



**HAL**  
open science

# L'éolien offshore : une logistique complexe en manque de pilotage

Virginie André, Nathalie Bostel

## ► To cite this version:

Virginie André, Nathalie Bostel. L'éolien offshore : une logistique complexe en manque de pilotage. 6th international conference PROLOG - Project Logistic, Sep 2021, Nantes, France. hal-03341567

**HAL Id: hal-03341567**

**<https://hal.science/hal-03341567v1>**

Submitted on 11 Sep 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# L'éolien offshore : une logistique complexe en manque de pilotage

*Virginie André, IUT Saint Nazaire, Université de Nantes, LEMNA,  
Nathalie Bostel, IUT Saint Nazaire, Université de Nantes, CNRS LS2N*

## Introduction

Le changement climatique est devenu la première préoccupation des européens, selon Vattenfall (2021). Leurs travaux ont montré que non seulement cette question est très largement répandue mais représente le défi majeur que l'on doit relever. Depuis plusieurs années, de nombreux acteurs œuvrent pour mettre en place des projets plus écologiques. Cette tendance concerne de très nombreux secteurs, dont la production d'énergie électrique. Une des pistes aujourd'hui privilégiées consiste à utiliser des énergies renouvelables et l'éolien en fait partie. Tout d'abord installées sur terre, les éoliennes sont, depuis les années 2010, installées en mer où les vents sont plus réguliers et puissants.

L'exploitation de parcs éoliens offshore a démarré depuis 10 ans en Europe alors que les parcs français commencent tout juste leur construction. En effet, en 2021, la France ne compte qu'une seule éolienne flottante, Floatgen, en test depuis 2018, alors que plus de 5400 éoliennes offshore sont opérationnelles en Europe. Cependant, depuis 2020, 6 parcs français sont en cours de construction, pour une capacité totale de 2.9 GW et représentent 10 milliards d'investissement.

La logistique qui entoure la fabrication et l'installation de ces éoliennes offshore est spécifique de par le produit et les conditions d'installation. De plus, cette technologie étant récente, nous pouvons alors observer la formation d'une chaîne logistique spécifique dans un contexte où la numérisation et la digitalisation des flux d'information sont devenus des préoccupations industrielles importantes. La production de pièces, aussi imposantes de par leur poids et leur taille, impactant alors les ressources nécessaires à leur manutention, transport et installation impose une coordination globale.

Nous nous sommes donc intéressés à la chaîne logistique globale et à son pilotage en étudiant d'une part la littérature concernant les problèmes d'optimisation logistique et en interrogeant les acteurs de la chaîne logistique, d'autre part. L'objectif de cette étude est d'appréhender la

complexité liée à ces projets, de faire un tour d'horizon des projets européens en étudiant leur organisation et enfin de définir les spécificités françaises.

## 1. Etat des lieux de l'industrie de l'éolien offshore et état de l'art

A travers cet état des lieux, nous présentons une industrie qui se porte bien grâce aux différents projets mis en place en Europe, puis mettons en évidence les spécificités françaises qui peuvent expliquer les retards de mise en œuvre.

### 1.1. L'éolienne : des caractéristiques hors normes

La construction et l'installation d'une éolienne offshore peut être considérée comme un défi technique important par bien des aspects :

- Sa taille : alors que les éoliennes terrestres atteignent 150 m de haut (la nacelle se situe alors à environ 90 m), les plus grandes éoliennes offshore peuvent atteindre 260 m (Haliade-X de General Electric)
- Son poids : le poids de certains composants peut dépasser 700 tonnes ce qui rend leur stockage et leur manutention très particuliers.
- Son rendement : alors que les éoliennes terrestres atteignent un rendement de 3,2 MW, les éoliennes offshore ont une capacité de 12 MW pour la plus puissante.
- Son site d'installation : en mer avec des vents puissants et réguliers qui bien qu'intéressant pour le fonctionnement de l'éolienne offshore devient une contrainte pour son installation.

Dès qu'il s'agit de projet éolien en mer, les coûts d'investissement sont environ trois fois plus importants que pour un projet terrestre (entre 3300 et 5000 €/kW pour l'éolien offshore contre 1060 à 1600 €/kW pour le terrestre). Ces investissements importants sont dus principalement à la multiplication des études mais également au développement des technologies adaptées à un environnement beaucoup plus rigoureux (humidité, salinité, nature des sols, ...).

### 1.2. Les freins au développement de cette technologie

Les freins du développement sont de plusieurs ordres : configuration du littoral et des ports, recours multiples, procédures administratives qui rallongent les délais de lancement des projets.

Même si la France compte parmi les pays ayant l'un plus grand littoral avec 20 000 km, seules quelques zones sont adaptées à l'installation des parcs. En effet, les éoliennes offshore posées ont besoin d'un terrain particulier (qui ne soit pas rocheux et une profondeur qui n'excède pas 60 mètres) pour être installées.

La superficie de nos ports est réduite et les projets éoliens doivent cohabiter avec les autres activités portuaires, contrairement aux pays de l'Europe du Nord qui peuvent dédier des zones (ou un port entier) aux activités liées à la fabrication et l'installation des éoliennes offshore. Les ports néerlandais, par exemple, sont « extensibles » grâce aux techniques de poldérisations et peuvent ainsi offrir des espaces dédiés.

Resituons tout d'abord le point de départ d'un projet de construction d'un parc éolien offshore. Un projet de parc éolien s'échelonne sur de nombreuses années entre l'appel d'offre et le démantèlement du parc, la durée de vie d'une éolienne marine étant estimée à environ 25 ans.

En France, à partir d'un appel d'offres de l'Etat, un consortium se constitue et conçoit un projet de réponse. Après la sélection d'un projet, les études technico-économiques peuvent commencer : étude de la zone, choix des fondations, concertation, conception du parc, obtention des autorisations. Cette période d'études est assez longue, environ 4 ans. Même si certaines décisions sont figées par la constitution du consortium (type de turbines), certains choix techniques restent à faire à cette étape ainsi que le choix des fournisseurs qui sera effectué par examen des réponses aux appels d'offres lancés. L'organisation logistique mise en place dépendra de ces choix. Elle comprendra les étapes suivantes : la fabrication des composants, le transport jusqu'au port d'installation, le stockage et manutention et, pour finir l'installation en mer.

Une fois le parc installé, durant toute sa phase d'exploitation, il faudra assurer la maintenance et mettre en place les activités logistiques adéquates pour réaliser ces opérations : choix d'un port pour la maintenance, affectation de navires et de personnel, gestion des pièces de rechange... La phase ultime du cycle de vie, concerne le démantèlement des installations et les opérations logistiques à mettre en œuvre seront équivalentes à celles de l'installation mais partiront de la mer pour ramener à terre les différents composants en fin de vie.

Vojdani, et al. (2012) identifient l'ensemble des processus logistiques tout au long du cycle de vie du projet éolien offshore et mettent en évidence les particularités de cette chaîne logistique. Ils mettent l'accent sur l'importance d'étudier la conception du réseau logistique à la fois pour la production et l'installation mais aussi pour la maintenance. Pour l'assemblage, différents scénarios sont proposés selon la configuration du site. Le réseau d'approvisionnement des pièces de rechange doit également être conçu avec soin car la maintenance représente une part importante dans le coût complet du projet.

Facq, et al. (2019) indiquent dans leur rapport de 2019 que les projets sont deux fois plus longs à voir le jour en France que dans les autres pays d'Europe. En effet, alors que le premier appel d'offres pour les projets éoliens en mer a été lancé dès 2004, en 2021, les parcs ne sont toujours pas exploités. Selon Facq, et al. (2019), les causes sont multiples :

- Les procédures administratives sont nombreuses et entraînent des reports importants. Prenons l'exemple du parc de saint Nazaire : en avril 2012, l'autorisation d'exploiter est accordée par l'Etat et 7 ans plus tard, en juin 2019, la validation de cette décision est confirmée par le conseil de l'Etat
- Le cadre juridique concernant la création et l'exploitation de parc éolien est complexe et rigide, ce qui ne permet pas de soutenir le développement de la technologie.
- Les porteurs de projets n'ayant qu'une visibilité limitée sur le développement des parcs éoliens en France, il est difficile d'anticiper les évolutions technologiques.

Comme nous avons pu le montrer, les parcs éoliens en France voient difficilement le jour et nous avons mis en évidence que les freins sont multiples : géographique, juridique, technologique et organisationnel.

### 1.3. Des projets importants, de nombreux axes étudiés

A travers l'ensemble de ces caractéristiques techniques, les industriels fabriquant les éoliennes considèrent chaque parc comme étant un projet unique qui doit s'adapter à son environnement. Nous pouvons l'observer à travers la variété des thèmes abordés dans la littérature :

| <b>Problèmes traités</b>   | <b>Références</b>   |
|--|---|
| <b>Stratégique</b>   |   |
| Localisation des parcs   | (Mytilinou, et al., 2017)   |
| Optimisation du schéma d'implantation des éoliennes dans un parc   | (Tran, et al., 2013), (Feng, et al., 2015)  |
| Conception de réseaux logistiques                                  | (Vojdani, et al., 2012), (Backe, et al., 2017), (Irawan, et al., 2017a), (Quandt, et al., 2017) |
| Pose des câbles électriques  | (Wedzik, et al., 2016)  |
| Agencement du hub pour le stockage et le pré-montage des éoliennes | (Irawan, et al., 2017b)   |
| <b>Tactique</b>  |   |
| Planification de la phase d'installation                           | (Ait-Alla, et al., 2013), (Öztürk, et al., 2017), (Barlow, et al., 2018)                        |

| <b>Opérationnel</b>                         |   |
|---|---|
| Ordonnancement des tâches d'installation    | (Stempinski, et al., 2014), (Muhabie, et al., 2015), (Irawan, et al., 2017c), |
| Mutualisation des ressources d'installation | (Beinke, et al., 2017)  |

*Tableau 1 : Récapitulatif des travaux en fonction du niveau de planification*

Nous avons constaté que les éléments de la littérature s'intéressaient principalement à des problématiques soit très en amont du projet avec la localisation des parcs, soit en ayant une vue très opérationnelle du projet en proposant des outils d'ordonnancement des tâches d'installation. Le point de vue global concernant le pilotage de la chaîne dans son ensemble a été très peu étudié. En effet, seul Vojdani, et al. (2012) proposent un article sur l'importance d'étudier la conception du réseau logistique à la fois pour la production et l'installation mais aussi pour la maintenance.

Nous venons de montrer que l'installation d'éoliennes offshore constituent un défi logistique, de par leurs caractéristiques, que de nombreux pays européens ont déjà relevé. Malgré tout, la France a relancé le secteur et 6 parcs vont être construits et exploités d'ici 2026. La littérature scientifique montre que la communauté s'intéresse au sujet en le traitant suivant différents points de vue, mais la question du pilotage de la chaîne logistique globale reste ouverte.

## 2. Une logistique globale complexe

La multiplication des lancements de parcs indique que les industriels ne travaillent pas pour un parc en particulier mais pour un ensemble de parcs répartis dans le monde. Avec, en moyenne, l'installation de quelques centaines d'éoliennes offshore par an, nous nous sommes intéressées à l'organisation de la chaîne logistique globale, c'est-à-dire en partant des fabricants des principaux composants d'une éolienne jusqu'à son installation en mer, et à son mode de pilotage.

Nous avons donc procédé par étape : une étude détaillée des différents types d'éoliennes offshore, de leurs principaux composants, des acteurs majeurs d'un projet, puis la proposition d'un schéma type de la chaîne logistique globale associée, le recensement des problématiques principales associées aux différentes étapes du cycle de vie du projet. L'ensemble de ces étapes a fait l'objet de nombreux aller-retours et validations entre nous et les acteurs de la chaîne concernée.

## 2.1. Identification d'une chaîne logistique globale conçue par le développeur

Les acteurs de la chaîne ont également été interrogés pour identifier les différentes difficultés que revêt l'organisation d'un tel projet. Pour ce faire, nous avons choisi d'interroger des porteurs de projet, des fabricants de composants, des prestataires portuaires, principaux acteurs de la chaîne que nous étudions. Les modalités d'interviews ont les caractéristiques suivantes : il s'agit d'entretiens semi-directifs avec des personnes de type top-manager. Chaque entretien, d'une durée de 2h à 3h, avait pour objectifs de comprendre les liens organisationnels entre les acteurs et d'appréhender les contraintes des uns et des autres afin d'avoir une vision d'ensemble.

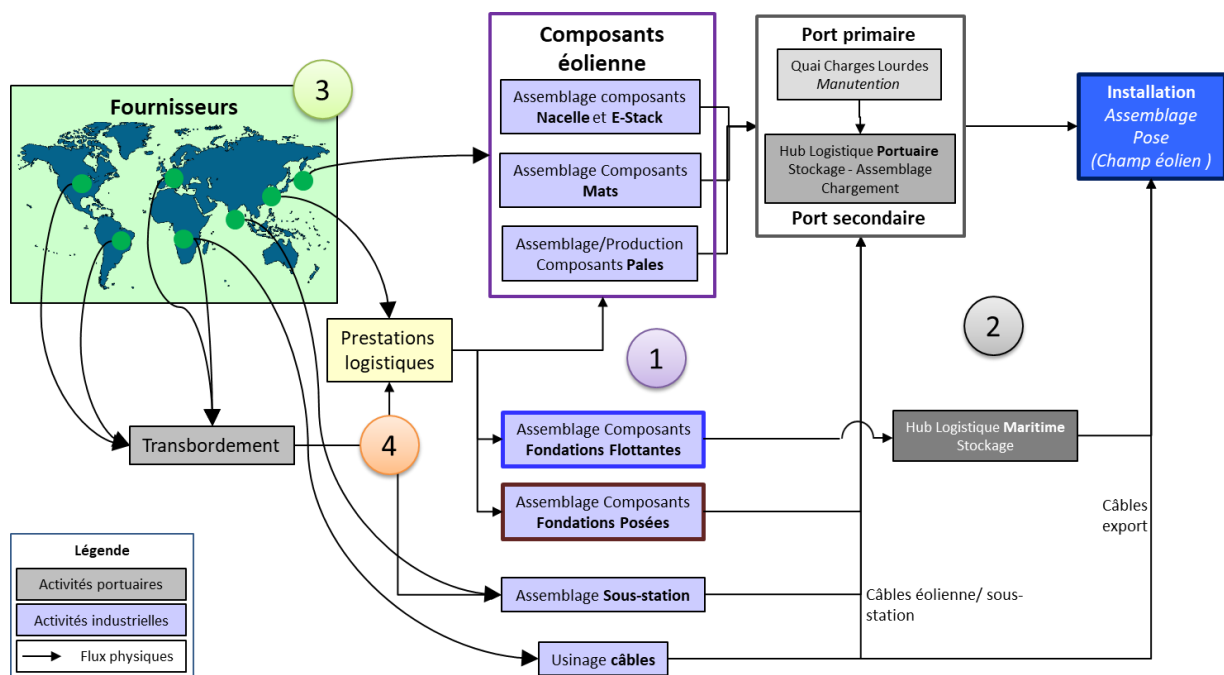


Figure 1: Schéma général de chaîne logistique de production et d'installation des éoliennes offshore

Les entretiens qui nous ont permis de poser les premières bases du schéma logistique sont ceux menés avec les porteurs de projets de parcs à savoir les développeurs. Ils nous ont permis de comprendre comment se construit une chaîne logistique pour l'installation d'un parc d'éoliennes offshore. Ainsi l'identification des différents acteurs a été plus aisée et leurs relations organisationnelles non moins difficiles à cerner. En effet, le développeur est celui qui lance les appels d'offre pour sélectionner les principaux acteurs industriels pour la mise en place des éoliennes. De nombreuses contraintes sont alors détaillées telles que les contraintes techniques liées au terrain, au positionnement du parc et également à la puissance souhaitée pour les éoliennes. Une fois, les acteurs principaux sélectionnés (1), le schéma commence alors à se mettre en place (figure 1). En fonction de la situation géographique des fabricants d'éoliennes et des futurs parcs, une stratégie d'installation est imaginée sélectionnant de fait les

acteurs portuaires (2). Les fabricants de composants font alors appel à leurs fournisseurs (3) et les prestataires commencent alors à se positionner (4).

## 2.2. Identification de nouvelles problématique pour une chaîne logistique sans pilote

Le schéma ainsi construit nous a permis de cerner les difficultés (sélection des fabricants d'éoliennes) et les contraintes (géographique, géologique et technique) inhérentes à la conception d'une chaîne logistique à partir des besoins du développeur. Une fois les fabricants sélectionnés, les opérateurs portuaires doivent proposer des réponses techniques et logistiques en adéquation avec les caractéristiques imposantes des produits que ce soit en amont ou en aval de l'usine. Aujourd'hui, chaque acteur optimise ses propres schémas logistiques. Une vision plus globale de cette chaîne permettrait de gérer au mieux les échanges d'informations et ainsi d'optimiser les flux et les stocks ce qui réduirait le coût global de la chaîne logistique.

Nous avons identifié suite à ces interviews que les problématiques concernaient principalement trois points particuliers :

- L'aménagement portuaire ou plus précisément le stockage : Alors que tout le monde se focalise sur l'utilisation maximale du navire d'installation, en constituant un stock très important de composants sur le port pour éviter les ruptures, le coût complet incluant le coût des infrastructures et du stockage des composants n'est pas pris en compte. Dans les ports français, limités en termes de surface, c'est un réel problème. La zone portuaire dédiée aux éoliennes devrait être optimisée avec une délimitation des zones par composants et des équipements nécessaires, souvent mutualisés.
- Les problématiques de conception de la chaîne logistique, nécessitant une évaluation globale des coûts, incluant coûts de transport et stockage ne sont que très peu abordés. Pourtant des outils d'optimisation permettant d'assister le développeur du projet dans ses choix de localisation de sites d'implantation (port, hub, usine), de sélectionner les modes de transport et de structurer les flux pour l'installation pourraient être très utiles.
- Une fois la chaîne globale définie, des outils de pilotage des activités et processus pour la fabrication des composants d'éoliennes permettraient une meilleure maîtrise des ressources en quantité limitée.

Même si les problématiques semblent intéressantes en premier lieu, elles ont reçu un accueil mitigé. En effet, les opérateurs portuaires ne ressentent pas le besoin à ce jour d'un outil stratégique d'aménagement portuaire pour développer leurs activités. Toutefois, les deux autres



points, même s'ils n'ont pas été considérés pour les projets en cours, ils semblent intéressants à étudier pour les projets d'installation de parcs d'éoliennes flottantes

## Conclusion

Les parcs éoliens offshore sont d'ores et déjà une réalité dans nombre de pays européens. Selon le rapport de (Wind Europe, 2021), 5 400 éoliennes sont installées dans les parcs européens parmi lesquelles une seule est française. Nous avons commencé par identifier les freins à l'installation des parcs sur le littoral français tels que les procédures administratives et autres recours, les aménagements portuaires délicats de par leur configuration géographique rendant leurs extensions impossibles ou encore les défis liés tout simplement au produit lui-même (sa taille, son poids, etc).

Dans cet article, nous avons montré que, bien que la littérature concernant les problèmes d'optimisation soit relativement fournie, il reste encore quelques problématiques à traiter. Ces problématiques ont été identifiées en étudiant la littérature mais également en interviewant les acteurs de la chaîne logistique. Nous avons pu ainsi proposer un schéma général de la chaîne ainsi que des sujets à traiter tels que : l'aménagement portuaire en prenant en compte les capacités limitées en ressources, la conception de la chaîne logistique en proposant un outil de sélection des acteurs et pour finir le pilotage des activités de production et de stockage des composants des éoliennes.

Ces problématiques, même si elles semblent intéressantes, ne correspondent pas forcément à une réalité industrielle. Envisager une coordination globale de la chaîne logistique semble utopique compte tenu du morcellement des acteurs et de leur implication simultanée dans différents projets.

## Bibliographie

**Ait-Alla A., Quandt M. et Lutjen M.** Simulation-Based Aggregate installation planning of offshore wind farms [Revue] // International Journal of Energy. - 2013. - 2 : Vol. 7. - pp. 23-30.

**Backe S. et Haugland D.** Strategic optimization of offshore wind farm installation [Revue] // Proceedings of 8th international conference on computational logistics ICCL. - Southampton, UK : [s.n.], 2017. - pp. 285-299.

**Barlow E. [et al.]** A mixed-method optimisation and simulation framework for supporting logistical decisions during offshore wind farm installations [Revue] // European Journal of operational research. - 2018. - 3 : Vol. 264. - pp. 894-906.

- Beinke T., Alla A. A. et Freitag M.** Resource sharing in the logistics of the offshore wind farm installation process based on a simulation study [Revue] // International Journal of e-navigation and maritime economy. - 2017. - Vol. 7. - pp. 42-54.
- Facq Florent [et al.]** L'éolien Offshore en France, un rattrapage indispensable [Rapport]. - [s.l.] : La Fabrique Ecologique, 2019.
- Feng J. et Shen W. Z.** Solving the wind farm layout optimization problem with using random search algorithm [Revue] // Renewable Energy. - 2015. - 78. - pp. 182-192.
- Irawan C. [et al.]** A combined supply chain optimisation model for the installation phase of offshore winds projects [Revue] // International Journal of production research. - 2017a.
- Irawan C. A. [et al.]** Layout optimisation for an installation port of an offshore wind farm [Revue] // European Journal of Production Research. - 2017b. - 1 : Vol. 259. - pp. 67-83.
- Irawan C. A., Jones D. et Ouelhadj D.** Bi-objective optimisation model for installation scheduling in offshore wind farms [Revue] // computers and operation research. - 2017c. - Vol. 78. - pp. 393-407.
- Muhabie Y. T. [et al.]** Improving the installation of offshore wind farms by the use of discrete event simulation [Revue] // Proceedings of World Maritime Technology Conference (WMTC). - Providence, RI, USA : [s.n.], 2015. - pp. 1-10.
- Mytilinou V. et Kolios A. J.** A multi objective optimisation approach applies to offshore wind farm location selection [Revue] // Journal of ocean engineering and marine energy. - 2017. - pp. 265-284.
- Öztürk D. T. [et al.]** Robust Rolling horizon optimisation model for offshore wind farm installation logistics [Rapport] : Working paper / University of Strathclyde. - Glasgow : [s.n.], 2017.
- Quandt M. [et al.]** Simultaion based investigation of the impact of information sharing on the offshore wind farm installation process [Revue] // Journal of Renewable Energy. - 2017.
- Stempinski F. [et al.]** Modelling installation and construction of offshore wind farms [Revue] // Proceedings of ASME 2014 33rd International conference on ocean, offshore and arctic engineering. - 2014.
- Tran R. [et al.]** Fast and Effective Multi objective optimisation of wind turbine placement [Revue] // Proceedings of the 15th annual conference on genetic and evolutionary computation. - 2013. - pp. 1381-1388.
- Vattenfall** Le débat sur le changement climatique et son impact sur les comportements humains [Rapport]. - Stockholm : Vattenfall AB, 2021.
- Vojdani N. et Lootz F.** Designing Supply Chain Networks for the offshore wind energy industry [Revue] // International Journal of Business Performance en Supply Chain Modelling. - 2012. - pp. 271-284.
- Wedzik A., Siewierski T. et Szypowski M.** A new Method for simultaneous optimizing of wind farm's network layout and cable cross-sections by MILP optimization [Revue] // Applied Energy. - 2016. - Vol. 182. - pp. 525-538.
- Wind Europe** Offshore Wind in Europe: Key trends and statistics 2020 [Rapport]. - Bruxelles : [s.n.], 2021.