perfectionné de la technologie, les technologies éoliennes ont le potentiel d'apporter une contribution importante aux efforts d'atténuation des changements climatiques. L'adoption de l'énergie éolienne peut remplacer la production des centrales thermiques, ce qui peut éviter des augmentations des émissions de CO₂.²

Project Drawdown documente l'impact des solutions d'énergie éolienne en mer en matière de croissance de la production d'énergie et de prévention des émissions de GES dans le monde:

"Les turbines éoliennes en mer, passant d'une puissance actuelle estimée de 60 térawattheures à une puissance comprise entre 1 850,04 et 2 175,56 térawattheures d'ici à 2050, pourraient permettre d'éviter entre 10,22 et 9,89 gigatonnes d'émissions de gaz à effet de serre."

L'**Agence internationale de l'énergie (IEA)** souligne que même si l'éolien en mer représente une petite fraction de la production actuelle d'électricité, il est important de donner la priorité aux efforts dans ce domaine étant donné que les améliorations de la technologie et des réductions drastiques des coûts font qu'il est collectivement réalisable d'exploiter le potentiel quasiment illimité du vent. En effet, l'IEA a fait état d'une croissance record de la production d'électricité éolienne en 2021 (en

¹ [INF/TE/SSD/W/23](#).

² <https://www.ctc-n.org/technologies/offshore-wind>.

hausse de 273 TWh ou 17%) – soit 55% de plus qu'en 2020, et la croissance la plus élevée enregistrée parmi toutes les technologies d'électricité renouvelable.³

Tant l'**Agence internationale pour les énergies renouvelables** (IRENA) que l'IEA ont dit que, selon elles, la capacité éolienne en mer devrait dépasser 2000 GW en 2050, contre à peine plus de 60 GW aujourd'hui pour parvenir à des émissions nettes nulles. La Global Alliance for Offshore Wind, lancée à la COP27 en novembre 2022, a annoncé une montée en puissance rapide de l'éolien en mer, avec pour objectif d'accélérer la croissance afin d'atteindre une capacité totale installée d'au moins 380 GW pour la fin de 2030. Ces travaux incluent une collaboration active pour supprimer les obstacles au déploiement de l'éolien en mer sur les nouveaux marchés et les marchés existants.⁴

La **plate-forme STEPP de l'ITPO Tokyo de l'ONUDI** décrit les principales caractéristiques et avantages d'une turbine éolienne de taille moyenne.⁵ Un problème fréquent concernant le déploiement de l'énergie éolienne dans les régions exposées périodiquement à des conditions de vents forts est que les turbines peuvent être endommagées lors d'événements climatiques extrêmes ou autres catastrophes naturelles. La plate-forme présente une turbine de taille moyenne qui est conçue pour être facilement transportable, qui est relativement simple à installer, dotée d'une forte protection contre la foudre et les tremblements de terre et résistante aux vents extrêmes et instables (au-delà des prescriptions de la norme CEI pertinente).

De la même manière, l'**Inventaire des technologies respectueuses de l'environnement disponibles sur le marché de l'Organisation mondiale de la propriété intellectuelle (OMPI)** contient des entrées concernant des turbines éoliennes résistantes aux typhons⁶, parmi toute une gamme d'autres technologies éoliennes.⁷ Cette ressource montre non seulement qu'il existe un large éventail d'avantages qui peuvent découler de l'adoption de ces technologies, mais aussi que ces technologies ont fréquemment un niveau de maturité technologique (NMT) élevé. Cette ressource documente aussi un large éventail de types d'activités de coopération dans le cadre desquelles un transfert de technologie éolienne est possible suivant des modalités volontaires mais mutuellement convenues.

1.3 Considérations relatives au cycle de vie concernant les turbines éoliennes en mer

D'après les sources susmentionnées, les avantages de l'adoption de l'énergie éolienne pour l'environnement sont clairs. Le secteur se concentre désormais sur les défis du cycle de vie restant à relever qui sont associés à certains composants afin de maximiser la compatibilité environnementale de cette technologie. Certains de ces défis ont été brièvement résumés ci-après.

L'élimination des pales des turbines pose un défi au stade de la fin de vie du cycle de vie d'une turbine. Même si 85 à 90% de la masse totale des turbines éoliennes peuvent être recyclés, ce n'est pas le cas des pales, qui finissent souvent à la décharge.⁸⁹ Les pales de turbines sont fabriquées à partir de fibres renforcées (généralement des fibres de verre ou des fibres de carbone) et d'une matrice en polymère. Même si elles sont non toxiques et que leur mise en décharge ne présente pas de danger, les méthodes de recyclage viable sur le plan commercial sont limitées.¹⁰

La majorité des méthodes de recyclage actuellement viables constituent une certaine forme de "sous-recyclage", dans le cadre duquel le nouveau matériau produit est de qualité inférieure au

³ <https://www.iea.org/reports/offshore-wind-outlook-2019>.

⁴ <https://www.irena.org/News/pressreleases/2022/Nov/Nine-new-countries-sign-up-for-Global-Offshore-Wind-Alliance-at-COP27>.

⁵ http://www.unido.or.jp/en/technology_db/1685/.

⁶ https://wipogreen.wipo.int/wipogreen-database/articles/147595?queryFilters.0.field=TECH_FIELD_ID&queryFilters.0.value=54&queryFilters.1.field=TECH_TYPE&queryFilters.1.value=5&type=BASIC&query=&pagination.size=30&pagination.page=0&sort.0.field=CREATED_AT&sort.0.direction=DESC.

⁷ https://wipogreen.wipo.int/wipogreen-database/search?queryFilters.0.field=TECH_FIELD_ID&queryFilters.0.value=54&queryFilters.1.field=TECH_TYPE&queryFilters.1.value=5&type=BASIC&query=&pagination.size=30&pagination.page=0&sort.0.field=CREATED_AT&sort.0.direction=DESC.

⁸ <https://cleangridalliance.org/blog/137/wind-turbine-recycling-and-disposal>.

⁹ WindEurope (2020), *Accelerating Wind Turbine Blade Circularity*.

¹⁰ <https://windeurope.org/newsroom/press-releases/wind-industry-calls-for-europe-wide-ban-on-landfilling-turbine-blades/>.

matériau d'origine. De nombreuses méthodes de recyclage qui produisent des matériaux de qualité supérieure impliquent des coûts énergétiques beaucoup plus élevés, toutefois, des travaux de recherche supplémentaires sont nécessaires pour une évaluation précise du cycle de vie de ces techniques.^{11,12,}

De nouveaux matériaux pouvant être utilisés pour les pales de turbines éoliennes et qui sont plus facilement recyclés en produits utiles sont en cours de développement, toutefois, on ne sait pas encore si ces matériaux seront viables sur le plan économique à l'échelle voulue.¹³ Dans l'intervalle, le défi subsiste en ce qui concerne la manière dont les pales de turbine actuelles sont éliminées lorsqu'elles sont démantelées, 43 millions de tonnes de déchets de pales devant être produits à l'échelle mondiale d'ici à 2050 selon les prévisions.¹⁴

2 RÔLE DES SERVICES

2.1 Services techniques

Il existe une grande variété de services (dont un grand nombre sont très techniques) liés à la production d'énergie éolienne en mer. Ces services sont propres à chaque stade, du développement et de la gestion d'un projet éolien en mer à la fabrication des turbines éoliennes, en passant par l'équipement de la partie classique de la centrale, l'installation et la mise en service des turbines et des fermes éoliennes. La section 4 (ci-après) expose en détail les activités de services techniques qui contribuent aux éléments d'un projet éolien en mer.

Un grand nombre de ces services techniques sont spécifiques à un stade particulier du cycle de vie de l'éolien en mer. L'ingénierie et la construction sont des éléments clés de l'installation et de l'assemblage des turbines éoliennes et de la construction des sous-stations en mer. Des services de maintenance et de réparation sont nécessaires à des stades ultérieurs du cycle de vie de l'éolien en mer. Ils sont souvent complémentaires des marchandises utilisées dans un projet éolien en mer et sont généralement fournis par le fournisseur initial du système qui affrètera des navires à cet effet.¹⁵

2.2 Services auxiliaires

Aussi bien la branche de production que les milieux universitaires ont reconnu que la portée des services environnementaux devait être plus large que celle des services "essentiels" tels qu'ils sont désignés par la division 94 de la CPC (OCDE (2022); Direction générale suédoise du commerce extérieur (2014); KPMG (2021)). Les services liés à l'environnement, en particulier ceux liés au développement, au déploiement, à la mise en œuvre, à la maintenance et au démantèlement des biens environnementaux contribuent à une utilisation finale verte, mais ne sont pas inclus dans la définition classique des services environnementaux.

À mesure que l'éolien en mer s'est développé, les services qui sont nécessaires pour permettre la réussite de ces projets se développent également. Des services tels que la recherche-développement les services financiers, les services d'assurance et les services de maintenance sont utilisés dans les projets d'éolien en mer. Comme le montre la section 4, les services fournis aux entreprises et les services numériques sont utilisés tout au long du développement, de l'installation, de la maintenance et du démantèlement de l'éolien en mer. Toutefois, ceux-ci ne sont pas classés parmi les services environnementaux d'après la définition de la division 94 de la CPC (OCDE, 2022).

Une expertise est requise tout au long des premiers stades du cycle de vie du projet, y compris en matière d'élaboration de la stratégie environnementale, de faisabilité de la modélisation, de risques et de résilience. Un éventail de services appuie ensuite l'établissement et le fonctionnement quotidien du projet et son exploitation, y compris la création d'une entité *ad hoc*, des services de

¹¹ Beauson, J., Laurent, A., Rudolph, D.P. et Jensen, J.P., 2022, "The complex end-of-life of wind turbine blades: A review of the European context", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, volume 155, article n° 111847.

¹² *Sustainable decommissioning: Wind Turbine Blade Recycling*, *Catapult Offshore Renewable Energy*.

¹³ <https://www.scientificamerican.com/article/recycled-wind-turbines-could-be-made-into-plexiglass-diapers-or-gummy-bears/>.

¹⁴ Pu Liu et Claire Y Barlow, *Wind Turbine Blade Waste in 2050*, Institute for Manufacturing de l'Université de Cambridge.

¹⁵ <https://www.thecrownestate.co.uk/media/2861/guide-to-offshore-wind-farm-2019.pdf>.

comptabilité et des services fiscaux, des gestionnaires d'actifs, des fournisseurs de services d'exploitation et de maintenance et des consultants techniques. Par exemple:

- **Services juridiques:** les services juridiques et les services de conseil sont essentiels à de nombreux stades d'un projet éolien en mer. Une entité *ad hoc* est généralement établie au moment du lancement du projet, gère le processus de développement et sous-traite les travaux à un éventail de sociétés de conseil spécialisées. L'entité *ad hoc* est une entité juridique qui investit dans le projet de ferme éolienne et en est propriétaire. Des tâches telles que celles consistant à obtenir un permis d'aménagement, des baux fonciers, bénéficient toutes de l'appui de divers services professionnels aux entreprises.
- **Services financiers:** Les projets peuvent être financés de différentes manières. L'éolien en mer présente une forte intensité de capital, avec des coûts initiaux importants liés aux équipements puis des coûts décroissants pour le fonctionnement et l'entretien. Une étude de cas portant sur la société UK Wind1 – une ferme éolienne en mer britannique – en montre un exemple. Le projet est structuré sur la base d'un ratio d'endettement représentant 80% de dette et 20% de fonds propres. La dette est garantie par tous les contrats et actifs importants du projet. Les assureurs sont derrière les prêteurs.¹⁶ Greencoat UK Wind PLC est un fonds d'investissement britannique qui investit dans des fermes éoliennes britanniques. Le fonds lui-même fait appel à des sociétés de services adjacents, en l'espèce BDO, une entreprise fournissant des services de comptabilité et de conseils commerciaux. BDO a fait office de commissaire aux comptes, et s'est occupée de nombreux aspects, de l'obligation de vigilance, à l'examen des prévisions financières, en passant par la fourniture d'assurances concernant les renseignements financiers sur les actifs acquis par le fonds.¹⁷
- **Services de conseil:** des ensembles de travaux sont commandés à des sociétés de conseil en environnement et en ingénierie – il est nécessaire que les travaux essentiels soient achevés au stade du développement du projet éolien en mer, tels que l'enquête environnementale, pour que le projet puisse passer au stade suivant.
- **Services de recherche-développement:** les services de recherche-développement sont essentiels à la fois pour créer de nouveaux projets dans le domaine de l'énergie et pour améliorer les projets existants. Les travaux de recherche contribuent à la conception et à la fabrication antérieures au projet, par exemple à l'amélioration de la fiabilité de la turbine ainsi qu'à la mise au point de nouvelles technologies d'installation afin de réduire les coûts et les risques. La recherche-développement apporte aussi une contribution une fois que le projet est en place et fonctionne, comme l'amélioration des techniques de drone et de l'analyse des données pour optimiser l'exploitation et la maintenance.¹⁸

2.3 Obstacles au commerce des services

L'adoption des TIC a stimulé le caractère échangeable des services et un grand nombre des services susmentionnés peuvent désormais être fournis en utilisant des réseaux informatiques.¹⁹ Toutefois, des obstacles réglementaires subsistent, tels que des restrictions aux flux transfrontières de données et des prescriptions concernant la présence commerciale qui limitent les services fournis par voie numérique. L'Indice de restrictivité des échanges de services numériques (IRES numérique) de l'OCDE montre qu'il existe des obstacles transversaux qui inhibent ou suppriment complètement la capacité des entreprises à fournir des services via les réseaux électroniques, et que ceux-ci ont augmenté. Cela est principalement dû à des restrictions liées à l'interconnexion des infrastructures de communication et des restrictions affectant la connectivité.

¹⁶ https://www.scor.com/sites/default/files/2021-04/Offshore_Wind_Farm_Finance-CaseStudy_0.pdf.

¹⁷ <https://www.cityoflondon.gov.uk/supporting-businesses/economic-research/research-publications/in-service-of-sustainable-infrastructure>.

¹⁸ <https://ore.catapult.org.uk/what-we-do/supply-chain-growth/torc-2/>.

¹⁹ Voir OCDE, OMC et FMI, *Handbook for Measuring Digital Trade*, volume 1.

L'OCDE constate que l'élimination des obstacles aux échanges de services numériques présente des avantages importants et cela est encore plus évident dans les économies émergentes dans lesquelles les bienfaits de la réforme entraînent des gains à l'exportation plus importants.²⁰

Les obstacles aux services ont tendance à se situer à l'intérieur des frontières plutôt qu'à la frontière et sont souvent le résultat de la mise en balance de défis de politique intérieure concurrents. Par exemple, les services utilisés dans le secteur éolien en mer peuvent être assujettis à des obstacles transfrontières à l'investissement et à des restrictions au mouvement des personnes. En matière d'ingénierie, près d'un tiers de l'ensemble des restrictions prises en considération dans l'Indice de restrictivité des échanges de services numériques (IRES numérique) de l'OCDE concerne des contingents, un examen des besoins du marché du travail et des limitations concernant la durée de séjour pour les hommes et les femmes d'affaires. Près de la moitié des pays pris en considération dans l'IRES numérique de l'OCDE imposent une forme quelconque de prescriptions en matière de nationalité ou de citoyenneté pour les hauts dirigeants et le conseil d'administration, ce qui limite les échanges de services, y compris ceux de services financiers et de services d'assurance. Les accords de libre-échange sont de bons exemples de cas dans lesquels les pays ont éliminé ou atténué ces restrictions.

Les services professionnels tels que les services de comptabilité, les services d'architecture, les services juridiques et les services d'ingénierie font également l'objet de restrictions en termes de reconnaissance des qualifications qui ont une incidence négative sur le commerce international de ces services. Les données de l'IRES montrent que certains pays imposent des prescriptions en matière de nationalité ou de citoyenneté pour exercer des activités d'architecture et/ou n'ont pas de loi ni de réglementation pour établir des processus pour la reconnaissance des qualifications obtenues à l'étranger. Les pays peuvent faciliter le commerce des services via la coopération en matière de reconnaissance des qualifications et peuvent aussi encourager les organismes pertinents à discuter de l'inclusion éventuelle de compétences liées à la durabilité comme prescription en matière de reconnaissance afin de mieux promouvoir les objectifs environnementaux.

3 DIAGRAMMES DE CHAÎNES DE VALEUR

Nous avons introduit les diagrammes de chaînes de valeur concernant les biens environnementaux dans notre note technique intitulée "Élaboration de notre base d'éléments factuels concernant les biens environnementaux"²¹, en tant qu'outil puissant pour organiser des renseignements clés relatifs aux marchandises.

Les diagrammes de chaînes de valeur permettent de visualiser et de décrire un éventail d'activités de fabrication ou de processus de production qui sont appliqués aux intrants de matières premières et aux produits intermédiaires à mesure que ceux-ci sont transformés en produits finals, et qui se combinent pour former des solutions technologiques à des défis environnementaux. Ces diagrammes décrivent à la fois les marchandises et les services, la production et les échanges. Ils peuvent donc stimuler les travaux de recherche sur les obstacles au commerce et les problèmes connexes et être annotés avec des renseignements additionnels.

En rassemblant ces différents types de renseignements, ces diagrammes peuvent approfondir notre compréhension des relations entre les marchandises, les services, la production, les échanges – et l'environnement, et nous aider à élaborer des politiques commerciales, industrielles et environnementales meilleures et mieux coordonnées.

Les diagrammes de chaînes de valeur dans la présente section ont été annotés avec des codes de produits uniquement à des fins indicatives. Les noms seuls des produits sont généralement insuffisants pour obtenir des opinions formelles en matière de classification parce qu'ils ne fournissent pas d'explication concernant les caractéristiques essentielles des produits. Il faudrait comparer ces caractéristiques avec les notes explicatives du système harmonisé pour chercher à obtenir une opinion formelle.

²⁰ OCDE (2023), *Of bytes and trade: Quantifying the impact of digitalisation on trade*, https://www.oecd-ilibrary.org/trade/of-bytes-and-trade-quantifying-the-impact-of-digitalisation-on-trade_11889f2a-en.

²¹ [INF/TE/SSD/W/23](#).

Les renseignements figurant sur ces diagrammes sont issus du Guide de la ferme éolienne en mer du projet Catapult du Royaume-Uni sur les énergies renouvelables en mer.²² L'objectif du guide est d'aider à mieux comprendre les composants et processus intervenant dans le développement des fermes éoliennes en mer britanniques. La présente publication fait fond sur ce guide en appliquant un cadre de chaîne de valeur au contenu du guide, qui peut être annoté avec des renseignements pertinents concernant la politique commerciale, comme cela est illustré par les codes de produit. Le guide lui-même contient d'autres renseignements qualitatifs sur chaque étape du cycle de vie d'une ferme éolienne²³, et présente une ventilation complète des coûts en £/MW.²⁴ Il contient également une carte de la chaîne d'approvisionnement des fermes éoliennes en mer au Royaume-Uni, en Europe et dans le monde entier.²⁵

D'autres diagrammes de chaînes de valeurs figurent dans l'annexe à la présente note, dans le document [INF/TE/SSD/W/26/Add.1](#).

Diagrammes de chaînes de valeur – Code couleur:

Couleur du chevron	Signification
	Activité de fabrication ou processus de production intervenant dans la fabrication ou dans l'assemblage d'une turbine éolienne
	Intrant, produit intermédiaire, produit final ou service pouvant être fourni à tout stade du cycle de vie d'une ferme éolienne en mer

²² <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/>.

²³ <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/lifecycle>.

²⁴ <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/wind-farm-costs>.

²⁵ <https://guidetoanoffshorewindfarm.com/supply-chain-map>.

3.1 Turbine éolienne

La turbine convertit l'énergie cinétique du vent en courant électrique alternatif triphasé.

3.1.1 Nacelle

La nacelle supporte le rotor et convertit l'énergie rotationnelle du rotor en courant électrique alternatif triphasé.

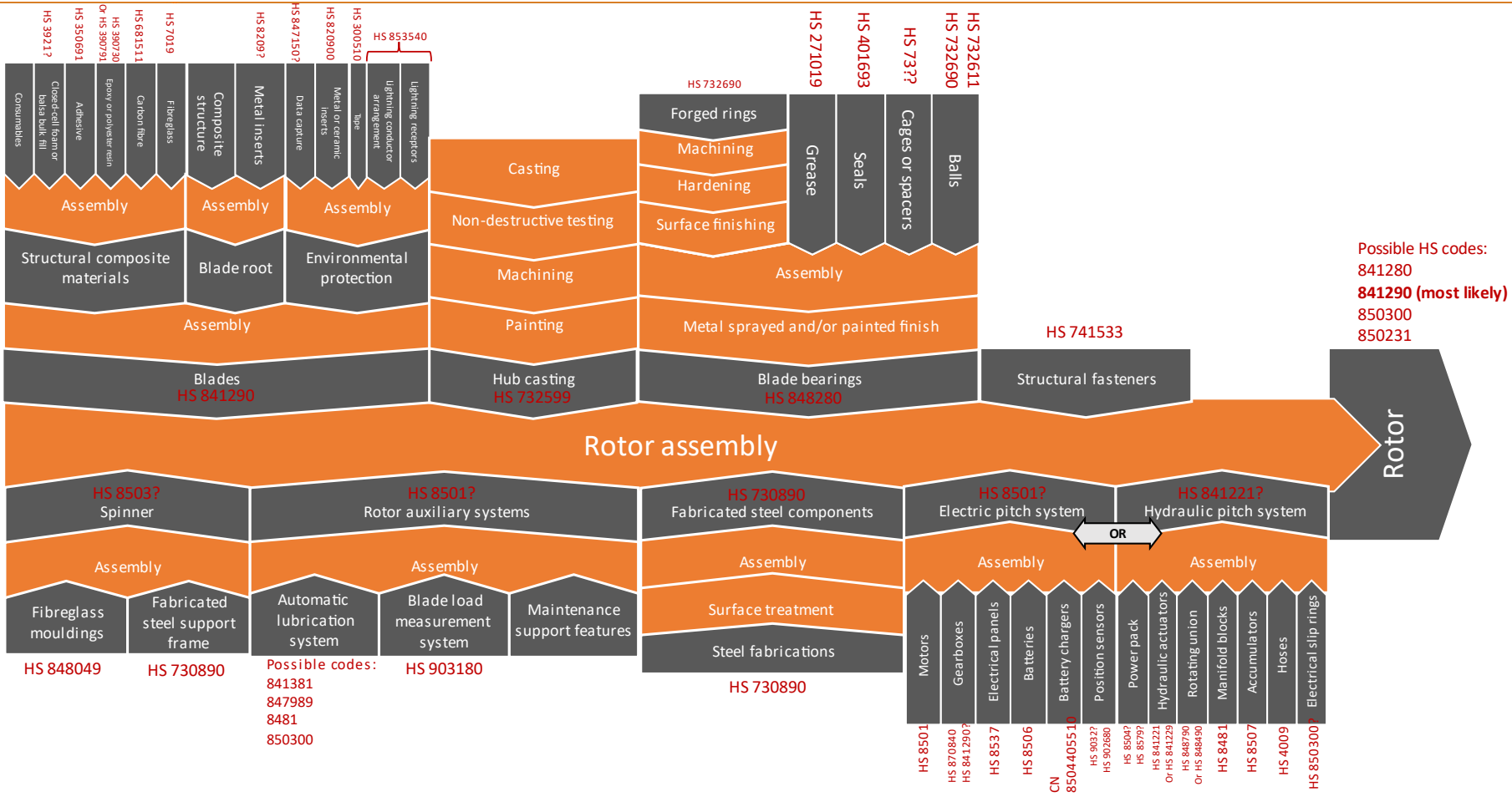
- **Châssis de la nacelle:** supporte la chaîne dynamique et le reste des composants de la nacelle et transmet les charges du rotor au mât.
- **Palier principal:** supporte le rotor et transmet une partie de la charge du rotor au châssis de la nacelle.
- **Arbre principal:** transmet le couple du rotor au multiplicateur de vitesse ou, dans le cas de certains systèmes à entraînement par accouplement direct, à la génératrice. Il est soutenu au bout du rotor par le palier principal et à l'autre bout par le multiplicateur/la génératrice ou bien par un palier monté séparément.
- **Multiplicateur:** convertit le couple du rotor d'une vitesse de 5 à 15 tr/min à une vitesse allant jusqu'à 600 tr/min dans le cas d'un multiplicateur à vitesse moyenne et jusqu'à 1500 tr/min dans le cas d'un multiplicateur à vitesse élevée en vue de la conversion en énergie électrique par la génératrice.
- **Génératrice:** convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Prise de force:** reçoit l'énergie électrique de la génératrice et ajuste le voltage et la fréquence pour la transmission vers l'avant au système de distribution de la ferme éolienne.
- **Système de régulation:** assure le contrôle de supervision (y compris le contrôle d'état des systèmes) et un contrôle actif de la puissance et de la charge pour optimiser la durée de vie de la turbine et la production de recettes, tout en respectant les prescriptions imposées de l'extérieur.
- **Dispositif d'orientation:** oriente la nacelle dans la direction du vent pendant le fonctionnement.
- **Couronne d'orientation:** connecte la nacelle et le mât, et permet au dispositif d'orientation d'orienter la nacelle dans n'importe quelle direction du vent pendant le fonctionnement.
- **Systèmes auxiliaires:** facilitent le fonctionnement continu sans supervision de la turbine éolienne la majorité du temps, et appuient la maintenance planifiée, qui devrait en général avoir lieu uniquement une fois par an.
- **Coque de nacelle:** fournit une protection résistante aux intempéries aux composants de la nacelle et supporte et donne accès aux composants externes tels que dispositifs de refroidissement, équipements de mesure du vent et dispositifs de protection contre la foudre.
- **Petits composants d'ingénierie:** constituent le reste de l'ensemble de la nacelle.

- **Pièces de fixation structurelles (boulons ou goujons):** utilisées dans un éventail d'assemblages boulonnés essentiels, par exemple celui reliant le rotor à l'arbre principal, les corps du palier principal au châssis de la nacelle et la couronne d'orientation à la partie inférieure du châssis de la nacelle.
- **Dispositifs de surveillance de l'état des systèmes:** assurent des vérifications additionnelles de l'état des systèmes et sont dotés de capacités de prédiction des défaillances.

3.1.2 Rotor

Le rotor extrait l'énergie cinétique de l'air et le convertit en énergie rotationnelle dans la chaîne dynamique.

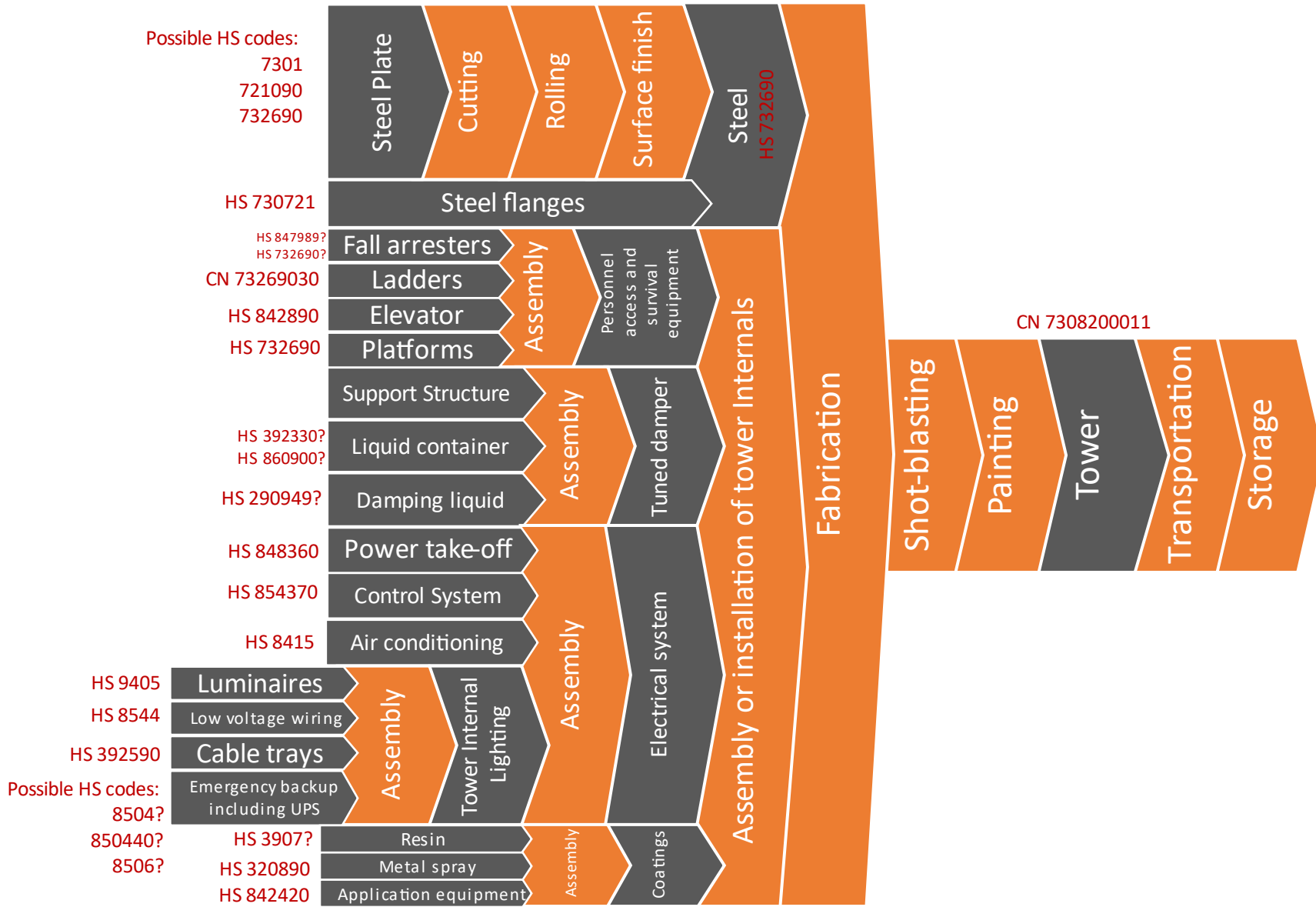
- **Pales:** capturent l'énergie du vent et transmettent le couple et autres charges indésirables à la chaîne dynamique et au reste de la turbine.
- **Moyeu:** relie les pales à l'arbre principal.
- **Paliers de pales:** permettent l'ajustement de l'angle de calage des pales pour contrôler la puissance de sortie de la turbine, réduire au minimum les charges et démarrer/arrêter la turbine selon qu'il est nécessaire.
- **Système de calage:** ajuste l'angle de calage des pales pour contrôler la puissance de sortie de la turbine, réduire au minimum les charges et démarrer/arrêter la turbine selon qu'il est nécessaire.
- **Nez de rotor:** offre une protection environnementale à l'ensemble du moyeu et permet au personnel de maintenance d'accéder au moyeu et aux pales.
- **Systèmes auxiliaires du rotor:** peuvent être intégrés pour lubrifier les paliers et faciliter la surveillance de l'état des systèmes et fournir des données de contrôle avancées.
- **Composants fabriqués en acier:** souvent nécessaires pour renforcer le support des paliers de pales et relier les vérins hydrauliques du système de calage.



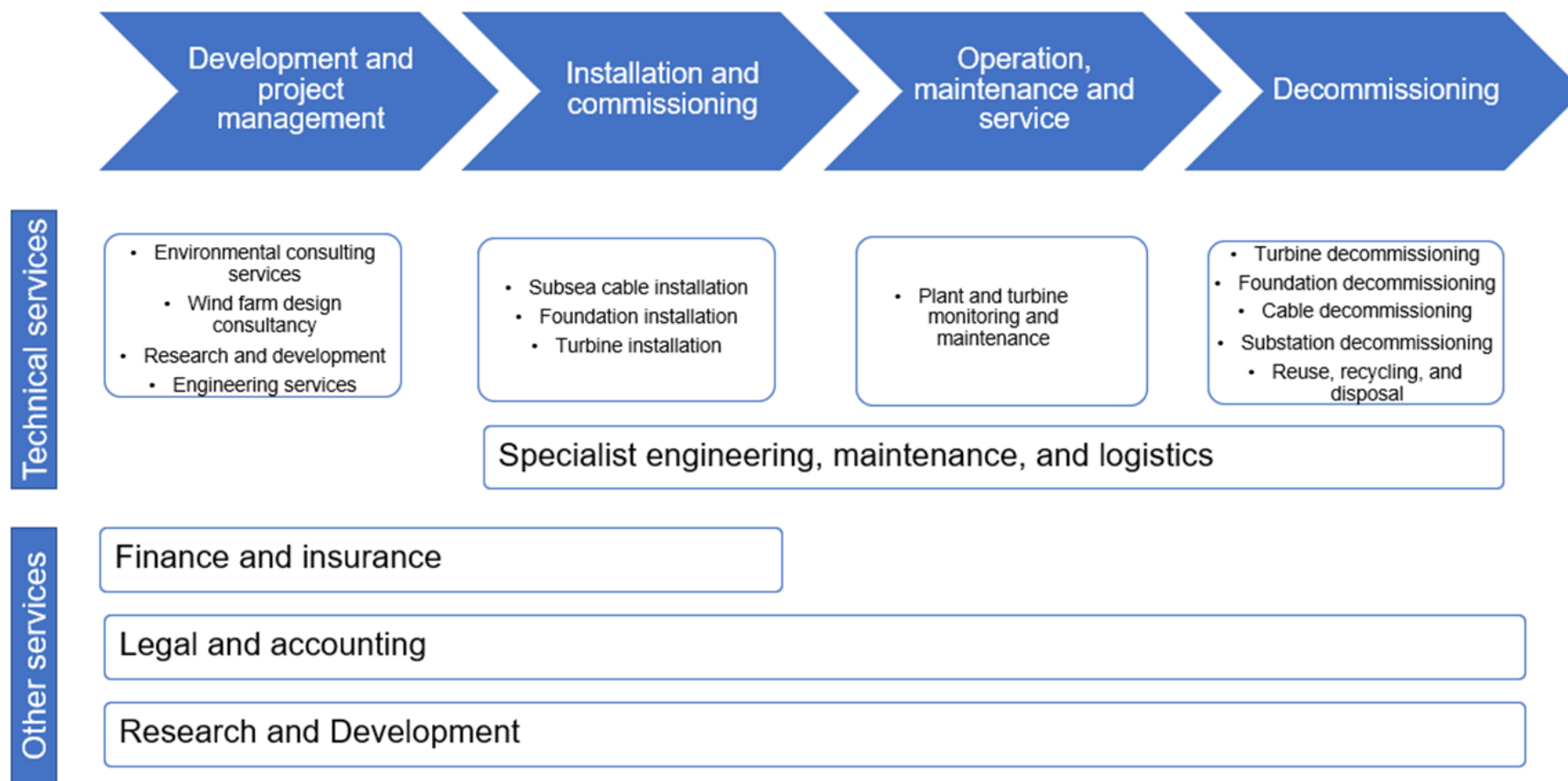
3.1.3 Mât

Le mât est généralement une structure tubulaire en acier qui supporte la nacelle. Il donne également accès à la nacelle et abrite l'équipement électrique et de contrôle. Il sert aussi à protéger et stocker l'équipement de sécurité.

- **Acier:** matériaux le plus couramment utilisés pour la fabrication des mâts.
- **Internes de tour:** fournit des moyens d'accès, d'éclairage et de sécurité pour le personnel de maintenance et d'entretien, ainsi que des moyens de transférer des outils à main et composants vers la nacelle. Elle supporte les câbles de contrôle et câbles électriques et abrite l'appareillage de commutation, les transformateurs et autres éléments de la prise de force. Elle permet aussi de stocker l'équipement de survie. Un amortisseur accordé peut être situé dans la partie supérieure du mât pour aider à amortir les résonnances du mât et de la structure.



4 EXEMPLES DE SERVICES (TECHNIQUES ET AUXILIAIRES) INTERVENANT DANS LE CYCLE DE VIE D'UN PROJET ÉOLIEN EN MER



Il s'agit d'exemples indicatifs de services (techniques et auxiliaires) qui peuvent intervenir au cours du cycle de vie d'un projet éolien en mer. Ces exemples ne devraient pas être considérés comme exhaustifs et constituent un ensemble évolutif.