

École polytechnique de Louvain

Bilan carbone des fondations des éoliennes offshore

Auteur: **Thibault MORIAU**
Promoteur: **Hadrien RATTEZ**
Lecteurs: **Pierre LATTEUR, Luc SIMONIN**
Année académique 2024–2025
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Résumé

Ce travail fait étude des fondations monopieux d'éoliennes offshore, qui ont été étudiées à travers une double approche : d'une part un dimensionnement avancé basé sur les courbes p-y pour mieux capter l'interaction sol-pieu, d'autre part, une analyse de cycle de vie complète conforme à l'EN 15804.

Des séries d'analyses paramétriques sur le dimensionnement ont permis de quantifier l'influence de plusieurs variables sur la masse finale d'un monopieu. En premier lieu, les conditions marines, avec la hauteur des vagues et la profondeur d'eau, qui peuvent faire varier la masse d'environ 70%. Dans un second temps, l'effet du régime de vent, ayant une influence semblable. Et finalement, la résistance du sol induisant des variations supplémentaires d'environ 15%.

Une simulation de bilan carbone pour un monopieu offshore de 1000 tonnes d'acier, 20 % de ferraille et recyclage partiel, a été effectuée, amenant à un bilan carbone de 2 623 t CO_2e , dont 78 % liés à la production d'acier ; après crédit de recyclage, l'empreinte est ramenée à 2 040 t CO_2e .

Une optimisation réaliste avec 750 t d'acier (correspondant à des conditions marines plus permissives), 40 % de ferraille et un recyclage total permet de réduire cette empreinte à 1 163 t CO_2e , soit 43% de réduction. Ces résultats montrent que la réduction de la masse d'acier, l'augmentation du contenu recyclé et une stratégie de recyclage intelligente sont les leviers les plus efficaces pour décarboner les fondations d'éoliennes offshore.

Abstract

This work focuses on monopile foundations for offshore wind turbines, which were studied using a dual approach : on the one hand, advanced dimensioning based on p-y curves to better capture soil-pile interaction, and on the other, a full life-cycle analysis in line with EN 15804.

A series of parametric sizing analyses quantified the influence of several variables on the final mass of a monopile. Firstly, marine conditions, such as wave height and water depth, can vary the mass by around 70%. Secondly, the effect of the wind regime, which has a similar influence. And finally, ground resistance induces additional variations of around 15%.

A carbon footprint simulation was carried out for an offshore monopile of 1,000 tonnes of steel, 20 % scrap metal and partial recycling, leading to a carbon footprint of 2,623 t CO_2e , of which 78 % related to steel production ; after recycling credit, the footprint is reduced to 2,040 t CO_2e .

Realistic optimization with 750 t steel (corresponding to more permissive marine conditions), 40 % scrap metal and total recycling reduces this footprint to 1,163 t CO_2e , i.e. a 43% reduction. These results show that reducing steel mass, increasing recycled content and a smart recycling strategy are the most effective levers for decarbonizing offshore wind turbine foundations.

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier mon promoteur, Hadrien Rattez, professeur à l'UCLouvain, pour m'avoir trouvé un sujet qui correspondait à mon intérêt sur les bilans carbone tout en me permettant d'apporter ma pierre à l'édifice de ses multiples projets concernant les éoliennes offshore. Merci de m'avoir donné un sujet qui m'a vraiment mis au défi. Merci pour son accompagnement et pour ses précieux conseils afin d'améliorer le contenu de ce mémoire.

J'aimerais ensuite remercier Monsieur Luc Simonin pour les conseils qu'il m'a donnés, le temps qu'il m'a consacré et le partage de ses connaissances et expériences. Cela m'a aidé à me projeter davantage dans le concret et pour cela, je l'en remercie.

Merci également aux multiples membres du pôle GCE et aux doctorants avec lesquels j'ai pu interagir durant ces recherches. Merci à Monsieur Olivier Vassart pour m'avoir apporté son expertise concernant les bilans carbone de l'acier. Merci à Mohamed Shahrour et à Pauline André de m'avoir rassuré sur l'intérêt de mes recherches et de m'avoir proposé leur aide.

Merci également au professeur Pierre Latteur d'avoir accepté d'être mon lecteur et de m'avoir guidé vers monsieur Rattez durant ma recherche de sujet pour mon mémoire. J'espère sincèrement arriver à lui transmettre mon intérêt pour le sujet.

Je tiens également à remercier l'ensemble de l'équipe académique GCE, pour m'avoir permis de me trouver une vraie voie dans la construction.

Je souhaiterais également remercier Madame Nathalie Sergoigne pour son aide, sa gentillesse et sa patience durant la recherche de sujet et pour l'organisation de mon mémoire, qui m'a accompagnée de la meilleure des manières.

Et finalement merci à tous mes amis et à tous mes proches. Merci à mes parents et mes frères pour tout leur amour et leur soutien inconditionnel dans les moments de stress, de tristesse ou de déprime. Merci à Thomas, Aymeric et Vitek d'avoir été là pour moi depuis presque trop d'années maintenant. Merci à Chloé, Clémence et Héloïse de m'avoir accompagnée durant ces années universitaires. Merci à Stéphanie pour m'avoir partagé son stress durant l'écriture de ce mémoire. Et merci à tous ceux que j'oublie, qui ont rendu ma vie plus belle de près ou de loin dans cette période de défi et où j'en avais le plus besoin.

Avertissement concernant l'utilisation de l'IA

L'intelligence artificielle générative *ChatGPT* a été utilisée dans ce mémoire, conformément aux règles dictées par l'UCLouvain. Elle a été utilisée afin d'analyser plus rapidement certains ouvrages, de rédiger la bibliographie de la manière la plus complète possible, de corriger des parties de code et de texte. Tout comme un moteur de recherche, elle a également permis de s'informer et de trouver des documents nécessaires au développement de ce mémoire.

Un outil de traduction et de correction grammaticale utilisant une IA non générative, à savoir DeepL, a été utilisé pour améliorer le niveau d'anglais de l'abstract.

Table des matières

Résumé	I
Abstract	III
Remerciements	V
Avertissement concernant l'utilisation de l'IA	VII
Table des matières	XI
1 Introduction	1
2 État de l'art	3
2.1 Fondation des éoliennes offshore	3
2.2 Méthode d'implantation des monopieux	4
2.2.1 Méthode par battage	4
2.2.2 Méthode par vibro-fonçage	5
2.2.3 Méthode par forage et cimentation	5
2.3 Méthode de dimensionnement des monopieux	5
2.3.1 Méthode de calcul simplifiée	6
2.3.2 Méthode des courbes p-y	6
2.3.3 Méthode avancée par éléments finis	7
2.4 Analyse de cycle de vie	7
2.5 Bilan carbone spécifique aux monopieux	8
3 Dimensionnement	10
3.1 Choix de la méthode de dimensionnement	11
3.2 Vue d'ensemble	13
3.3 Charges	15
3.3.1 Cas de charges	16
3.3.2 Force due au vent sur les pales	19
3.3.3 Force due aux vagues sur le pieu	20
3.3.4 Résultante	22
3.4 Modélisation sol-pieu (p-y)	23
3.4.1 Principe fondamental	23
3.4.2 Courbes p-y pour le sable	25
3.4.3 Variation sur les courbes p-y	27

3.5	Vérification mécanique	28
3.5.1	Déplacement en service (ELS)	28
3.5.2	Résistance au cisaillement (ULS)	28
3.5.3	Résistance à la flexion (ULS)	29
3.5.4	Vérification de la fréquence propre	29
3.6	Données d'entrée	31
3.6.1	Caractéristiques des éoliennes	31
3.6.2	Caractéristiques liées aux vagues et à l'eau	31
3.6.3	Caractéristiques liées au vent	32
3.6.4	Caractéristiques liées aux sols	32
3.6.5	Propriétés des matériaux	33
3.6.6	Paramètres généraux et facteurs de sécurité	33
3.7	Implémentation python	34
3.8	Validité du code de dimensionnement	35
3.9	Discussions sur la méthode	36
4	Analyse du dimensionnement du pieu	37
4.1	Variation de la puissance de l'éolienne	38
4.2	Variations des paramètres liés à l'eau	39
4.2.1	Variation de la profondeur d'eau	39
4.2.2	Variation de la hauteur de vague	40
4.3	Variation des paramètres liés au vent	41
4.3.1	Variation de l'intensité de référence	41
4.3.2	Variation du paramètre d'intensité de Weibull	41
4.3.3	Variation du paramètre de forme de Weibull	42
4.4	Variations des paramètres liés aux sols	43
4.4.1	Variation selon l'incertitude des courbes p-y	43
4.4.2	Variation selon les propriétés du sol	44
4.5	Conclusions du dimensionnement	45
5	Bilan carbone	46
5.1	Objectifs et champs	47
5.2	A1-A2 : Matières premières	48
5.2.1	Flux d'activités	48
5.2.2	Facteurs d'émissions par méthode	48
5.2.3	Calcul final	49
5.3	A3 : Fabrication	50
5.3.1	Flux d'activités	50
5.3.2	Facteurs d'émissions par opérations	50
5.3.3	Calcul final	52
5.4	A4-A5 : Transport et installation	53
5.4.1	Flux d'activités	53
5.4.2	Facteurs d'émissions	54
5.4.3	Calcul final	55
5.5	B1-B7 : Phase d'exploitation	56
5.5.1	Flux d'activités	56
5.5.2	Facteurs d'émissions	57

5.5.3	Calcul final	57
5.6	C-D : Démantèlement et crédit de recyclage	58
5.6.1	Flux d'activités	58
5.6.2	Facteurs d'émissions du démantèlement	59
5.6.3	Crédit de recyclage	59
5.6.4	Calcul final	59
6	Analyse et optimisations	60
6.1	Bilan carbone pour un cas de référence	60
6.2	Validation du bilan carbone avec la littérature	62
6.2.1	Comparaison avec un élément d'ossature	62
6.2.2	Comparaison avec un monopieu EEW	63
6.2.3	Comparaison avec un monopieu complexe EEW	63
6.3	Discussion sur la méthode du bilan carbone	64
6.4	Optimisations majeures	65
6.4.1	Facteur majeur : Origine de l'acier	65
6.4.2	Facteur majeur : Masse d'acier	66
6.4.3	Facteur majeur : Stratégie de recyclage	67
6.5	Amélioration selon les facteurs majeurs	68
6.6	Optimisations mineures	69
6.6.1	Distances	69
6.6.2	Type de carburant	69
6.6.3	Temps d'installation et de démantèlement	70
6.7	Potentiel écologique théorique du vibro-fonçage	71
7	Conclusion	72
	Bibliographie	73
	Table des figures	76
	Liste des tableaux	77
A	Code de dimensionnement	79

Chapitre 1

Introduction

Le 20 mars 2023, le dernier rapport du GIEC (AR6)[1] est publié et approuvé, condensant huit années de travaux scientifiques sur l'évolution du climat. Le constat du rapport est sans équivoque : la température moyenne mondiale a déjà augmenté de **1.1 degrés** par rapport à l'ère pré-industrielle, cette hausse est d'origine **humaine** et entre **3,3 à 3,6 milliards** personnes vivent dans des contextes hautement vulnérables aux changements potentiels dus au climat.



FIGURE 1.1 – Synthèse du GIEC par *ecologie.gouv.fr*[2]

La fenêtre des 1.5 degrés de réchauffement, prévus dans les accords de Paris pour 2050, est désormais plutôt attendue dès le début des années 2030. Pour rester sous cette limite, la communauté scientifique appelle à diviser presque par 2 les émissions mondiales en moins de cinq ans, un défi sans précédent [1].

Toujours selon le rapport du GIEC [1], environ 34% des émissions des gaz à effet de serre proviennent du secteur de l'énergie, prenant en compte la production d'électricité et de chaleur, sans compter son usage. Décarboner ce secteur est donc la pierre angulaire de toute stratégie climatique.

Face à cette urgence, la communauté des ingénieurs se doit de décarboner l'ensemble du système énergétique actuel. Les objectifs sont notamment d'améliorer l'efficacité des processus, d'électrifier des usages, de développer le nucléaire, mais également de déployer au maximum les sources d'énergies renouvelables telles que le solaire ou l'éolien. Cependant, si ces technologies ne consomment aucun combustible en phase d'exploitation, leur bilan carbone dépend fortement des matériaux et des méthodes de mise en œuvre, qu'il faut optimiser pour minimiser l'impact de ces sources d'énergie.

Parmi ces options renouvelables, l'énergie éolienne s'impose comme une des solutions les plus intéressantes, également dans sa variante offshore. Le potentiel des éoliennes en mer est considérable : des vents plus forts et plus réguliers ainsi que l'absence de conflits d'usage au niveau du sol, permettant d'installer des éoliennes de puissance toujours plus élevée.

Il est donc nécessaire de connaître les facteurs influents l'évaluation de l'empreinte carbone de ces éoliennes, et par conséquent de leurs fondations, plus communément à base de monopieux. Utiliser une approche simplifiée masquerait les leviers d'optimisation potentiels et pourrait amener à des choix écologiques sous-optimaux. Il est donc nécessaire de pousser plus loin la méthodologie des bilans carbone.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail. L'objectif va être de mieux comprendre l'ensemble dimensionnement-bilan carbone pour les fondations monopieux pour les éoliennes offshore, et ainsi identifier les leviers de réduction d'émissions de GES. Ce travail va s'articuler autour de quatre objectifs :

1. Modéliser de manière fiable le comportement structurel du monopieu soumis à des charges environnementales et en comprendre les variations ;
2. Établir une méthodologie d'analyse de cycle de vie complète ;
3. Quantifier l'influence des principaux paramètres de conception sur le bilan ;
4. Formuler des recommandations opérationnelles pour orienter les futurs projets vers des configurations plus performante écologiquement parlant.

Au-delà de ces objectifs, ce mémoire explorera également l'impact potentiel du vibro-fonçage, technique d'installation émergente qui promet de réduire les nuisances acoustiques et le temps d'installation, mais dont les effets sur le dimensionnement et le bilan carbone sont encore flous.

Chapitre 2

État de l'art

Cet état de l'art développe les connaissances actuelles à propos des fondations d'éoliennes offshore existantes, les méthodes d'implantation et de dimensionnement des monopieux, la méthodologie globale des bilans carbone et un résumé des résultats actuels pour les monopieux.

2.1 Fondation des éoliennes offshore

Il existe différents types de fondations pour les éoliennes offshore. Leur principale différenciation provient des profondeurs d'eau dans lesquelles elles sont utilisées et de leur principe de fonctionnement.

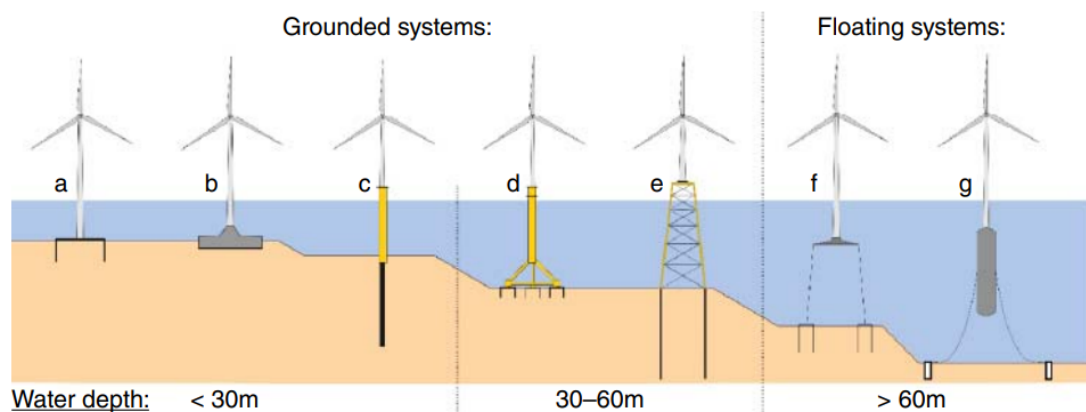


FIGURE 2.1 – Type de fondations selon les profondeurs [3]

Toutes les méthodes, actuelles ou en développement, sont présentées sur la figure 2.1 et en voici leurs descriptions :

- a) Caisson à succion : cylindre creux enfoncé par dépression, rapide à installer et démontable. Il est utilisé dans environ 1% des cas [4].
- b) Fondation gravitaire : structure massive reposant sur le sol par son poids, nécessite un sol plat. Elle est plus commune, étant utilisée pour 12 % des éoliennes offshore [4].

- c) Monopieu : pieu unique enfoncé dans le sol marin. Il s'agit de la méthode la plus courante pour les parcs éoliens en mer avec une utilisation de 63 % [4]. C'est également la méthode où la fabrication et la mise en pratique est la plus simple. Là où elle était auparavant limitée à une profondeur de 30 mètres, la méthode est désormais utilisée pour de plus grandes profondeurs.
- d) Tripode sur caisson d'aspiration : trois jambes fixées sur des caissons d'aspirations, apporte une meilleure stabilité que le monopieu, 3 % d'utilisation [4].
- e) Structure en treillis sur pieux : structure en treillis quadripode, ancrée par un pieu à chaque pied, seulement 7 % d'utilisation [4].
- f) Plateforme à jambes tendues (Tension Leg Platform) : concept de flotteur ancré verticalement au fond par des câbles tendus, encore en développement [3].
- g) Flottant à bouée : concept de long cylindre lesté, flotte grâce à sa stabilité, encore en développement [3].

Les fondations à base de monopieux sont donc les plus représentées, couvrant près de deux tiers du marché. Cela est dû à leur grande simplicité et leur large spectre d'utilisation. Développer le bilan carbone pour ces monopieux suffit donc à couvrir une majorité des éoliennes offshore.

2.2 Méthode d'implantation des monopieux

Pour l'implantation des monopieux, plusieurs méthodes d'installation sont actuellement possibles, chacune amenant des contraintes et des variations dans les propriétés du sol et du pieu en service.

2.2.1 Méthode par battage

La méthode par battage est la méthode la plus répandue actuellement dans le milieu offshore. Elle utilise un marteau hydraulique de très forte énergie qui vient frapper la tête du pieu, l'onde de choc transmet un effort axial qui brise progressivement la résistance du sol.

Elle est adaptée à la majorité des sols : roches très tendres, sables, argiles, etc. Elle a cependant les défauts d'apporter un risque d'endommagement du monopieu dans les sols rocheux ou glaciaires, et de se caractériser par une pollution sonore sous-marine très importante [5].

Sa grande utilisation depuis des dizaines d'années amène à une technologie qui est désormais parfaitement mature [5]. Les interactions du sol, les effets sur la fatigue du pieu ou les temps d'installation sont désormais bien connus et il est possible de modéliser presque parfaitement le comportement de ces pieux [6].

2.2.2 Méthode par vibro-fonçage

La méthode du vibro-fonçage est une technologie émergente : une vibration sinusoïdale est appliquée en tête de pieu, cette micro-mobilisation va réduire fortement la résistance du sol contre le mouvement du pieu, ce qui va permettre au poids propre et à l'effort dynamique de le faire descendre progressivement dans le sol.

Cette méthode présente de nombreux avantages : elle est beaucoup plus silencieuse, l'installation est bien plus rapide dans des conditions de sol adaptées comme avec le sable et le pieu n'a pas besoin d'être soutenu après la phase de pénétration. Elle n'est cependant pas très performante dans des sols cohérents [5].

Cependant, l'émergence seulement nouvelle de cette méthode apporte un défaut majeur : le manque de maturité. Les effets sur l'interaction entre le sol et le pieu, ainsi que sur la maniabilité des pieux sont encore méconnus [7], si bien qu'il est en général préférable de terminer le vibro-fonçage par un battage afin de s'assurer de ne pas avoir d'effet négatif sur le pieu [5].

Il s'agit donc d'une méthode qui est encore entourée d'une zone grise, dont le potentiel doit encore être défini sur la base des études en cours et son intérêt doit encore être développé.

2.2.3 Méthode par forage et cimentation

Cette méthode est la seule envisageable pour des sols rocheux, mais elle implique un coût élevé, un risque de pertes de ciment et la prédiction de vitesse de forage est moins développée que pour les prédictions de battage [5].

Il est possible de supposer que la méthode de forage n'est qu'une méthode secondaire. Dans ce travail, uniquement la méthode par battage et la méthode par vibro-fonçage seront considérées. Cela permettra d'effectuer un dimensionnement et un bilan carbone solides, tout en permettant une comparaison entre les méthodes.

2.3 Méthode de dimensionnement des monopieux

Un grand nombre de méthodes de calcul existent pour dimensionner les pieux des éoliennes offshore. Ces approches, plus ou moins complexes, reposent sur des modèles analytiques ou numériques.

Elles sont notamment détaillées dans l'ouvrage de référence de *S. Bhattacharya, Design of Foundations for Offshore Wind Turbines* [3], qui constitue une base théorique principale dans le cadre du dimensionnement complet pour les éoliennes offshore implantées par la méthode de battage.

2.3.1 Méthode de calcul simplifiée

La méthode de calcul simplifiée repose sur des formules analytiques issues de la mécanique des structures et d'interactions sol-structure basiques. Elle approxime le monopieu comme une simple poutre encastrée soumise à des charges horizontales et à des moments [3].

Le sol est modélisé comme un milieu élastique avec une raideur constante ou équivalente. On y calcule donc la raideur latérale et on vérifie uniquement certaines contraintes de base, comme le moment, les efforts internes, etc. Un résumé des points forts et des limites de cette approche est présenté dans le tableau 2.1 [3].

Avantages	Inconvénients
+ Très rapide + Analyses paramétriques simples + Vision globale ordre de grandeur + Pas de logiciels spécialisés + Suffisante pour faisabilité	- Hypothèses très simplificatrices - Ignore le comportement non linéaire du sol - Ignore effets cycliques - Non adapté aux sols complexes

TABLE 2.1 – Avantages et inconvénients de la méthode simplifiée

2.3.2 Méthode des courbes p-y

La méthode des courbes p-y est une modélisation plus avancée mais accessible de l'interaction sol-structure. Elle considère le pieu comme une poutre en flexion reposant sur une succession de ressorts non linéaires, répartis sur toute sa longueur. Ces ressorts vont obéir à des lois définies par des courbes p-y, reliant la pression du sol (p) au déplacement latéral (y) du pieu pour chaque type de sol [3] [6].

Les courbes généralement utilisées sont celles recommandées par l'API [6], bien qu'elles ne soient pas parfaitement adaptées à des millions de cycles de chargement, ce qui est le cas pour des éoliennes offshore [3].

Cette méthode permet de capturer les effets non linéaires du sol et de modéliser des profils de sols variés. Elle est bien plus adaptée pour analyser les déformations, les rotations au niveau du sol océanique et les efforts internes dans le pieu. Un résumé des points forts et des limites de cette approche est présenté dans le tableau 2.2.

Avantages	Inconvénients
+ Méthode reconnue et très utilisée + Comportement réel du sol + Adaptée pour effets cycliques + Parfait pour étude paramétriques	- Plus complexe - Données sol précises requises - Fastidieux selon nombres d'itérations - Pas d'effet 3D

TABLE 2.2 – Avantages et inconvénients de la méthode courbe p-y

2.3.3 Méthode avancée par éléments finis

Cette méthode utilise des logiciels de calculs numériques pour modéliser de manière très détaillée le monopieu, le sol environnant et leurs interactions entre eux. Ces modèles permettent d'intégrer la non-linéarité complète du sol, les hétérogénéités du terrain, le comportement cyclique et même des effets combinés.

C'est l'approche la plus utilisée pour des projets complexes ou innovants, où il est nécessaire d'avoir une optimisation très fine, que ce soit pour des questions de sécurité ou d'optimisation du design [3]. Un résumé des points forts et des limites de cette approche est présenté dans le tableau 2.3.

Avantages	Inconvénients
+ Très grande précision + Tous les phénomènes + Configurations atypiques possibles + Adapté à environnements complexes	- Très long et coûteux - Dépendance forte aux données d'entrée - Non-adapté à de la paramétrisation - Risque sur-modélisation

TABLE 2.3 – Avantages et inconvénients de la méthode par EF

Lors d'une étude du bilan carbone, il convient donc de choisir la méthode la plus adaptée selon les objectifs définis. Cette discussion ainsi que le développement du modèle choisi sont faits dans le chapitre 3.

2.4 Analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie est une méthode d'évaluation multi-critères qui permet d'examiner l'impact environnemental d'un produit ou d'un service. Il s'agit de la méthode la plus couramment utilisée pour le bilan carbone car elle permet de prendre en compte les effets durant toute la durée de vie de ces produits ou services.

Les normes **ISO 14040** et **ISO 14044** constituent le cadre de référence pour effectuer des ACV conformes au cadre international et recommandent la méthodologie suivante [8] :

- Objectif et champs : Définition de la finalité de l'étude, des frontières du bilan et l'unité fonctionnelle permettant la comparaison ;
- Analyse de l'inventaire : Recensements des flux entrants ou sortants (énergie, matériau, émissions) ;
- Évaluation de l'impact : Analyse des données collectées pour estimer les impacts environnementaux ;
- Interprétation des résultats : Identification des étapes les plus impactantes et analyse de sensibilité.

Ces ACV sont des outils puissants. Elles fournissent une vue d'ensemble des impacts environnementaux d'un produit, ce qui permet d'optimiser plus simplement l'utilisation des ressources en faisant ressortir les effets de toutes les étapes et de tous les flux.

La norme **EN15804+A2** [9] pousse la méthodologie nécessaire encore plus loin, proposant une distinction encore plus claire de ces étapes de cycles de vie dans le cadre de bâtiments notamment, simplifiant encore plus la comparaison entre produits.

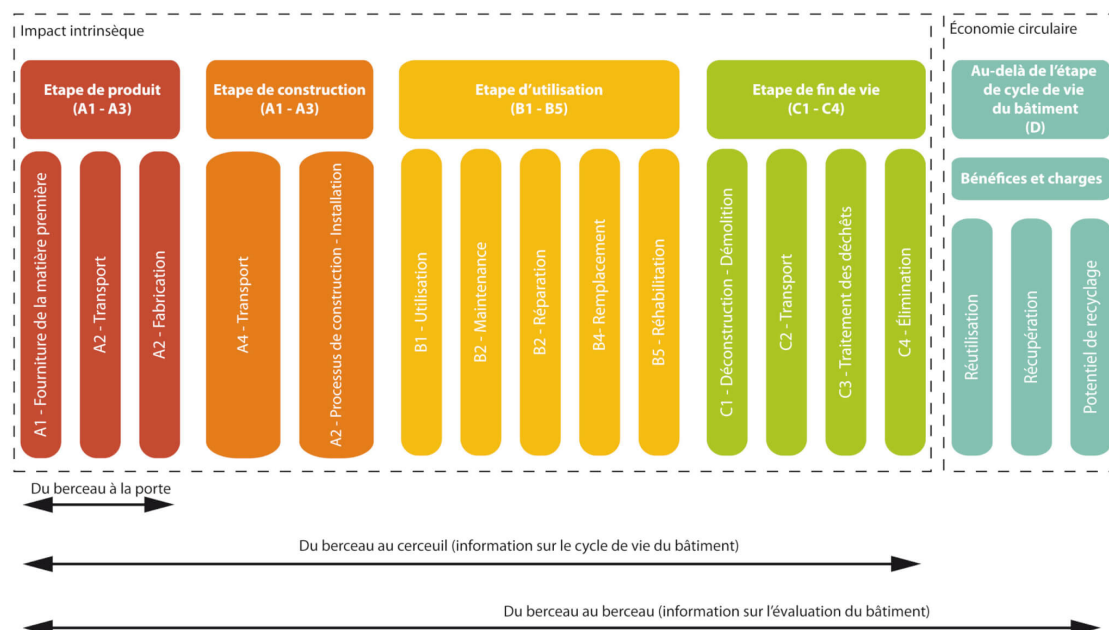


FIGURE 2.2 – Etapes du cycle de vie pour un monopieu [10]

La figure 2.2 montre cette séparation en modules, parfaitement développée pour le bilan carbone d'une construction et qui est donc applicable à un monopieu. Cette méthode est donc la méthode choisie et sera plus amplement développée dans le chapitre 5.

2.5 Bilan carbone spécifique aux monopieux

Afin de justifier et d'étudier le développement de l'éolien offshore, de nombreuses études de cycle de vie existent pour des parcs éoliens offshore dans leur globalité, mais elles traitent le poste "fondation" de manière agrégée et ne précisent pas les détails des calculs pour un monopieu à lui seul.

Or, un monopieu présente des caractéristiques techniques et logistiques particulières (tonnages d'acier, distance par rapport à l'usine, durée d'implantation ...) qui influent fortement sur le bilan carbone. Il est donc impossible, à partir de ces études globales, de déterminer quels sont les leviers d'action importants qui permettraient de réduire les émissions de carbone liées uniquement à ces monopieux.

Cependant, de rares entreprises se sont désormais prêtées à l'exercice des déclarations environnementales de produits, présentant des données essentielles dans un format standard et pratique. L'entreprise **EEW SPC** en a créé deux pour ses monopieux.

Une première déclaration sortie en 2022 (valide jusqu'en 2027) présente les résultats pour un monopieu sorti d'usine prêt à l'emploi. Elle considère une gamme très large, proposant des diamètres allant de 1.8 à 12 mètres, et de longueurs de 3 à 120 mètres. Cependant, seulement les résultats finaux sont présentés, bien que la méthode de recensement soit développée, tous les modules sont exprimés uniquement en fonction de la masse d'acier et uniquement les phases de fabrication, de traitement de déchets et de recyclage y figurent. [11]

La deuxième déclaration sortie en 2024 (valide jusqu'en 2029) présente les résultats pour un monopieu plus complet, ne nécessitant pas de pièce de transition, qui n'est pas le type de monopieu traité dans ce mémoire. La gamme proposée est cependant sensiblement la même et toutes les phases y sont recensées. [12]

Il n'existe donc pas de publication consacrée exclusivement au bilan carbone "de bout en bout" d'un monopieu, discutant des leviers d'optimisation possibles pour réduire son impact préventivement : c'est un véritable manque dans la littérature.

Chapitre 3

Dimensionnement

Le dimensionnement constitue une étape essentielle et structurante dans le cadre d'un bilan carbone. En effet, avant toute réflexion sur l'impact environnemental des fondations en monopieux offshore, il est impératif de déterminer avec précision leurs caractéristiques géométriques et mécaniques. Ces caractéristiques ont une influence directe sur les quantités de matières premières nécessaires, sur la taille des navires de transport ainsi que sur bon nombre de flux d'activités.

Ces informations techniques, telles que le diamètre ou la longueur des monopieux, dépendent directement des sollicitations dues au vent, aux vagues, au type de sol, etc. Il est donc impératif de bien comprendre comment les phénomènes physiques en présence fonctionnent, afin de comprendre quelles sont les variables qui ont une influence capitale sur le bilan.

La manière de mener le dimensionnement est donc un élément clé. Si cette dernière est trop imprécise, elle pourrait mener à des estimations carbone erronées, soit par excès dû à un surdimensionnement, soit par insuffisance due à un sous-dimensionnement, menant à terme à de mauvaises conclusions.

Ce chapitre est consacré à la construction de ce modèle de dimensionnement. Il s'ouvre par le choix de la méthode choisie, et les sections suivantes aborderont les hypothèses sur les contraintes environnementales et structurelles, les jeux de données utilisés et se termineront par une explication du code de dimensionnement créé à cet effet.

L'ensemble de ces étapes permettra de connaître les configurations de pieux optimisées selon des cas précis, et permettra également de connaître les influences potentielles des variables sur ces configurations finales.

3.1 Choix de la méthode de dimensionnement

Le choix de la méthode de dimensionnement n'est pas anodin : il détermine la précision des résultats, mais aussi les données nécessaires, la complexité des calculs et le temps requis pour chaque dimensionnement.

Une méthode trop simplifiée pourrait sous-estimer certains phénomènes ou paramètres critiques, voire même les ignorer. Là où une méthode trop lourde pourrait devenir rapidement inapplicable dans le cadre d'un mémoire, voire même contre-productive, devenant trop demandeuse en temps et en expérience pour une précision superflue.

Le modèle retenu doit donc s'appuyer sur plusieurs critères :

- La validité des hypothèses ;
- La robustesse des résultats obtenus ;
- La faisabilité du traitement numérique ;
- La capacité à restituer des tendances selon plusieurs variables.

Il est désormais nécessaire de déterminer la méthode à retenir pour ce mémoire. Chacune des méthodes présente des avantages et des limites spécifiques qu'il faut donc considérer au regard des objectifs fixés.

La méthode simplifiée offre un outil rapide et simple à mettre en œuvre. Son principal atout réside dans sa simplicité d'application qui permet d'obtenir un ordre de grandeur réaliste. Elle permet une flexibilité pour faire varier rapidement les paramètres d'entrée. Toutefois, cette simplicité se fait au détriment de la précision à cause de ses hypothèses. Elle ne permet pas de capturer les effets non linéaires et les interactions sol-pieu, qui sont pourtant des aspects fondamentaux dans le cas d'éoliennes offshore [3]. Il s'agit plutôt d'une méthode permettant un pré-dimensionnement, ce qui apparaît donc comme étant insuffisant pour une étude visant à estimer de manière fiable l'impact environnemental d'une structure.

À l'opposé, la méthode par éléments finis représente le niveau de précision le plus élevé. Elle permet un grand degré de détail pour tous les phénomènes physiques présents et il s'agit de la méthode la plus utilisée dans les projets industriels ou plus innovants. Toutefois, cette rigueur a un coût important : la mise en œuvre de telles simulations nécessite une expertise avancée, des ressources de calcul conséquentes ainsi que des données d'entrées très précises [3]. Dans le cadre d'un travail académique, et surtout dans le cadre d'une étude paramétrique, ce niveau d'exigence est disproportionné et contre-productif. Il risquerait de ralentir grandement l'étude, sans pour autant apporter un grain de précision qui justifie cette complexité.

Entre ces 2 extrêmes, la méthode des courbes p-y apparaît donc comme le parfait compromis. Elle propose un niveau de fidélité supérieur à la méthode analytique, en intégrant correctement le comportement non linéaire du sol et elle est par ailleurs reconnue dans le secteur offshore, faisant partie des méthodes couramment utilisées. Sa mise en œuvre, bien que plus complexe, reste accessible sans avoir recours à des outils numériques trop avancés. Cela en fait la méthode parfaite dans ce cas, répondant parfaitement aux critères de validité d'hypothèses, de robustesse des résultats et de paramétrisation.

Il convient cependant de garder une approche critique. D'une part, les courbes p-y disponibles ne sont pas parfaitement adaptées aux charges cycliques, un facteur de correction cyclique pouvant être ajouté même si le livre de *S. Bhattacharya* [3] met en garde sur une possible incertitude. D'autre part, le modèle ne permet donc pas de reproduire les effets tridimensionnels complexes.

Malgré ces limites, la méthode des courbes p-y offre une précision suffisante, une adaptabilité importante pour les études paramétriques qui vont être faites et une complexité raisonnable pour être intégrée efficacement. Elle constitue donc le choix le plus pertinent pour mener à bien le dimensionnement et est donc adoptée pour ce mémoire.

3.2 Vue d'ensemble

Avant de développer en détail chaque aspect du calcul, il est nécessaire de présenter le cadre global de la méthode pour garder un fil conducteur clair dans ce chapitre. Cette méthode est reprise dans plusieurs ouvrages, dont l'ouvrage de *Bhattacharya* [3]. Un aperçu du problème est donné sur la figure 3.1.

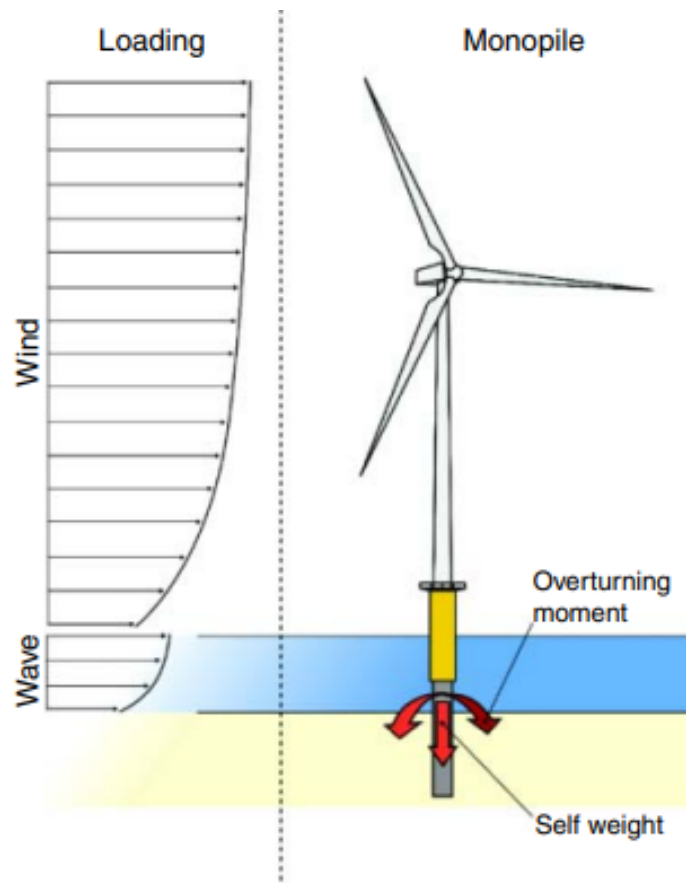


FIGURE 3.1 – Vue schématique d'une éolienne offshore et ses charges [3]

L'objectif de ce dimensionnement est de déterminer la configuration géométrique optimale du pieu, c'est-à-dire trouver le triplet longueur, diamètre et épaisseur (L, D, t) qui permet de garantir la stabilité mécanique de l'ensemble. Le pieu doit :

- S'ancrer avec suffisamment de rigidité dans le sol ;
- Résister mécaniquement aux sollicitations ;
- Ne pas excéder certaines contraintes dynamique.

Pour connaître l'ancrage dans le sol d'un pieu, il est nécessaire d'utiliser la méthode des courbes p-y, mentionnée précédemment. Elle permet d'évaluer les réponses latérales du sol en fonction de sa nature (sable, argile, etc.) et du déplacement du pieu, imposé par les sollicitations environnementales.

Ces sollicitations environnementales, elles, sont principalement dues au vent, agissant sur les pales de l'éolienne en elle-même, et aux vagues, exerçant une pression répartie le long du pieu. À cause de la variation constante d'intensité du vent et des vagues, plusieurs cas de charges de référence devront être considérés.

Tout ce processus nécessite de connaître un certain nombre de données d'entrée fixes, comme la densité de l'eau ou certaines propriétés des matériaux, ainsi que des variables, comme les modèles d'éoliennes choisis, les profondeurs d'eau, etc.

Durant ce chapitre, le plan suivant sera suivi pour développer chaque élément point par point :

- Charges environnementales ;
- Modélisation du sol ;
- Vérification des contraintes ;
- Définition des données d'entrée ;
- Optimisation et programme d'automatisation.

3.3 Charges

Les éoliennes offshore sont soumises à des sollicitations environnementales et à des charges dynamiques complexes, qui sont principalement dues aux vagues, au vent et au mouvement des pales.

Conformément à ce qui est conseillé dans l'ouvrage de *Bhattacharya* [3] et comme illustré sur la figure 3.2, il est possible de limiter ces phénomènes à 2 sollicitations environnementales et à une vérification dynamique :

- La force due au vent sur les pales ;
- La force due aux vagues sur le pieu ;
- La fréquence globale par rapport aux sollicitations.

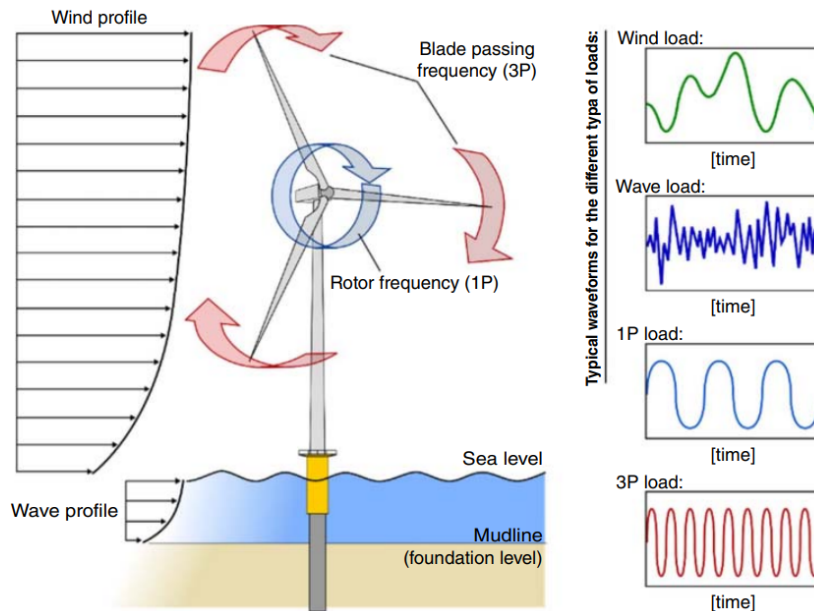


FIGURE 3.2 – Charges appliquées à l'éolienne et au pieu

Les forces sont influencées par les conditions météorologiques et maritimes qui sont hautement variables. Le vent a une intensité très variable durant l'année et la période et hauteur des vagues varient constamment. Il y a donc énormément de variations dans les cas de charges possibles et il peut être nécessaire de tous les prendre en compte.

C'est ce qui est prévu dans les codes **IEC (IEC 2005, 2009a, 2009b)** et le standard **DNV (DNV 2014)**, qui sont largement utilisés dans l'industrie offshore, et qui comptabilisent pas moins d'une centaine de situations différentes. Mais dans le cadre de ce travail, il est primordial d'en limiter leur nombre, car cela rendrait à nouveau la procédure longue et complexe.

La vérification de la fréquence du système, elle, se fait en même temps que les autres vérifications mécaniques et est donc développée dans la section 3.5.

3.3.1 Cas de charges

La complexité de ces cas fait l'objet de nombreux travaux, notamment dans l'article de *Arany et al.* [13]. En croisant les recommandations et les bonnes pratiques d'ingénierie, ses auteurs identifient les 5 cas de charges les plus représentatifs, couvrant les situations les plus critiques. Ces 5 cas sont résumés dans le tableau 3.1 et combinent différents comportements de vent et de vagues.

Cas	Description	Vent	vagues
E1	Conditions normales	U1	W1
E2	Charge extrême vague	U2	W4
E3	Charge extrême vent	U3	W2
E4	Rafale à la coupure	U4	W4
E5	Vent/vague désalignés	U2	W4 ($\phi = 90^\circ$)

TABLE 3.1 – Cas de charges représentatifs [13]

Dans le cas **E5**, l'angle $\phi = 90^\circ$ représente un désalignement orthogonal entre le vent et les vagues. Les notations **U1** à **U4** font référence aux modèles de vent et les notations **W1**, **W2** et **W4** font référence aux modèles de vagues, qui sont décrits dans la section 3.3.1.

Mais même si ces 5 cas semblent parfaitement adaptés pour couvrir l'intégralité des cas critiques, une réflexion peut être menée sur l'intérêt de conserver l'ensemble, pour savoir s'il est possible d'encore plus réduire cette sélection. En effet, de nouveau selon l'article de *Arany et al.* [13], les cas **E2** et **E3** sont ceux qui, au final, gouvernent généralement les cas extrêmes : ils représentent respectivement un cas de mer très agitée et un cas de rafale très violente.

Le cas **E1** quant à lui, bien qu'il ne soit pas contraignant, représente la condition opérationnelle standard. Il est donc conservé, notamment pour d'éventuelles vérifications en fatigue ou en service, et pour avoir une idée des charges les plus communes. Ainsi, pour ce travail, il a été décidé de retenir trois cas de charge pour le dimensionnement :

- **E1** : cas de fonctionnement nominal (**U1**, **W1**) ;
- **E2** : cas extrême à dominance hydrodynamique (**U2**, **W4**) ;
- **E3** : cas extrême à dominance aérodynamique (**U3**, **W2**).

Il est désormais nécessaire de comprendre comment ces modèles de vent et de vagues fonctionnent.

Description des modèles de vent

La vitesse du vent considérée dans les calculs dépend à la fois du modèle d'éolienne et du modèle de vent à considérer. Selon *Arany et al.* [13], cette dernière se calcule comme une somme de 2 composantes de la manière suivante :

$$U = U_R + u \quad (3.1)$$

Avec :

- U : la vitesse du vent de calcul ;
- U_R : la vitesse nominale du rotor, différentes selon l'éolienne ;
- u : la composante turbulente de la vitesse, différente selon les conditions de vent.

Vitesse nominale du rotor U_R

La vitesse nominale du vent correspond à la vitesse à laquelle une éolienne atteint sa puissance maximale. C'est une valeur de référence dans le calcul de la poussée. Cette vitesse dépend directement du modèle d'éolienne choisi et est généralement fournie par le producteur de l'éolienne.

Composante turbulente de la vitesse u

La composante turbulente u prend en compte les variations rapides autour de la vitesse U_R définie précédemment. Elle permet de prendre en compte les turbulences atmosphériques, comme par exemple les rafales courtes, les oscillations de vitesse sur quelques secondes et l'agitation désordonnée de l'air. Les valeurs de u dépendent du modèle de turbulence correspondant. Pour les modèles **U1**, **U2** et **U3** qui sont considérés, l'article de *Arany et al.* [13] et l'ouvrage de *Bhattacharya* [3] proposent des modèles, découlant de plusieurs codes, notamment le *code IEC* [14] :

Modèle **U1** : Turbulence normale à vitesse nominale (NTM)

$$u = 1.28 \cdot I_{\text{ref}} \cdot (0.75U_R + 5.6) \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6L_k}{U_R} f_{1p,\max} + 1\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (3.2)$$

Modèle **U2** : Turbulence extrême à la vitesse nominale (ETM)

$$u = 2 \cdot 2 \cdot I_{\text{ref}} \cdot \left(0.072 \left(\frac{U_{\text{avg}}}{2} + 3\right) \left(\frac{U_R}{2} - 4\right) + 10\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{6L_k}{U_R} f_{1p,\max} + 1\right)^{\frac{2}{3}}}} \quad (3.3)$$

Modèle **U3** : Rafale extrême de fonctionnement à la vitesse nominale (EOG)

$$u = \min \left(1.35 \cdot (U_{10,1y} - U_R) ; 3.3 \frac{\sigma_{U,c}}{1 + 0.1 \frac{D}{L_k/8}} \right) \quad (3.4)$$

Avec :

- I_{ref} : l'intensité de turbulence de référence ;
- $L_k = 340.2$: l'échelle de longueur intégrale ;
- $f_{1p,max}$: la fréquence maximale du rotor ;
- D : le diamètre du rotor ;
- U_{avg} : la vitesse du vent moyenne sur le site, qui se calcule selon la formule 3.5 ;
- $U_{10,1y}$: la vitesse maximale du vent attendue en une année sur 10 minutes au niveau du rotor, qui se calcule selon la formule 3.7 ;
- $\sigma_{U,C}$: l'écart-type de la vitesse du vent, qui se calcule selon la formule 3.8.

$$U_{avg} = K \cdot \gamma(1 + 1/s) \quad (3.5)$$

$$U_{10,50y} = K \cdot (\ln(1 - 0.98^{\frac{1}{52596}}))^{\frac{1}{s}} \quad (3.6)$$

$$U_{10,1y} = 0.8 \cdot U_{10,50y} \quad (3.7)$$

$$\sigma_{U,c} = 0.11 \cdot U_{10,1y} \quad (3.8)$$

Avec K, le paramètre d'échelle de la distribution de Weibull, et s, le paramètre de forme de la distribution de Weibull, développés dans la section 3.6.3.

Description des modèles de vagues

Il est possible de produire une équation très précise pour connaître la forme que prennent les vagues en tout instant. Cependant, l'article de *Arany et al.* [13] et l'ouvrage de *Bhattacharya* [3] conseillent vivement de se concentrer uniquement sur la hauteur et la période de la vague variant selon les modèles, dépendants de tous $H_{s,50y}$, la hauteur de vague significative pour une période de retour de 50 ans.

Modèle **W1** : État de mer modérée de période de retour 1 an

$$H_{s,1y} = 0.8 \cdot H_{s,50y} \quad T_{s,1y} = 11.1 \cdot \sqrt{\frac{H_{s,1y}}{g}} \quad (3.9)$$

Modèle **W2** : État de mer extrême de période de retour de 1 an

$$H_{m,1y} = H_{s,1y} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{10800}{T_{s,1y}} \right)} \quad T_{m,1y} = 11.1 \cdot \sqrt{\frac{H_{m,1y}}{g}} \quad (3.10)$$

Modèle **W4** : État de mer extrême de période de retour de 50 ans

$$H_{m,50y} = H_{s,50y} \cdot \sqrt{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{10800}{T_{s,50y}} \right)} \quad T_{m,50y} = 11.1 \cdot \sqrt{\frac{H_{m,50y}}{g}} \quad (3.11)$$

3.3.2 Force due au vent sur les pales

La force générée par le vent sur l'éolienne provient des pales, qui convertissent l'énergie cinétique de l'air en énergie mécanique. Cette force est transmise au mât, puis à la fondation et contribue finalement fortement aux efforts imposés au pieu. Suivant les recommandations de *Arany et al.* [13], cette force est simplement modélisée à l'aide de la formule 3.12 et le point d'application de la force avec la formule 3.13 :

$$F_{pales} = \frac{1}{2} \rho_{air} C_T A_r U^2 \quad (3.12)$$

$$z_{F,Pales} = h_w + h_{moyeu} \quad (3.13)$$

Avec :

- ρ_{air} : la masse volumique de l'air ;
- C_T : le coefficient de poussée ;
- A_r : la surface balayée par le rotor, qui se calcule selon la formule 3.14
- U : la vitesse de vent à considérer, qui se calcule selon la formule 3.1
- h_w : la hauteur d'eau ;
- h_{moyeu} : la hauteur du moyeu.

$$A_r = \pi (R_{rotor})^2 \quad (3.14)$$

Coefficient de poussée C_t

Le coefficient de poussée C_T dépend de la vitesse du vent et du design de la turbine. Des courbes $C_T(U)$ sont potentiellement fournies par les constructeurs d'éoliennes. Cependant, ce calcul peut s'avérer fastidieux et l'approximation 3.15 est proposée dans l'article de *Arany et al.* [13] pour les cas de vent **U1**, **U2** et **U3**. Les coefficients de poussée dépendent de la vitesse nominale du vent, et donc du modèle d'éolienne.

$$C_T = \frac{3.5 \cdot (2 \cdot U_R + 3.5)}{U_R^2} \approx \frac{7}{U_R} \quad (3.15)$$

Bien que cela n'arrive que très rarement, il est bon de noter que le coefficient a une valeur bornée à 1, et donc que la formule ne fonctionne que pour des U_R supérieurs à 7, après quoi il est nécessaire de remplacer directement la valeur.

3.3.3 Force due aux vagues sur le pieu

Les vagues exercent une force répartie sur la portion immergée du pieu. L'ouvrage de *Bhattacharya* [3] mentionne plusieurs méthodes possibles, certaines supposant des vagues linéaires, d'autres plus poussées d'ordre supérieur comme la théorie des vagues de Stokes, etc. Parmi les nombreuses possibilités, l'auteur recommande cependant la méthode utilisant les équations de Morison.

Cette méthode pose l'hypothèse que 2 phénomènes vont influencer le pieu, un phénomène d'inertie et un phénomène de traînée. Les forces et moments se décomposent donc de la manière suivante :

$$F(t) = F_D(t) + F_I(t) \quad (3.16)$$

$$M(t) = M_D(t) + M_I(t) \quad (3.17)$$

Avec :

- $F_D(t)$: la force de traînée ;
- $F_I(t)$: la force d'inertie ;
- $M_D(t)$: le moment dû à la force de traînée ;
- $M_I(t)$: le moment dû à la force d'inertie.

Comme conseillé dans l'ouvrage de *Bhattacharya* [3], pour procéder au dimensionnement, il est préférable de ne considérer que les cas extrêmes. Il n'est donc pas nécessaire de développer les formules liées aux forces et aux moments en entier, qui possèdent en réalité beaucoup d'éléments liés à la temporalité. C'est une approche plus judicieuse car elle permet de gagner beaucoup de temps.

Formules maximisées

Les forces maximales et les moments maximaux pour la traînée se calculent selon les formules 3.18 et 3.19.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho_w D C_D \cdot \frac{\pi^2 H^2}{T^2 \sinh^2(kS)} \cdot \left(\frac{e^{2k(S+\eta)} - e^{-2k(S+\eta)}}{8k} + \frac{S + \eta}{2} \right) \quad (3.18)$$

$$M_D = \frac{1}{2} \rho_w D C_D \cdot \frac{\pi^2 H^2}{T^2 \sinh(kS)} \cdot \left[\left(\frac{S + \eta}{8k} - \frac{1}{16k^2} \right) e^{2k(S+\eta)} - \left(\frac{S + \eta}{8k} + \frac{1}{16k^2} \right) e^{-2k(S+\eta)} + \left(\frac{S + \eta}{2} \right)^2 + \frac{1}{8k^2} \right] \quad (3.19)$$

Et les forces maximales et les moments maximaux pour l'inertie se calculent selon les formules 3.20 et 3.21.

$$F_I = \frac{1}{2} \rho_w D^2 C_m \frac{\pi^3 H}{T^2 \sinh(kS)} \cdot \left(\frac{\sinh(k(S + \eta))}{k} \right) \quad (3.20)$$

$$M_I = \frac{1}{2} \rho_w D^2 C_m \cdot \frac{\pi^3 H}{T^2 \sinh(kS)} \cdot \left[\left(\frac{S + \eta}{2k} - \frac{1}{2k^2} \right) e^{k(S+\eta)} - \left(\frac{S + \eta}{8k} - \frac{1}{2k^2} \right) e^{-k(S+\eta)} + \frac{1}{k^2} \right] \quad (3.21)$$

Avec :

- ρ_w : la masse volumique de l'eau ;
- D : le diamètre de la structure ;
- S : la profondeur de l'eau ;
- k : le nombre d'onde ;
- H : la hauteur de vague ;
- T : la période ;
- η : l'élévation de la surface de l'eau
- C_D : le coefficient de traînée ;
- C_m : le coefficient d'inertie.

Le diamètre du pieu D

Le diamètre du pieu est une variable plus spécifique dans ce calcul. Pour rappel, l'objectif global du dimensionnement est de déterminer le triplet (L, D, t) nécessaire pour un cas de figure défini. Mais ici, le diamètre est lui-même un paramètre qui va déterminer les forces et moments liés aux vagues. La méthode de calcul globale est donc une méthode récursive, car chaque modification de diamètre va également modifier les forces subies par le pieu, ce qui va demander une modification du diamètre, de refaire le calcul et ainsi de suite.

C'est une des grandes caractéristiques du dimensionnement dans le cadre des éoliennes offshore qui est ici mise en lumière. Couplée avec le besoin d'optimiser la taille du pieu, que ce soit pour des raisons financières ou écologiques, il faut obligatoirement passer par une méthode numérique pour exécuter les calculs.

L'élévation de surface η

L'élévation de la surface d'eau η prend une valeur différente en fonction du phénomène physique concerné. Pour les forces de traînée, la formule 3.22 est considérée et pour les forces d'inertie, ce sera la formule 3.23.

$$\eta_D = H/2 \quad (3.22)$$

$$\eta_I = 0 \quad (3.23)$$

Le nombre d'onde k

Le nombre d'onde k est déterminé à l'aide de la relation de dispersion 3.24 qui sera résolue numériquement.

$$\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = gk \cdot \tanh kS \quad (3.24)$$

3.3.4 Résultante

Une fois les forces et les moments dus au vent et aux vagues pour chaque modèle connus, il suffit de les additionner en tenant compte des cas de charges choisis et d'un facteur de sécurité.

Cas **E1** : Conditions normales (**U1-W1**)

$$F_{E1} = \lambda_{env} \cdot (F_{U1} + F_{W1}) \quad (3.25)$$

$$M_{E1} = \lambda_{env} \cdot (M_{U1} + M_{W1}) \quad (3.26)$$

Cas **E2** : Charges extrêmes de vagues (**U2-W4**)

$$F_{E2} = \lambda_{env} \cdot (F_{U2} + F_{W4}) \quad (3.27)$$

$$M_{E2} = \lambda_{env} \cdot (M_{U2} + M_{W4}) \quad (3.28)$$

Cas **E3** : Charges extrêmes de vent (**U3-W2**)

$$F_{E3} = \lambda_{env} \cdot (F_{U3} + F_{W2}) \quad (3.29)$$

$$M_{E3} = \lambda_{env} \cdot (M_{U3} + M_{W2}) \quad (3.30)$$

Avec λ_{env} , le coefficient de sécurité à prendre en compte pour les charges environnementales.

3.4 Modélisation sol-pieu (p-y)

Dans la méthode de dimensionnement retenue, la réponse du sol est modélisée à l'aide des courbes p-y. Il s'agit d'une méthode semi-empirique couramment utilisée pour simuler l'interaction entre un pieu et le sol. Certaines courbes sont détaillées dans les recommandations *API (American Petroleum Institute)* [6] et sont notamment reprises dans l'ouvrage de *Bhattacharya* [3], qui sert de référence dans ce travail pour l'explication de la méthode.

3.4.1 Principe fondamental

L'idée centrale est de modéliser le pieu comme une poutre encastrée en sa base. Le sol est simulé par une série de ressorts horizontaux non linéaires continus répartis tout le long de cette poutre. Une vue schématique, visible sur la figure 3.3, est proposée dans le cours *LG CIV2071 – Geotechnics* dispensé par *H.Rattez* [15].

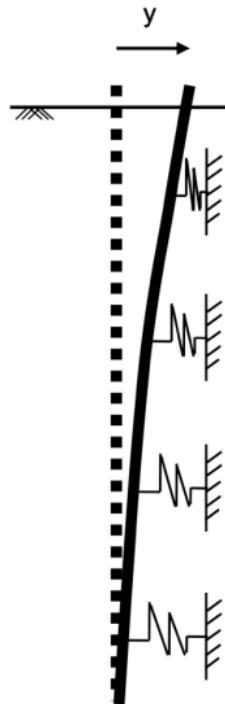


FIGURE 3.3 – Vue schématique de la méthode des courbes p-y [15]

Hypothèses fondamentales :

- Le pieu est considéré comme une poutre élastique (loi d'Euler-Bernoulli) ;
- Le sol réagit localement, sans interaction entre les ressorts (Winkler)
- Chaque ressort suit une loi $p = f(y)$, spécifique à chaque sol et définie empiriquement.

Équations de base

La théorie de la poutre d'Euler-Bernoulli est appliquée avec les relations d'équilibre mécaniques suivantes :

$$M(z) = -EI \frac{d^2 y(z)}{dz^2} \quad (3.31)$$

$$V(z) = \frac{dM}{dz} = -EI \frac{d^3 y(z)}{dz^3} \quad (3.32)$$

$$p(y, z) = \frac{dT}{dz} = -EI \frac{d^4 y(z)}{dz^4} \quad (3.33)$$

Avec :

- $M(z)$: le moment fléchissant ;
- $V(z)$: l'effort tranchant ;
- E : le module de Young du pieu ;
- I : le moment quadratique du pieu ;
- $y(z)$: le déplacement ;
- $p(z)$: le module de réaction du sol.

En réarrangeant les termes de l'équation 3.33, l'équation différentielle à résoudre est obtenue :

$$EI \frac{d^4 y(z)}{dz^4} + p(y, z) = 0 \quad (3.34)$$

Comme $p(y, z)$ dépend de y , cette équation devient non linéaire et nécessite une résolution numérique (abordée dans la section 3.7) pour être résolue. Les conditions frontières 3.35 et 3.36 sont utilisées pour la résoudre :

$$M(0) = M = EI \frac{d^2 y(z)}{dz^2} \quad V(0) = V = EI \frac{d^3 y(z)}{dz^3} \quad (3.35)$$

$$M(L) = 0 \quad V(L) = 0 \quad (3.36)$$

À noter que ce sont surtout le diamètre et la longueur du pieu qui vont varier, car une formule, recommandée par l'ouvrage de *Bhattacharya* [3] préconise l'épaisseur nécessaire selon le diamètre :

$$t = \min \left(0.00635 + \frac{D}{100}; 0.09 \right) \quad (3.37)$$

3.4.2 Courbes p-y pour le sable

Chaque type de sol agit selon une formule empirique différente qui décrit précisément la relation entre le module de réaction p et le déplacement y . Ces courbes sont majoritairement établies à partir d'essais de terrain ou à partir de résultats expérimentaux. Une partie de ces courbes regroupée sur le site internet de *Pile groups* [16], qui explique sommairement l'origine de ces courbes et dans quel cadre elles sont utilisables.

Pour le cas du sable, les courbes API [6], largement reconnues, sont utilisées. Elles sont décrites sur le site de *Pile groups* [17]. La formule générale s'écrit :

$$p_{sand}(y, z) = A(z) p_u(z) \tanh \left(\frac{kz}{A(z) p_u(z)} y \right) \quad (3.38)$$

$$A(z) = \max(3 - 0.8 \frac{z}{D}; 0.9) \quad (3.39)$$

$$p_u = \min((C_1 z + C_2) \gamma' z; C_3 D \gamma' z) \quad (3.40)$$

Avec :

- $p_{sand}(y, z)$: la résistance latérale du pieu, déplacement y , une profondeur z ;
- $A(z)$: le facteur prenant en compte la condition statique ;
- $p_u(z)$: la résistance latérale ultime à une profondeur z ;
- k : le module de réaction initial du sol ;
- D : le diamètre du pieu ;
- γ' : le poids volumique de sol saturé.

Ce qui donne le graphe 3.4. La résistance du sol augmente initialement de manière quasi-linéaire, avant de plafonner à la résistance latérale ultime du sol, qui augmente avec la profondeur. La valeur de p_{sand} va donc augmenter selon la profondeur et l'intensité du déplacement imposé.

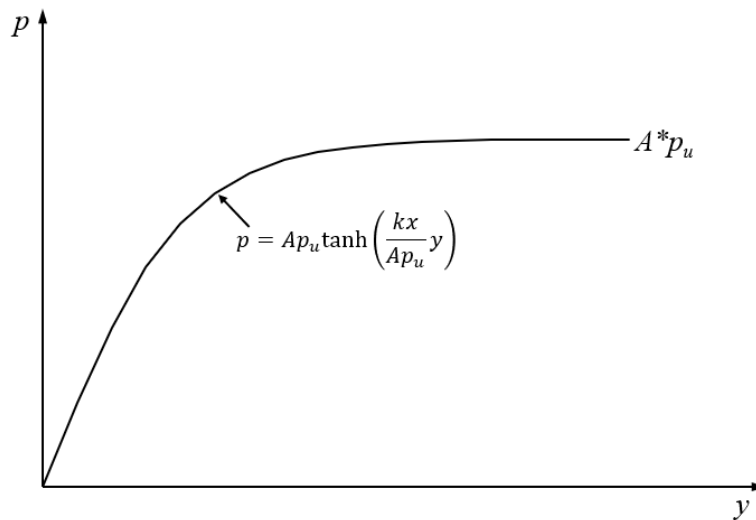


FIGURE 3.4 – Forme de la courbe p-y pour le sable [18]

Les trois coefficients C_1 , C_2 et C_3 sont des facteurs déterminés empiriquement, dont les valeurs s'obtiennent à partir du graphique présent sur la figure 3.5, ce qui donne les formules 3.41, 3.42 et 3.43.

$$C_1 = \frac{(\tan \beta)^2 \cdot \tan \alpha}{\tan(\beta - \phi')} + K_0 \left[\frac{\tan \phi' \cdot \sin \beta}{\cos \alpha \cdot \tan(\beta - \phi')} + \tan \beta (\tan \phi' \cdot \sin \beta - \tan \alpha) \right] \quad (3.41)$$

$$C_2 = \frac{\tan \beta}{\tan(\beta - \phi')} - K_a \quad (3.42)$$

$$C_3 = K_a \left[(\tan \beta)^8 - 1 \right] + K_0 \cdot \tan \phi' \cdot (\tan \beta)^4 \quad (3.43)$$

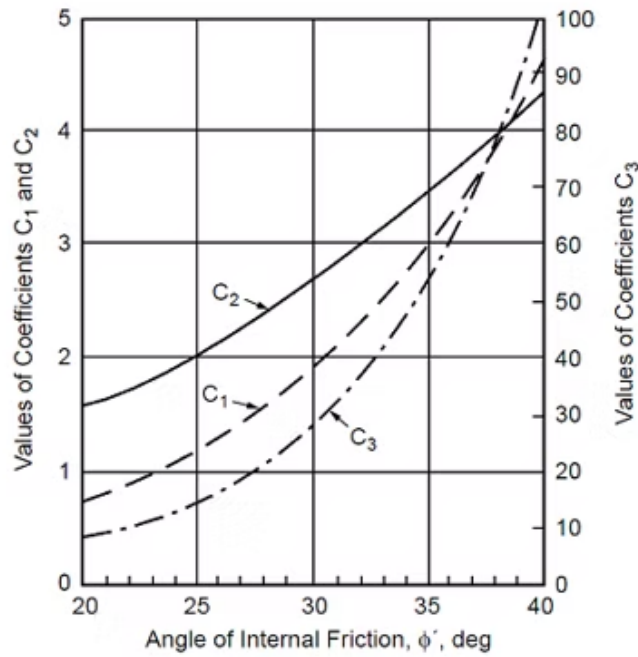


FIGURE 3.5 – Coefficients C_1 , C_2 et C_3 pour le sable [6]

Avec :

- ϕ' : l'angle de friction du sol ;
- α : l'angle d'interface, de formule 3.44 ;
- β : l'angle de rupture, de formule 3.44 ;
- K_0 : le coefficient de pression à l'état de repos ;
- K_a : le coefficient de pression en état actif, de formule 3.44.

$$\alpha = \frac{\phi'}{2}, \quad \beta = 45^\circ + \frac{\phi'}{2}, \quad K_a = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \quad (3.44)$$

3.4.3 Variation sur les courbes p-y

Bien que les courbes développées ci-dessus soient parfaitement utilisables dans le cadre de cette étude, il est bon de se poser des questions quant à leur validité et aux différents effets dus à une modification de leurs valeurs finales.

En effet, ces courbes API ont été créées et étudiées il y a plusieurs dizaines d'années et de nouvelles expériences ont été menées depuis, revoyant la valeur de certains facteurs et modifiant légèrement les courbes obtenues par calculs [16].

Elles ne prennent également pas en compte les modifications possibles dues à l'utilisation d'autres méthodes d'implantation du pieu dans le sol. En effet, le battage a été utilisé lors des essais empiriques qui ont permis de déduire ces courbes, les valeurs en utilisant le vibro-fonçage sont donc potentiellement légèrement différentes.

Au lieu de développer précisément chacune de ces courbes, un facteur arbitraire est imposé afin de faire varier la valeur finale de la résistance du sol en y ajoutant une variable var_{sol} . Cette variable va permettre d'étudier plus amplement les effets de la résistance du sol sur le dimensionnement global.

$$p_{final}(y, z) = var_{sol} \cdot p_{sand}(y, z) \quad (3.45)$$

Pour donner un ordre d'idée, des essais récents ont permis de voir que l'utilisation du vibro-fonçage amènerait à une résistance finale à hauteur de 80% de la valeur par battage.

3.5 Vérification mécanique

3.5.1 Déplacement en service (ELS)

Durant la vie de l'éolienne, il convient de limiter la déformation de la superstructure. Il faut limiter à la fois le déplacement et la rotation du pieu au niveau du sol marin, l'article de *Arany & al.* [13] permet de tirer les limitations suivantes :

$$y_0 \leq 0.05 \cdot D \quad (3.46)$$

$$\theta_0 \leq 0.5^\circ \quad (3.47)$$

Avec y_0 , le déplacement du pieu à la surface du sol, D , le diamètre du pieu et θ_0 , la rotation du pieu au sol marin. Si ces limites sont dépassées, la valeur du triplet (L, D, t) est rejetée et une nouvelle configuration est considérée.

3.5.2 Résistance au cisaillement (ULS)

La section tubulaire ne doit pas se plastifier lorsque le pieu reprend les réactions latérales du sol. Il faut donc vérifier que l'effort tranchant maximal n'est pas atteint.

$$|V_{Ed}(z)| \leq V_{pl,Rd} \quad (3.48)$$

Où :

$$V_{Ed}(z) = E \cdot I \cdot \frac{d^3 y}{dz^3} \quad (3.49)$$

$$V_{pl,Rd} = A_v \cdot \frac{f_y}{\lambda_M} / \sqrt{3} \quad (3.50)$$

Avec :

- $V_{Ed}(z)$: l'effort tranchant effectif selon la hauteur z ;
- $V_{pl,Rd}$: l'effort tranchant maximal pour la section ;
- E : le module de Young de l'acier ;
- I : l'inertie du pieu ;
- A_v : l'aire efficace au cisaillement ;
- f_y : la limite d'élasticité de l'acier ;
- λ_M : le coefficient de sécurité pour l'acier.

3.5.3 Résistance à la flexion (ULS)

La même vérification que pour l'effort tranchant est faite pour la flexion, il faut à nouveau assurer que la section n'atteint jamais une plastification locale.

$$|M_{Ed}(z)| \leq M_{pl,Rd} \quad (3.51)$$

Où :

$$M_{Ed}(z) = E \cdot I \cdot \frac{d^2 y}{dz^2} \quad (3.52)$$

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot \frac{f_y}{\lambda_M} \quad (3.53)$$

Avec :

- $M_{Ed}(z)$: la flexion effective selon la hauteur z ;
- $M_{pl,Rd}$: la flexion maximale pour la section ;
- E : le module de Young de l'acier ;
- I : l'inertie du pieu ;
- W_{pl} : l'aire efficace au cisaillement ;
- f_y : la limite d'élasticité de l'acier ;
- λ_M : le coefficient de sécurité pour l'acier.

3.5.4 Vérification de la fréquence propre

La fréquence propre du système peut être calculée afin de vérifier que l'éolienne ne rentre pas en résonance avec le passage de ses pales. Malheureusement, aucune méthode ne permet de considérer la rigidité du sol en utilisant les courbes p-y, il faut donc se rabattre sur une méthode simplifiée, présentée dans l'article de *Arany & al.* [13].

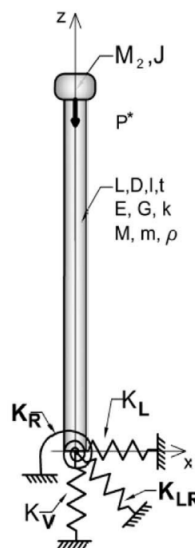


FIGURE 3.6 – Représentation de la rigidité de l'éolienne via des ressorts [13]

La méthode considère l'éolienne comme une poutre posée sur 3 ressorts, un de raideur latérale, un de raideur en rotation et un couplage des deux, comme présenté sur la figure 3.6. La raideur des ressorts peut se faire selon les formules 3.54 de *Poulos H. & Davis* [19] et la vérification nécessaire selon la formule 3.55 [13].

$$K_L = 1.74n_h^{\frac{3}{5}} (E_p I_p)^{\frac{2}{5}} \quad K_R = -0.99n_h^{\frac{2}{5}} (E_p I_p)^{\frac{3}{5}} \quad K_{LR} = 1.48n_h^{\frac{1}{5}} (E_p I_p)^{\frac{4}{5}} \quad (3.54)$$

$$1.1 \cdot f_{1p} \leq f_0 = C_L \cdot C_R \cdot C_S \cdot f_{FB} \leq 0.9 \cdot f_{3p} \quad (3.55)$$

Avec f_0 , la fréquence propre de l'ensemble, f_{FB} , la fréquence propre de l'éolienne, C_L et C_R , les coefficients de flexibilité latérale et rotationnelle de la fondation, C_S , le coefficient de flexibilité de la sous-structure et f_{1p} et f_{3p} , la fréquence de rotation et de passage de pales de l'éolienne.

$$\eta_L = \frac{K_L L_T^3}{EI_\eta} \quad \eta_{LR} = \frac{K_{LR} L_T^2}{EI_\eta} \quad \eta_R = \frac{K_R L_T}{EI_\eta} \quad (3.56)$$

$$\text{avec } EI_\eta = E_T I_T f(q) \text{ où } q = \frac{D_b}{D_t} \quad (3.57)$$

$$f(q) = \frac{2q^2(q-1)^3}{3 \cdot (2q^2 \ln(q) - 3q^2 + 4q - 1)} \quad (3.58)$$

Ce qui permet de calculer les facteurs de la formule 3.55 :

$$C_L = 1 - \frac{1}{1 + 0.6 \left(\eta_L - \frac{\eta_{LR}^2}{\eta_R} \right)} \quad (3.59)$$

$$C_R = 1 - \frac{1}{1 + 0.5 \left(\eta_R - \frac{\eta_{LR}^2}{\eta_L} \right)} \quad (3.60)$$

$$C_S = \sqrt{\frac{1}{1 + \left(1 + \frac{L_s}{L_T} \right)^3 * \frac{E_T I_T}{E_P I_P} - \frac{E_T I_T}{E_P I_P}}} \quad (3.61)$$

$$f_{FB} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3E_T I_T}{L_T^3 (m_{RNA} + \frac{33}{140} m_T)}} \quad (3.62)$$

Avec E_P et I_P , le module de Young et l'inertie du pieu. L_T et L_S , la longueur de la tour et la distance au sol. E_T , I_T , D_b et D_t , le module de Young, l'inertie, le diamètre en bas et en haut de la tour. m_{RNA} et m_T , les masses de l'assemblage rotor-nacelle et de la tour.

À noter que dans ce travail, cette vérification n'est faite qu'à titre indicatif, car elle repose sur des hypothèses de sols simplifiées, incompatibles avec la méthode plus réaliste des courbes p-y. Elle ne sera donc pas appliquée dans le code de dimensionnement par défaut et une incertitude subsiste donc autour de cette fréquence, et la résonance pourrait légèrement augmenter les dimensions optimales du pieu.

3.6 Données d'entrée

3.6.1 Caractéristiques des éoliennes

Il est essentiel de disposer des caractéristiques géométriques et mécaniques réalistes pour les éoliennes offshore considérées, car elles déterminent l'intensité des charges dues au vent. Afin de garantir la cohérence et la qualité des données, les modèles des turbines utilisés sont issus de références développées par le *National Renewable Energy Laboratory (NREL)* [20] et l'*IEA Wind Task 37* [21] [22] [23].

Ces modèles sont conçus spécialement pour servir de support commun aux chercheurs et aux ingénieurs dans le domaine de l'énergie éolienne, et ils s'avèrent parfaitement adaptés à un travail académique, car ils offrent un accès libre à des données techniques très détaillées.

Quatre éoliennes offshore représentatives sont sélectionnées, couvrant une gamme de puissance allant de 5 MW à 22 MW, ce qui permet de mettre en lumière l'influence de leurs caractéristiques. Un résumé des valeurs se trouve dans le tableau 3.2.

Modèle	D_{rotor} [m]	h_{moyeu} [m]	U_R [m/s]	C_T [-]	$f_{1p,max}$ [Hz]
NREL 5 MW	126	90	11.4	0.614	0.202
IEA 10 MW	198	119	11	0.636	0.147
IEA 15 MW	240	150	10.59	0.661	0.126
IEA 22 MW	284	170	11	0.636	0.117

TABLE 3.2 – Caractéristiques des éoliennes pour les charges dues au vent

3.6.2 Caractéristiques liées aux vagues et à l'eau

Les caractéristiques sont principalement liées aux calculs des forces dues aux vagues. ρ_{eau} , C_D , C_m et $H_{s,50y}$, la hauteur de vagues significatives de période de retour de 50 ans, influencent tous uniquement ce calcul, là où h_w a une influence globale sur tout le problème, changeant les bras de leviers, la longueur de base nécessaire, etc.

Propriété	Symbole	Valeurs
Masse volumique de l'eau	ρ_{eau}	1025 [kg/m ³]
Coefficient de traînée	C_D	1.2 [-]
Coefficient d'inertie	C_m	2 [-]
Hauteur d'eau	h_w	[10 ; 50] [m]
Hauteur de vague significative	$H_{s,50y}$	[3 ; 20] [m]

TABLE 3.3 – Caractéristiques pour les vagues

3.6.3 Caractéristiques liées au vent

Les caractéristiques du vent ont également une importance capitale. La masse volumique de l'air ρ_{air} a une influence directe sur le calcul de la force sur le rotor, et la variable I_{ref} influence la force du vent dans le cas **E2**. Leurs valeurs sont disponibles dans le tableau 3.4

Les variables K et s sont les paramètres de la distribution de Weibull, qui posent la base pour les calculs de la vitesse du vent. Le paramètre K est le paramètre d'échelle, qui évolue proportionnellement avec la vitesse moyenne du vent sur un site. Le paramètre s est le paramètre de forme qui va représenter la variabilité du vent. Plus s a une valeur faible, plus le vent est variable tandis qu'il sera considéré constant pour de grandes valeurs de s . Les valeurs qui seront considérées dans les calculs sont dans le tableau 3.4.

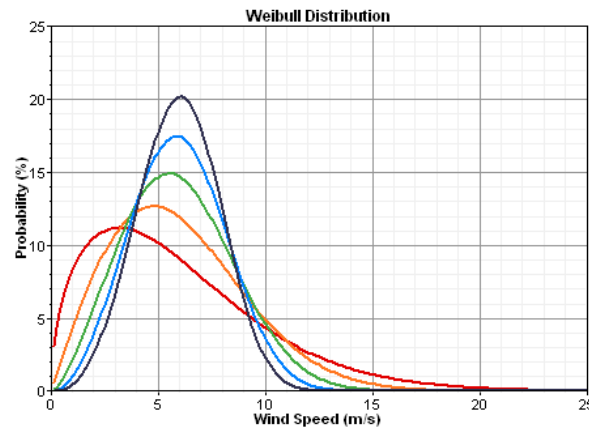


FIGURE 3.7 – Distribution de Weibull selon le paramètre de forme [24]

Propriété	Symbole	Valeurs
Masse volumique de l'air	ρ_{air}	1.225 [kg/m ³]
Intensité de turbulence	I_{ref}	[0.10 ; 0.20] [-]
Intensité de Weibull	K	[5 ; 12] [m/s]
Forme de Weibull	s	[1.5 ; 3] [-]

TABLE 3.4 – Caractéristiques des vents

3.6.4 Caractéristiques liées aux sols

Quatre types de sables différents sont considérés, chacun étant classé selon sa densité relative, qui influence la résistance du sol. Les propriétés suivantes sont nécessaires pour calculer l'interaction sol-pieu dans le cadre des courbes p-y :

Propriété	Symbole	Très lâche	Lâche	Moyen	Dense
Poids vol. sat. [kN/m^3]	γ'	9.5	10	11	11.5
Module réaction [N/m^3]	k	$10 \cdot 10^6$	$15 \cdot 10^6$	$22 \cdot 10^6$	$30 \cdot 10^6$
Angle de friction [$^\circ$]	ϕ'	30	32	35	38
Coeff pression repos [-]	K_0	0.5	0.45	0.4	0.37

TABLE 3.5 – Propriétés du sable selon la densité

La variable var_{sol} a été introduite pour prendre en compte les éventuelles incertitudes et améliorations possibles sur les valeurs finales des courbes p-y. Pour rappel, à titre d'exemple, l'utilisation du vibro-fonçage à la place du battage amènerait à une valeur de 80 % de la valeur de base.

Propriété	Symbole	Valeur
Variable de courbe	var_{sol}	[0.5 ; 1.25]

TABLE 3.6 – Variable sur l'incertitude du sol

3.6.5 Propriétés des matériaux

Le pieu est intégralement constitué d'acier, conformément aux pratiques standards dans l'industrie offshore. Le matériau retenu est un acier **S355**, fréquemment utilisé. À noter, comme mentionné précédemment, que le pieu ne devra jamais atteindre une phase plastique.

Propriété	Symbole	Valeur
Module de Young	E	210 [GPa]
Limite d'élasticité	f_y	355 [MPa]
Masse volumique	ρ_{acier}	7850 [kg/m ³]
Coefficient de poisson	ν	0.3 [-]

TABLE 3.7 – Propriétés de l'acier 355

3.6.6 Paramètres généraux et facteurs de sécurité

Il vient enfin des facteurs plus génériques, comme l'accélération de la gravité ou les facteurs de sécurité, nécessaires à bien encadrer les cas de charges et la résistance réelle de l'acier.

Propriété	Symbole	Valeur
Accélération de la gravité	g	9.81 [m/s ²]
Facteur de sécurité pour l'environnement	λ_{env}	1.35
Facteur de sécurité pour l'acier	λ_{acier}	1.10

TABLE 3.8 – Gravité et facteur de sécurité

3.7 Implémentation python

Le code de dimensionnement démarre en récupérant les données d'entrée, puis il exécute les calculs des charges dues aux vents et exécute une partie des calculs liées aux charges dues aux vagues. Il rentre ensuite dans la boucle d'optimisation *scipy.optimize*, qui va tester de lui-même des triplets (L, D, t) et rendre l'option la plus adaptée.

Dans cette boucle, les charges dues aux vagues sont complètement calculées, ce qui permet de connaître les cas de charges. L'interaction sol/pieu est ensuite calculée en utilisant les courbes p-y. La boucle se termine par une vérification des contraintes. Une valeur très élevée est renvoyée en cas de non-respect de ces contraintes, ou bien retourne la valeur de masse du pieu à la fonction *optimize*, qui va la guider dans ses recherches. Une fois la taille du pieu optimisée connue, la fonction retourne sa valeur et le dimensionnement se termine. Un résumé de toutes ces étapes est visible sur la figure 3.8

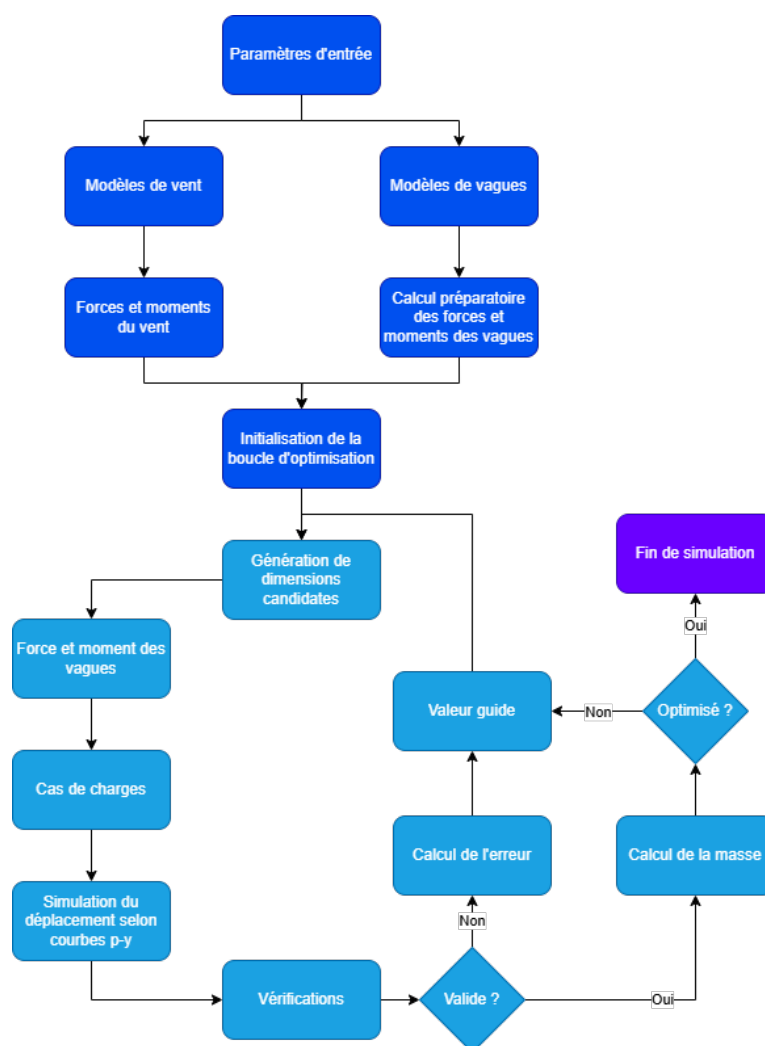


FIGURE 3.8 – Schéma du fonctionnement du code de dimensionnement

Le code de dimensionnement se trouve dans l'annexe A à titre informatif.

3.8 Validité du code de dimensionnement

L'objectif de cette section est de présenter la comparaison des résultats obtenus par le code avec des cas d'études réels, afin de s'assurer de la validité du programme.

Le premier exemple est celui fourni dans l'article de *Arany & al.* [13], avec une éolienne de 4.8 [MW]. Le programme donne une longueur totale de 54.57 [m] pour un diamètre de 5.51 [m], là où l'article donne une longueur totale de 69.16 [m] pour un diamètre de 5.27 [m]. Cette variation est probablement due à la différence de méthode pour modéliser le sol, car l'article utilise la méthode simplifiée, optimisant différemment les dimensions. À noter que dans ce cas, selon la méthode simplifiée décrite dans la section 3.5.4, la fréquence propre est de 0.2625 [Hz], là où la limite de fréquence minimale était de 0.240 [Hz].

Les prochains exemples sont fournis dans l'article de qui présente les résultats du dimensionnement de 12 pieux pour des éoliennes de 15 MW aux États-Unis [25]. Les vitesses de vent, les hauteurs des vagues et les profondeurs d'eaux y sont référencées, ce qui a permis de tester le programme dans un bon nombre de cas différents. Certains résultats sont présentés dans le tableau suivant :

Profondeur	Hauteur vagues	$L_{programme}$	$L_{article}$	$D_{programme}$	$D_{article}$
38.3 m	11.4 m	37.12 m	44.4 m	10.9 m	10.5 m
24.5 m	7.8 m	34.39 m	39.8 m	9.23	9.5 m
41.9 m	7.8 m	37.52	43.9 m	10.03 m	11 m

TABLE 3.9 – Comparaison avec un exemple

On voit donc que les valeurs du programme sont légèrement sous-évaluées par rapport aux cas réels. Cela s'explique probablement par le fait que les effets de la fréquence ne sont pas pris en compte dans le programme et que les variations qui y sont liées ne s'y font pas.

Cependant, le diamètre reste cohérent et la longueur totale du pieu reste relativement proche (20% de variation). De plus, les variations des dimensions réelles selon différentes variables se reflètent également dans les résultats du programme.

3.9 Discussions sur la méthode

Bien que le dimensionnement ait été mené avec le plus de rigueur possible, les valeurs ressortant du programme sont donc généralement légèrement sous-évaluées. Il est donc nécessaire de garder un avis critique sur la méthode et de déterminer si elle est malgré tout suffisante dans le cadre de ce travail.

Ces manquements sont dus à des raisons multiples : certains cas de charges, comme les impacts de glace ou les tremblements de terre, n'ont pas été pris en compte, la fréquence n'a pas pu être intégrée de manière rigoureuse, certains effets cycliques liés aux vagues n'ont pas été pris en compte, et des simulations numériques permettraient d'avoir des résultats beaucoup plus précis pour les interactions entre le sol et le pieu.

Il faut donc se demander s'il est possible et intéressant de pousser au maximum le développement du dimensionnement et de rechercher une précision extrême.

Le problème principal concerne la faisabilité de ce processus : cela amènerait à une énorme complexité, un modèle qui demanderait beaucoup trop de ressources pour fonctionner et une connaissance nécessaire beaucoup plus profonde du sujet, qui ne peut être acquise qu'après de longues années de pratique. L'étude du comportement des monopieux offshore fait encore aujourd'hui l'objet de bon nombre d'études, chacune étudiant les effets d'une seule variable ou d'un seul phénomène en particulier.

C'est dans ce contexte qu'il est bon de se rappeler l'objectif principal de ce mémoire : construire une méthode pour le bilan carbone d'un monopieu d'éolienne offshore et analyser les paramètres qui permettraient de réduire les émissions liées à son utilisation. Pour le dimensionnement, cela veut dire qu'il n'est pas nécessaire d'atteindre une précision absolue, mais plutôt de développer une méthode suffisamment robuste pour donner un ordre de grandeur réaliste pour les dimensions d'un monopieu, même si elles sont un peu sous-évaluées, et surtout de faire ressortir les variables qui ont une incidence importante sur ces dernières.

L'objectif du modèle de dimensionnement développé est donc atteint et aller plus loin n'est pas une nécessité absolue.

Il faut malgré tout retenir que pousser la précision du dimensionnement avec une meilleure connaissance n'est pas inutile, au contraire : cela permettrait d'augmenter également la précision d'un bilan carbone et de connaître encore mieux les effets des leviers physiques sur lesquels il est possible d'influer. Cela met en lumière l'importance de toutes les études en cours et l'intérêt de pousser les modèles le plus loin possible dans leur précision, car dans le milieu de l'industrie, en plus de permettre une réduction des coûts, ils permettent également de lutter contre l'impact carbone des éoliennes.

Chapitre 4

Analyse du dimensionnement du pieu

Il est désormais possible de faire une comparaison entre plusieurs cas théoriques grâce aux variables définies. La comparaison se fera en observant uniquement la masse totale du pieu, qui est la grandeur principale à optimiser. Afin de faire ces comparaisons, un cas de référence est considéré, avec les variables de base suivantes :

Variables	Choix
Modèle de l'éolienne	15 [MW]
Densité sable	Moyenne
Variation de méthode p-y	1 [-]
Profondeur d'eau	25 [m]
Intensité de référence	0.16 [-]
Intensité de Weibull	8 [m/s]
Forme de distribution de Weibull	2 [-]
Hauteur de vague, 50 ans	10 [m]

TABLE 4.1 – Variables pour le cas de référence

Ce qui donne une longueur totale de 58.80 mètres, un diamètre de 8.60 mètres et un volume total de 141.59 mètres cubes, ce qui donne 1111.49 tonnes d'acier. Ce sont des chiffres qui correspondent aux ordres de grandeur génériques pour une profondeur modérée.

Afin de rendre les prochaines comparaisons plus compréhensibles, la grandeur utilisée sera le pourcentage de la masse globale par rapport au cas de référence. Cela permet de rendre l'analyse plus simple, une valeur bien supérieure à 100% signifiant donc une grande augmentation de la masse, et une valeur bien inférieure à 100% signifiant une grande diminution.

4.1 Variation de la puissance de l'éolienne

La puissance de l'éolienne et donc le modèle de cette dernière a un impact très important sur la masse d'acier nécessaire, ce qui peut être constaté sur le graphe 4.1. Cela s'explique par le fait que les charges dues au vent sont fortement impactées par ces modèles, car la surface couverte par les pâles et le bras de levier pour le moment lié au vent sont tous deux modifiés par ce choix.

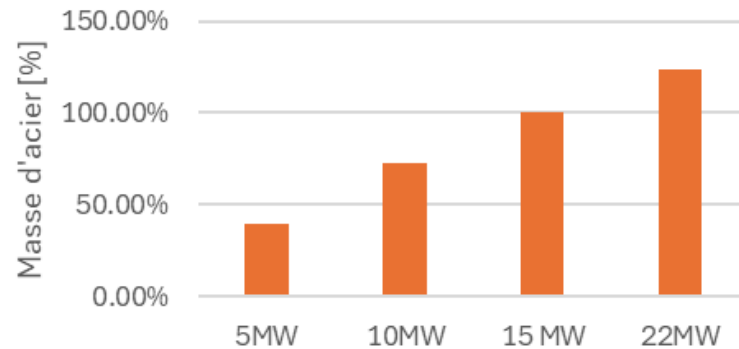


FIGURE 4.1 – Variation de la masse selon le modèle d'éolienne

Mais il ne s'agit là que d'une comparaison sur la masse d'acier qui ne reflète pas l'intérêt d'augmenter la puissance d'une éolienne. Le graphique 4.2 permet de mettre cela en valeur, en comparant plutôt le ratio de masse d'acier par MW pour chaque modèle.

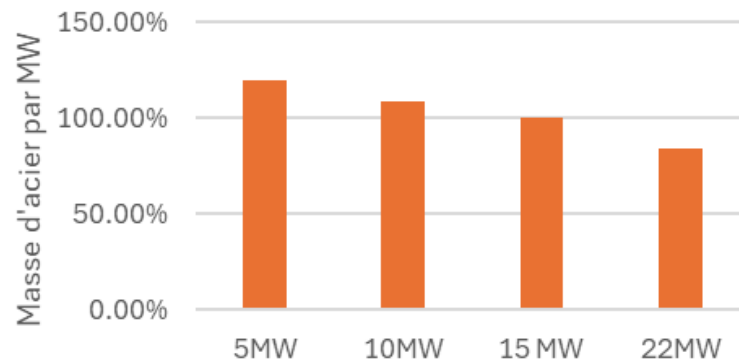


FIGURE 4.2 – Variation de la masse par MW selon le modèle d'éolienne

Là est donc la raison pour laquelle augmenter la puissance des éoliennes est intéressant : pour une production électrique équivalente, une masse moins importante d'acier est nécessaire par MW, ce qui va réduire les coûts et les émissions carbone également. À noter que cette observation ne prend pas encore en compte d'autres effets comme le temps d'implantation total, la réduction de matières pour les autres éléments, qui vont également réduire ces coûts et ces émissions selon la puissance des éoliennes.

4.2 Variations des paramètres liés à l'eau

4.2.1 Variation de la profondeur d'eau

Le graphe 4.3 montre que la profondeur d'eau a également un impact très important sur la masse d'acier nécessaire. Cela s'explique pour trois raisons différentes : la hauteur d'eau augmente les charges appliquées par les vagues, augmente les moments qui ont des bras de levier plus importants et allonge logiquement la longueur du pieu avant même d'atteindre le sol.

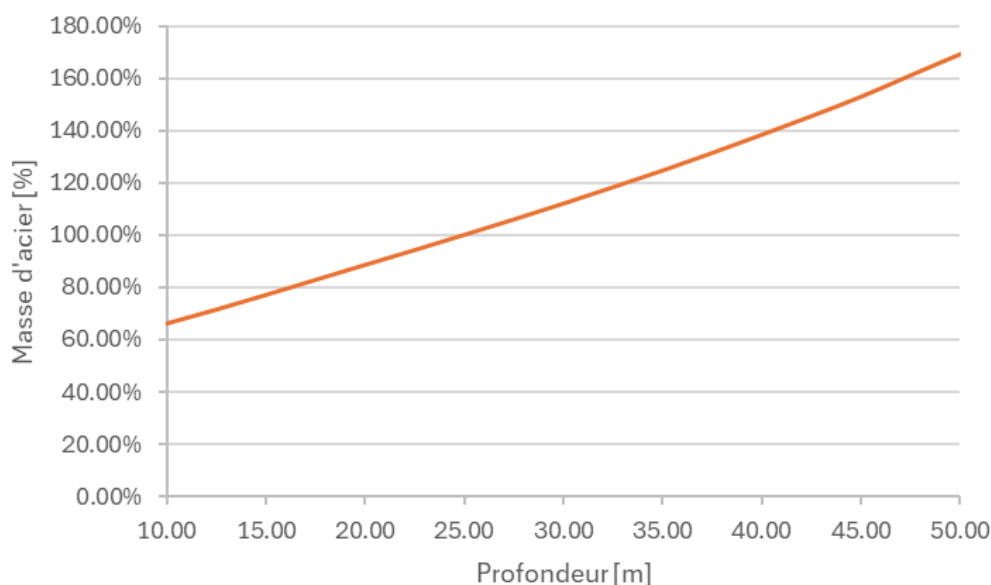


FIGURE 4.3 – Variation de la masse selon la profondeur d'eau

Par rapport aux 25 mètres de référence, la masse est réduite de 34 % pour une profondeur de 10 mètres et est augmentée de 69 % pour une profondeur de 50 mètres. Il s'agit donc d'un facteur important car même une petite réduction de 2 ou 3 mètres peut avoir un impact significatif.

C'est notamment une des raisons pour lesquelles il est fortement déconseillé d'utiliser des pieux comme fondations d'éoliennes offshore quand la profondeur dépasse la quarantaine de mètres, la masse devenant rapidement trop importante.

4.2.2 Variation de la hauteur de vague

Le graphe 4.4 montre l'effet de la hauteur des vagues sur la masse.

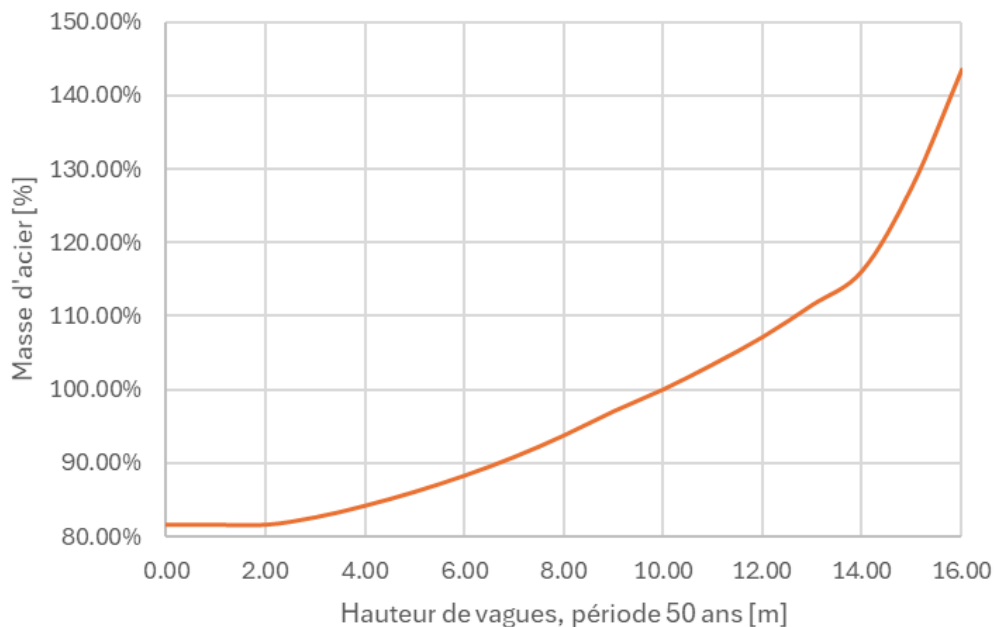


FIGURE 4.4 – Variation de la masse selon la hauteur de vague

Le cas de hauteurs de vagues inférieures à 6 mètres est idéalisé et ne doit pas être pris en compte, les valeurs générales variant plutôt entre 6 (mer calme) et 15 (océan agité) mètres. Le cas de référence supposait un état de mer modéré, et il est intéressant de remarquer que la masse baisse de 12% pour une mer plus calme, mais qu'elle augmente de 27% pour des cas plus extrêmes. Bien que le levier soit moins important que pour la profondeur, il convient d'éviter les mers trop agitées.

En combinant les effets de la profondeur et de cette hauteur de vague, cela signifie qu'une influence intéressante est possible sur la masse de l'acier en choisissant correctement le site, ces 2 variables pouvant énormément changer sur des distances relativement courtes.

4.3 Variation des paramètres liés au vent

4.3.1 Variation de l'intensité de référence

L'intensité de référence a un impact presque nul sur la masse de l'acier. Cela s'explique par le fait que cette variable influence uniquement les cas de charges de mer extrême **E2**. Cependant, c'est surtout le cas de charges **E3** qui est dimensionnant dans la majorité des cas. Il est donc possible de ne pas prendre en compte la variabilité de cette valeur.

4.3.2 Variation du paramètre d'intensité de Weibull

Le paramètre d'intensité de la distribution de Weibull K est proportionnel à la vitesse moyenne sur le site. Le graphique 4.5 montre que, passée une certaine valeur, la croissance de ce paramètre va fortement augmenter la masse d'acier.

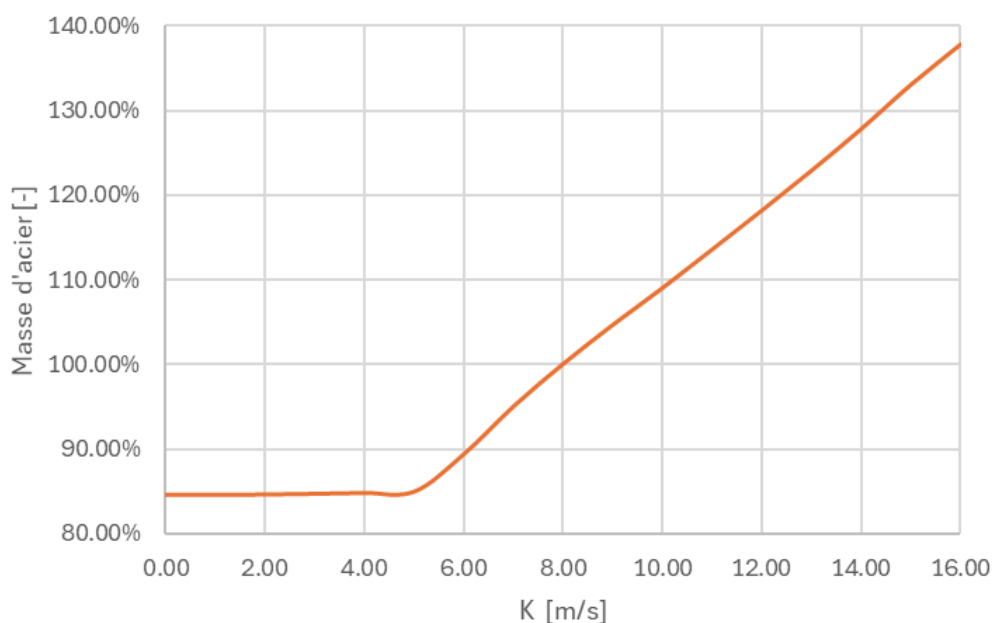


FIGURE 4.5 – Variation de la masse selon l'intensité de Weibull

Ce premier plateau s'explique par le fait que K influence uniquement le modèle de vent **U3**. Quand il est très faible, c'est le cas de charge **E2** qui est le plus important et qui est dimensionnant. C'est uniquement quand K prend une valeur suffisamment importante que le cas **E3** redevient dimensionnant, et la masse finit par en être grandement influencée.

Le paramètre d'intensité vaut 8 dans le cas de référence, on observe qu'en dessous de 5, la masse est diminuée de 15 %, et qu'à 15, cette masse est augmentée de 32 %. À nouveau, l'impact sur la masse est important.

4.3.3 Variation du paramètre de forme de Weibull

Le paramètre de forme de la distribution de Weibull s décrit la variabilité du vent. Une valeur faible représente un vent très variable et une grande valeur représente un vent plus constant. Le graphique 4.6 montre que plus s est petit, plus la masse va augmenter, avant d'atteindre une forme de plateau.

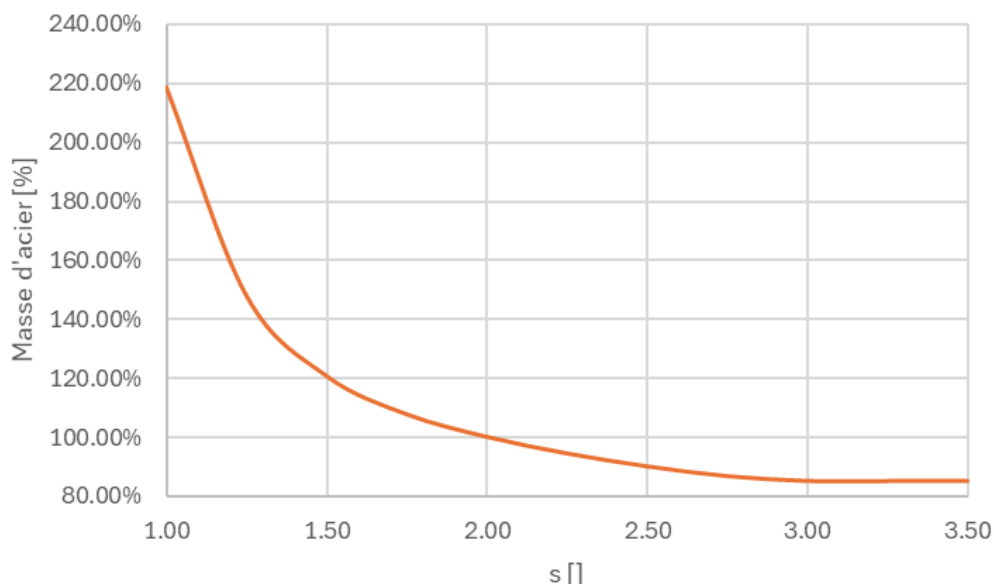


FIGURE 4.6 – Variation de la masse selon la forme de Weibull

Cela s'explique d'une manière inverse au facteur K : un petit s va augmenter les turbulences et le modèle de vent **U3** prend donc une valeur importante. Mais plus s grandit, plus les valeurs de ce modèle et le cas de charges diminuent, jusqu'à atteindre un plateau, où le cas de charge **E2** est plus important.

En résumé, les paramètres déterminants liés au vent sont les paramètres de distribution de Weibull uniquement. Leur connaissance permet d'évaluer le potentiel éolien d'une large zone géographique de manière relativement fiable.

4.4 Variations des paramètres liés aux sols

4.4.1 Variation selon l'incertitude des courbes p-y

Le graphique 4.7 montre que si une incertitude amène à utiliser une courbe p-y amenant à des résistances plus faibles, une augmentation importante de la masse va apparaître. À l'inverse, une courbe p-y amenant à des résistances plus hautes fera apparaître une diminution de la masse nécessaire.

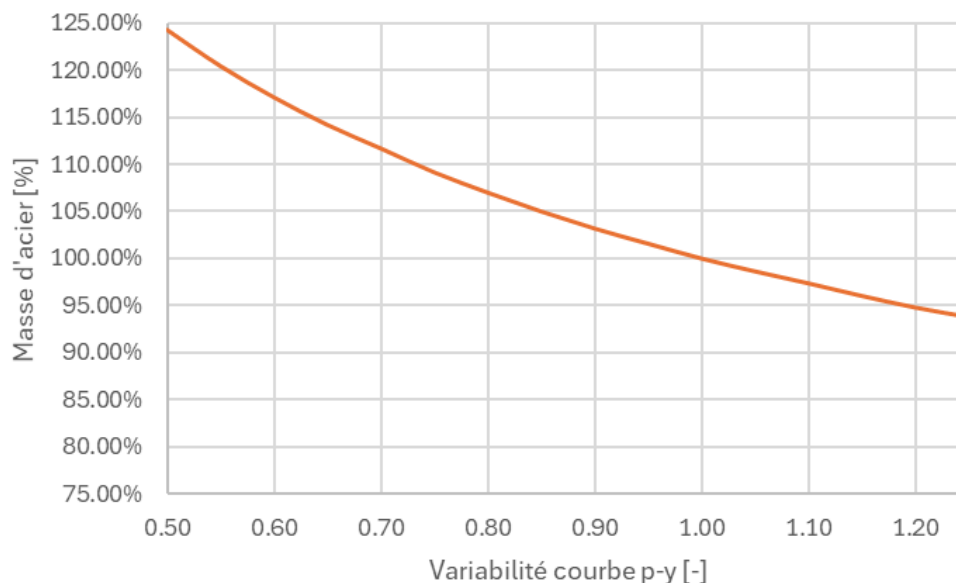


FIGURE 4.7 – Variation de la masse selon l'incertitude sur les courbes p-y

Certaines méthodes p-y donneraient des valeurs 10 % plus importantes pour la résistance des sols, ce qui amène à une réduction de 2.64 % de la masse. À l'inverse, l'utilisation du vibro-fonçage pour l'implantation amènerait à une réduction de 20 % de la résistance, augmentant la masse d'acier de 7 %.

Cela peut sembler être moins capital, mais il faut noter que ces variations de masses ne sont dues qu'à des choix de dimensionnement ou d'implantation, ce qui veut dire que ces variations sont plus facilement influençables.

4.4.2 Variation selon les propriétés du sol

Le graphe 4.8 montre qu'une augmentation de la densité du sable amène à une légère diminution de la masse finale du pieu. Cela s'explique par le fait qu'un sable moins dense possède une résistance latérale ultime plus basse. Le déplacement va donc être plus important pour un même pieu, et il est donc nécessaire d'en augmenter les dimensions afin de limiter ce déplacement.



FIGURE 4.8 – Variation de la masse selon la densité du sol

En résumé, les 2 graphes 4.7 et 4.8 montrent l'importance de bien connaître l'interaction sol-pieu. Une mauvaise connaissance du site ou une mauvaise modélisation de la courbe amènerait à des erreurs de dimensionnement de l'ordre de 20 % au total.

4.5 Conclusions du dimensionnement

Toutes les observations permettent donc de voir que toutes les variables définies ont un impact relativement important sur la masse finale du pieu.

Les variables liées au vent, aux vagues et à la profondeur sont les plus influentes et il est donc important de minimiser leurs impacts pour réduire au maximum la masse.

Cependant, là où il est parfaitement possible de trouver des zones géographiques où la profondeur d'eau et les vagues sont moins importantes, il n'est pas possible d'avoir une influence réelle sur les paramètres du vent, tant ils ne varient pas même sur une zone très large.

Parallèlement à cela, le type de sol et son évaluation gardent une influence plus faible mais non négligeable. Un sol plus résistant permet de réduire relativement efficacement la masse du pieu, là où une moins bonne méthode d'implantation ou une légère sous-évaluation des courbes de résistance réelle augmentent cette dernière. Il convient donc de faire les bons choix à ce niveau.

Dans le cadre plus global de ce mémoire sur le bilan carbone, il faut donc retenir que pour limiter la masse d'un pieu, il est conseillé de chercher des zones géographiques où les sols sont plus performants, où la profondeur d'eau est limitée et où les vagues ne sont pas trop hautes. La manière de mener le dimensionnement est également importante, car une meilleure modélisation et une meilleure connaissance du site permettent de ne pas surdimensionner le pieu inutilement et de s'assurer de sa robustesse dans le temps.

Chapitre 5

Bilan carbone

Maintenant que les variables importantes pour le dimensionnement d'un monopieu sont connues avec un ordre de grandeur relativement précis, il est désormais nécessaire de passer au bilan carbone en lui-même.

Une première approche consiste à attribuer une valeur d'émission liée uniquement au kilogramme d'acier nécessaire à la conception d'un monopieu. Bien que très simpliste, cette approche n'est pas totalement inutile car une part très importante des émissions de carbone est déterminée par ce besoin en masse d'acier, la suite de ce mémoire va par ailleurs le démontrer. Il est donc possible de connaître des pistes efficaces pour la réduction du bilan carbone rien qu'en observant ce qui réduit la masse ou cet unique facteur d'émission.

Cependant, les émissions de carbone liées aux monopieux ne se résument pas qu'à leur unique besoin en matière première. Cette hypothèse beaucoup trop simplificatrice sous-estime le bilan total et empêche de discerner les autres leviers sur lesquels il est possible d'influer pour réduire le bilan. Il va donc falloir dissocier les différentes étapes du cycle de vie d'un pieu.

Cette démarche de découpage et d'analyse s'inscrit dans les référentiels **ISO 14040 : 2006 / ISO 14044 :2006** [8] qui définissent la structure canonique pour toute analyse de cycle de vie : Objectif & champ, inventaire, évaluation d'impact et interprétation.

5.1 Objectifs et champs

Pour le secteur de la construction, un découpage modulaire de A à D a été introduit par la norme européenne **EN15804+A2 :2019** [9]. Elle offre un langage commun à toutes les déclarations environnementales de produits et facilite grandement la comparaison entre projets.

Conformément à cette approche, le monopieau est suivi *from cradle to grave*, du berceau à la tombe. Les définitions des modules sont dans le tableau 5.1.

Module EN15804	Contenu technique pour un monopieau
A1	Extraction ou ré-utilisation des minerais de base
A2	Transport du minerai à l'atelier
A3	Usinage
A4	Transport de l'atelier au site
A5	Installation offshore
B1-B7	Phase d'exploitation
C1	Démantèlement offshore
C2	Transport du site à l'usine de recyclage
C3	Traitement pour recyclage
C4	Décharge
D	Crédit pour substitut de la matière première

TABLE 5.1 – Description modules pour un monopieau

Afin de conserver une bonne lisibilité, et conformément aux usages répandus, les modules sont organisés de la manière suivante :

- A1-A2 : Matières premières
- A3 : Fabrication
- A4-A5 : Transport et installation
- B1-B7 : Phase d'exploitation
- C-D : Démantèlement et crédit de recyclage

Pour chaque module présenté dans le tableau 5.1, il est nécessaire de connaître les facteurs d'émission ainsi que les flux d'activités d'un projet réel, comme la masse d'acier, les heures de navires, la distance de transport, etc. La relation globale est :

$$GWP_{monopieau} = \sum_{j=A}^D \sum_{i=1}^{n_j} (Q_{i,j} \cdot EF_{i,j}) \quad (5.1)$$

Où $Q_{i,j}$ désigne un flux d'activité (tonnes d'acier, t x km, kWh ...) et $EF_{i,j}$ un facteur d'émission correspondant, exprimé en kg de CO_2 -éq. Pour réduire le bilan global, deux stratégies seront donc disponibles : soit réduire le flux entrant, soit réduire le facteur d'émission qui y est lié.

5.2 A1-A2 : Matières premières

Les modules **A1-A2** correspondent à tout ce qui se passe avant que la tôle ne quitte la sidérurgie. Ils prennent en compte l'éventuelle extraction des minerais, la préparation de réducteurs, l'acheminement vers l'usine et la conversion du minerai en acier liquide. Étant la phase qui pèse le plus lourd dans le bilan carbone d'un monopieu, il est essentiel que les facteurs d'émission retenus soient documentés avec précision.

5.2.1 Flux d'activités

Pour les flux Q_{A1-A2} , la donnée majeure à prendre en compte est la masse d'acier M_{acier} nécessaire, qui est directement influencée par le dimensionnement. L'autre flux est la fraction massique moyenne de ferraille f_{scr} qui va être utilisée.

Pour réduire les émissions via les flux, une première option est de réduire la masse globale du pieu en se basant sur les facteurs cités dans le chapitre précédent. Comme précisé, bien qu'il ne soit pas possible d'influencer certains facteurs comme le vent, il faut bien choisir sa méthode d'implantation et utiliser des zones avantageuses, avec des hauteurs d'eau et des sols profitables.

La seconde option est d'augmenter la fraction massique f_{scr} , car, l'étude sur les facteurs d'émission de la section 5.2.2 va le montrer, il est beaucoup plus profitable d'utiliser de l'acier provenant de ferraille plutôt que de nouveau minerai.

5.2.2 Facteurs d'émissions par méthode

Les facteurs d'émissions selon la masse d'acier sont basés sur les chiffres donnés par *Worldsteel Association*, association d'entreprises (dont ArcerlorMittal) qui représente près de 85% de la production d'acier mondial. Un rapport sur les indicateurs de durabilité est produit chaque année et celui de 2024 [26] permet de connaître les facteurs d'émissions durant l'année 2023, qui sont reportés dans le tableau 5.2.

Route de production	Facteur d'émission (2023)
BF-BOF	$2.32 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{acier}$
EAF	$0.7 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{acier}$
DRI-EAF	$1.43 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{acier}$

TABLE 5.2 – Facteurs d'émissions de la production d'acier selon la méthode

La méthode *BF-BOF* (Blast Furnace-Basic Oxygen Furnace), nécessite de faire fondre le minerai de fer avec du charbon en haut-fourneau pour produire de la fonte liquide, riche en carbone. Cette fonte va ensuite passer dans un convertisseur à oxygène, qui va l'affiner avec de l'oxygène pur pour brûler l'excès de carbone et la transformer en acier.

La méthode *EAF* (Electric Arc Furnace), va principalement utiliser de la ferraille recyclée comme matière première. Un arc très puissant va être utilisé pour faire fondre le métal. C'est un procédé beaucoup moins polluant car il va réutiliser des matières usagées au lieu de nécessiter le minage de nouveaux matériaux et, l'arc étant d'origine électrique, il est tout à fait possible d'utiliser de l'énergie verte.

Une méthode *DRI-EAF* (Direct Reduced Iron-Electric Arc Furnace) existe et est également présentée dans le rapport [26]. Elle consiste simplement à combiner les 2 approches précédentes, une réduction du minerai de fer grâce à un gaz, suivie de l'utilisation d'un arc électrique, parfois avec de la ferraille.

Le facteur d'émission global pour l'acier est calculé selon l'équation 5.2, où f_{scr} est la fraction massique de ferraille moyenne mentionnée précédemment. En Europe, la filière classique amène actuellement à une valeur tournant autour de 20%.

$$EF_{A1-A2} = EF_{acier} = (1 - f_{scr}) \cdot EF_{BF-BOF} + f_{scr} \cdot EF_{EAF} \quad (5.2)$$

À ce jour, pour réduire les émissions, une des seules options plausibles est d'utiliser de l'énergie certifiée renouvelable dans la méthode par arc électrique. Cependant, cet effet est difficile à quantifier.

Parallèlement à cela, il faut préciser que le milieu de la sidérurgie est en recherche continue pour réduire son impact. Que ce soit en optimisant les méthodes actuelles, en développant de nouvelles, en augmentant le recyclage, etc. Tous ces efforts vont progressivement réduire les facteurs d'émission liés à la production d'acier, ce qui va directement impacter le bilan carbone des pieux au fur et à mesure des années. Il s'agit là d'une évolution difficilement quantifiable, mais il est important de garder ce phénomène en tête.

5.2.3 Calcul final

Finalement, le calcul des émissions pour les modules **A1-A2** devient :

$$\begin{aligned} GWP_{A1-A2} &= M_{acier} \cdot EF_{acier} \\ &= M_{Acier} \cdot ((1 - f_{scr}) \cdot EF_{BF-BOF} + f_{scr} \cdot EF_{EAF}) \end{aligned} \quad (5.3)$$

5.3 A3 : Fabrication

Le module **A3** correspond aux étapes liées à la fabrication du pieu. Il prend en compte toutes les manipulations nécessaires pour transformer la tôle lourde qui arrive à l'atelier en un pieu, usiné et traité, prêt à être implanté sur le site offshore.

5.3.1 Flux d'activités

Pour les flux Q_{A3} , 2 données sont prises en compte : la masse d'acier nécessaire M_{acier} et la surface du pieu S_{pieu} . La deuxième étant en quelque sorte dépendante de la première, il est estimé qu'optimiser la masse optimise en partie la surface du pieu.

Pour réduire les émissions liées à ce module, il est donc possible de réduire la masse totale du pieu, de la même manière qu'il en a été discuté pour les modules **A1-A2**.

5.3.2 Facteurs d'émissions par opérations

Référencer et générer tous les facteurs d'émission liés à toutes les consommations d'énergie, de consommables et de métaux d'apport peut s'avérer être une tâche épineuse.

Au lieu de tenter cette approche, qui pourrait d'ailleurs amener à des erreurs de jugement sur le module **A3**, il est en réalité plus judicieux de chercher à les regrouper en des facteurs d'émission plus globaux et plus fiables, même s'il devient par conséquent impossible de connaître l'influence précise sur ces facteurs. Cependant, les valeurs finales pour le bilan carbone ne seront ainsi pas erronées.

Usinage

Pour toutes les étapes liées à l'usinage, la *CTICM* fournit une fiche, certifiée et validée par un organisme spécialisé, de déclaration environnementale à propos des tubes en acier comme élément d'ossature [27] dans laquelle un facteur d'émission fiable est donné pour leur fabrication. Ce facteur prend en compte le laminage de la tôle lourde, le roulage cylindrique, les éventuelles chutes, les soudures longitudinales et circumférentielles.

$$EF_{usinage} = 188[kgCO_2e/t_{acier}] \quad (5.4)$$

Comme précisé, la caractéristique globale de ce facteur d'émission fait qu'il est complexe de réellement connaître les émissions pour chaque étape en usine et il est donc impossible de savoir comment réduire ce facteur d'émission. Aucun impact réel ne sera donc pris en compte, bien qu'il soit évident qu'il est possible de le réduire en privilégiant de l'électricité verte, en améliorant certains processus, etc.

Une fois ce pieu brut usiné, il reste encore à y appliquer des protections anti-corrosion, constituées généralement de couches de peinture de protection et d'anodes sacrificielles. Ici, un choix va être nécessaire car l'épaisseur de peinture appliquée va catégoriser la qualité de la surface. Cette catégorie influence ensuite la quantité d'anode nécessaire ainsi que le courant à appliquer durant toute la vie du pieu, car une meilleure protection de base amène à un besoin réduit en anodes.

Anodes sacrificielles

Pour les anodes sacrificielles, la norme **DNV** [28] fournit les calculs, hypothèses et données d'entrée nécessaires pour calculer la masse d'anode requise. Afin de ne pas trop complexifier le calcul, un climat tempéré (pas d'influence réelle possible pour les conditions météorologiques) et des anodes en aluminium (choix le plus commun) seront considérés dans le calcul. Le facteur f_{cm} présent dans la formule 5.5 réduit la masse totale d'anode nécessaire en fonction de la catégorie de protection. Ses valeurs se trouvent dans le tableau 5.3, avec l'épaisseur de protection nécessaire par catégorie.

$$m_{anodes} = \frac{I_{moyen} \cdot t \cdot 8760}{C \cdot u} \cdot f_{cm} = 10.95 \cdot f_{cm} \quad (5.5)$$

Où :

- m_{anodes} : masse surfacique d'anode [kg/m²] ;
- $I_{moyen} = 0.090$: la densité de courant moyenne en eaux tempérées [A/m²] ;
- $t = 25$: le temps d'utilisation total classique [ans] ;
- $C = 2000$: la capacité électrochimique de l'aluminium [Ah/kg] ;
- $u = 0.9$: le facteur d'utilisation de l'anode ;
- f_{cm} : facteur de revêtement moyen.

Finalement, le rapport sur les indicateurs de durabilité de l'aluminium de *European Aluminium* [29] fournit le facteur d'émission pour l'usage d'aluminium en Europe. Cela permet de trouver le facteur d'émission des anodes selon la catégorie de protection, à multiplier par la surface d'acier à protéger :

$$EF_{cat,anode} = m_{cat,anodes} \cdot EF_{aluminium} = 10.5 \cdot 8.6 \cdot f_{cm} = 90.3 \cdot f_{cm} [kgCO_2/m^2] \quad (5.6)$$

CATEGORIES	I - Légère	II - Standard	III - Haute
f_{cm} [-]	1	0.3625	0.170
$e_{peinture}$ [μm]	20	250	350

TABLE 5.3 – Variables liés à la catégorie de revêtement

Peinture

Pour la peinture, les articles de *Jotun* [30] [31] donnent les facteurs d'émission *cradle to gate* et la masse à utiliser pour une épaisseur voulue. Le facteur d'émission pour la totalité de la peinture se calcule selon la formule suivante :

$$\begin{aligned}
EF_{cat,peinture} &= m_{cat,zinc} \cdot EF_{zinc} + m_{cat,epoxy} \cdot EF_{epoxy} \\
&= m_{cat,zinc} \cdot 5.89[kgCO_2/kg] + m_{cat,epoxy} \cdot 4.36[kgCO_2/kg]
\end{aligned} \tag{5.7}$$

GRANDEURS	I - Légère	II - Standard	III - Haute
$e_{cat,epoxy} [\mu m]$	25	150	250
$m_{cat,epoxy} [kg/m^2]$	0.121	0.75	1.25
$e_{cat,zinc} [\mu m]$	0	100	100
$m_{cat,zinc} [kg/m^2]$	0	0.194	0.194

TABLE 5.4 – Facteurs d’émissions de la peinture

En combinant ces valeurs, le tableau 5.4, donnant la masse de peinture nécessaire par unité de surface et le tableau 5.3 avec les calculs 5.7 et 5.6, un facteur d’émission global pour le traitement de la surface est calculé, dont les valeurs sont visibles dans le tableau 5.5.

FACTEURS D’EMISSION	I - Légère	II - Standard	III - Haute
$EF_{cat,anode} [kgCO_2/m^2]$	90.3	32.73	15.35
$EF_{cat,peinture} [kgCO_2/m^2]$	0.53	4.41	6.59
$EF_{cat,surface} [kgCO_2/m^2]$	90.83	37.14	21.94

TABLE 5.5 – Facteurs d’émissions selon la catégorie de surface

À préciser qu’une quatrième catégorie existe mais demande beaucoup de conditions pour être remplie, réduisant encore plus la masse d’anode nécessaire mais demandant une trop grande spécialisation dans la protection par peinture.

Pour diminuer les émissions pour cette partie du module, il est possible d’influencer le facteur d’émissions global de la surface en faisant le bon choix de catégorie. De manière semblable aux modules **A1-A2**, les procédés en eux-mêmes ainsi que les produits vont également voir une évolution dans le temps.

5.3.3 Calcul final

Finalement, le calcul des émissions pour le module **A3** devient :

$$\begin{aligned}
GWP_{A3} &= GWP_{usage} + GWP_{cat,surface} \\
&= M_{acier} \cdot EF_{usage} + S_{pieu} \cdot EF_{cat,surface}
\end{aligned} \tag{5.8}$$

5.4 A4-A5 : Transport et installation

Les modules **A4-A5** correspondent à toute la partie logistique pour le pieu une fois fabriqué. Ils prennent en compte le déplacement nécessaire, allant de l'atelier jusqu'au port, puis du port à la zone offshore, et l'opération d'installation proprement dite, qui se fait soit par battage, soit vibro-fonçage.

5.4.1 Flux d'activités

Q_{A4} : Flux du déplacement

Pour la partie liée au déplacement du pieu, ce sont la masse totale et les déplacements qui sont à prendre en compte. Il est possible d'estimer la masse totale du pieu comme équivalente à la masse d'acier M_{acier} initiale. Pour les déplacements, il faut prendre en compte le déplacement en bateau d_{bateau} , le déplacement en train d_{train} et le déplacement par camions d_{camion} .

Pour réduire les émissions via les flux Q_{A4} , il faut réduire le plus possible la masse d'acier nécessaire de la même manière que dans le module **A1-A2** ou bien essayer de réduire au maximum les déplacements entre l'usine et le site.

Q_{A5} : Flux de l'installation

Pour l'installation, il connaît la masse totale de carburant utilisée par le navire d'implantation, en comptant le temps nécessaire pour venir sur le site et le temps pour implanter chaque pieu. Le but de cette section est donc de déterminer la consommation du navire par jour et le temps nécessaire, pour les 2 tâches, arrivant finalement à une formule semblable à la formule 5.9.

$$Q_{A5} = Q_{carburant} = (t_{transit} \cdot conso_{transit} + t_{implantation} \cdot conso_{implantation}) \quad (5.9)$$

Connaître les consommations et les vitesses des navires est compliqué car, dans la plupart des cas, les informations disponibles sont trop floues. Cependant, celles du navire *blue tern* sont disponibles et fonctionnent dans la majorité des cas. La présentation sommaire de ce navire [32] donne accès à sa vitesse et à ses consommations. Un résumé de toutes ces informations se trouve dans le tableau 5.6.

CARACTERISTIQUES	Valeur
Consommation en transit	$44[t_{fuel}/j]$
Consommation en opération	$14[t_{fuel}/j]$
Vitesse	8 [nœuds]

TABLE 5.6 – Caractéristique du navire d'implantation

La distance à parcourir d_{navire} varie en général entre 30 et 80 km. À noter que le navire fait le déplacement sur le site pour implanter N_{pieux} en même temps, il est donc possible de diviser les émissions liées au déplacement du navire par ce nombre de pieux.

Ensuite, le temps d'installation du pieu dépend de la méthode utilisée. Deux méthodes ont été retenues dans ce mémoire : l'implantation par battage et l'implantation par vibro-fonçage. Dans les 2 cas, un long temps d'installation pour la plateforme est nécessaire, car elle doit se poser sur ses pieds et attendre que le sol en dessous se tasse avant de lancer le reste de la procédure. Cette partie de l'opération garantit la précision.

Pour rappel, le battage utilise un marteau hydraulique de très forte énergie qui vient frapper la tête du pieu, l'onde de choc transmet un effort axial qui brise progressivement la résistance du sol. C'est une méthode qui prend relativement beaucoup de temps et produit énormément de bruit. La seconde utilise un vibro-fonceur qui applique à la tête du pieu une vibration sinusoïdale, cette micro-mobilisation va réduire fortement le frottement sol/acier, ce qui va permettre au poids propre et à l'effort dynamique de faire descendre le pieu progressivement. Elle se caractérise par une durée plus courte et par un bruit moins important.

L'article de *Mark J. Kaiser & Brian Snyder* propose un rapport numérique sur toutes les méthodes d'installation à partir de cas réels, ce qui permet de savoir que le temps d'implantation total (déplacement compris) pour un pieu allant de 1.8 à 7 jours pour les cas les plus extrêmes. Dans ce mémoire, la durée pour l'opération d'implantation en elle-même sera entre 1 et 4 jours. Tout cela amène à une formule plus globale pour le flux Q_{A5}

$$Q_{A5} = \left(\frac{d_{navire}/v_{navire}}{N_{pieux}} \cdot 44 + t_{implantation} \cdot 14 \right) \quad (5.10)$$

Pour réduire les émissions via ce flux, il faut donc réduire la distance parcourue par le navire, faire attention à bien implanter plusieurs pieux en même temps sur le même site et favoriser la méthode de vibro-fonçage, supposée plus rapide.

5.4.2 Facteurs d'émissions

Facteurs d'émission pour le déplacement

Pour les transports, les facteurs d'émissions sont spécifiques au type de véhicule utilisé. La base de données mondiale de *climatiq* [33] fournit beaucoup de facteurs d'émissions existants, dont ceux des différents transports, qui peuvent se calculer selon trois hypothèses, aboutissant à des valeurs différentes.

L'hypothèse *Tank-To-Wheel (TTW)*, du réservoir à la roue, ne prend en compte que les émissions directes du déplacement, pour l'exemple du camion, il s'agit uniquement de celles qui sortent du pot d'échappement. L'hypothèse *Weel-To-Tank (WTT)*, du puits au réservoir, ne prend en compte que la production et le transport du carburant/électricité.

Finalement l'hypothèse *Well-to-Wheel (WTW)*, du puits à la roue, combine les deux précédentes et est donc la version la plus complète et la plus utilisée dans les bilans carbones les plus sérieux, car elle prend en compte l'intégralité des émissions dues aux transports. Ce sont évidemment les facteurs d'émission *WTW* qui ont été choisis dans le cas présent, et leurs valeurs sont résumées dans le tableau 5.7.

Transport	Facteur d'émission <i>WTW</i>
Camion	$0.116 \text{ kgCO}_2\text{e}/t_{\text{acier}} \cdot \text{km}$
Train électrique	$0.015 \text{ kgCO}_2\text{e}/t_{\text{acier}} \cdot \text{km}$
Bateau	$0.026 \text{ kgCO}_2\text{e}/t_{\text{acier}} \cdot \text{km}$

TABLE 5.7 – Facteurs d'émissions selon le transport utilisé

Pour diminuer les émissions, il faut utiliser des versions plus propres de ces transports, avec par exemple des trains utilisant de l'énergie verte, des camions hybrides ou électriques ou des bateaux utilisant d'autres carburants.

Facteurs d'émission du carburant

Bien que le navire utilisé dans ce mémoire fonctionne au MGO, il peut être intéressant de développer les facteurs d'émission pour tous les carburants communs. Le rapport d'*International council on clean transportation* [34] fournit les facteurs d'émissions pour 4 carburants différents, listés dans le tableau 5.8.

Type de carburant	Facteur d'émission <i>WTW</i>
HFO	$3.915 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{\text{fuel}}$
VLSFO	$4.124 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{\text{fuel}}$
MGO	$4.043 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{\text{fuel}}$
LNG	$5.259 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{\text{fuel}}$

TABLE 5.8 – Facteurs d'émissions selon le carburant

Pour réduire les émissions, il faut donc choisir le carburant le moins polluant possible. À noter que de nouveaux bateaux utilisant des carburants plus propres sont en cours de développement.

5.4.3 Calcul final

Finalement, le calcul des émissions pour les modules **A4-A5** devient :

$$GWP_{A4-A5} = GWP_{\text{transport}} + GWP_{\text{navire}} \quad (5.11)$$

$$GWP_{\text{transport}} = M_{\text{acier}}(d_{\text{camion}} \cdot EF_{\text{camion}} + d_{\text{train}} \cdot EF_{\text{train}} + d_{\text{bateau}} \cdot EF_{\text{bateau}}) \quad (5.12)$$

$$GWP_{\text{navire}} = \left(\frac{d_{\text{navire}}/v_{\text{navire}}}{N_{\text{pieux}}} \cdot 44 + t_{\text{implantation}} \cdot 14 \right) \cdot EF_{\text{fuel}} \quad (5.13)$$

5.5 B1-B7 : Phase d'exploitation

Les modules **B1-B7** correspondent à toutes les émissions liées à la phase d'exploitation du pieu. Cela correspond à tous les déplacements de navires sur le site pour vérifier l'intégrité du pieu, ainsi que le courant moyen nécessaire pour faire fonctionner les anodes. À noter qu'aucune intervention n'est nécessaire durant l'exploitation, le pieu étant construit dans ce but. Il ne s'agit donc pas réellement de maintenances mais plutôt de vérifications courantes.

5.5.1 Flux d'activités

Flux d'activités des contrôles

Pour les flux dus aux contrôles, il est nécessaire de connaître la masse totale de carburant utilisée. Il faut connaître le temps de vie du pieu, la récurrence nécessaire et à nouveau les temps de transit et de contrôle par pieu pour le navire.

Pour la récurrence, l'article de *K. Vàsquez* [35] recommande une inspection visuelle de surface et une vérification annuelle du fonctionnement des anodes, ainsi qu'une vérification supplémentaire sous l'eau tous les 5 ans. Les informations de bateaux utilisables sont données dans l'article [36] et résumées dans le tableau 5.9.

CARACTERISTIQUES	CTV (visuel)	SOV (sous-marine)
Consommation de transit	$0.32[t_{fuel}/h]$	$1[t_{fuel}/h]$
Consommation d'opération	$0.13[t_{fuel}/h]$	$0.12[t_{fuel}/h]$
Vitesse	23 [nœuds]	12 [nœuds]

TABLE 5.9 – Caractéristique des navires de vérifications

La distance à parcourir par les bateaux de vérification $d_{contrôles}$ est semblable à la distance à parcourir par le bateau d'implantation d_{navire} dans le sens où elle n'est pas dépendante de la distance parcourue par le pieu et il est également possible de partager les émissions par le nombre de pieux présents sur le site $N_{pieux,site}$.

Les temps de vérification par pieu sont estimés à 3 heures par les points visuels, et 6 heures pour les opérations sous-marines. Et les opérations se répètent durant les 25 ans de l'éolienne.

$$Q_{A5} = \left(\frac{d_{contrôle}/v_{bateau}}{N_{pieux,site}} \cdot conso_{transit} + t_{contrôle} \cdot cons_{opération} \right) \cdot f_{contrôle} \cdot 25 \quad (5.14)$$

Pour réduire les émissions, il faut trouver des bateaux utilisant moins de carburant, ou implanter un nombre suffisant de pieux au même endroit.

5.5.2 Facteurs d'émissions

Facteurs d'émissions des contrôles

Les facteurs d'émissions pour les contrôles dépendent du type de carburant utilisé, mentionné dans le tableau 5.8.

5.5.3 Calcul final

Finalement, le calcul des émissions pour les modules **B1-B7** devient :

$$GWP_{B1-B7} = GWP_{verif,1an} + GWP_{verif,5ans} \quad (5.15)$$

$$GWP_{verif,1an} = \left(\frac{d_{CTV}/v_{CTV}}{N_{pieux,site}} \cdot 0.32 + t_{verif,1an} \cdot 0.13 \right) \cdot 25 \cdot EF_{fuel} \quad (5.16)$$

$$GWP_{verif,5ans} = \left(\frac{d_{SOV}/v_{SOV}}{N_{pieux,site}} \cdot 1 + t_{verif,5ans} \cdot 0.12 \right) \cdot 5 \cdot EF_{fuel} \quad (5.17)$$

$$(5.18)$$

5.6 C-D : Démantèlement et crédit de recyclage

Les modules **C** vont prendre en compte toutes les émissions qui vont être émises durant la fin de vie. Le module **D**, un peu spécifique, représente une réduction amenée au bilan carbone grâce au recyclage, récompensant la création de ferraille utilisable pour d'autres projets. À quelques détails près, il faut donc inverser l'ordre de toutes les étapes des modules **A**, beaucoup de facteurs et théories sont donc similaires.

Plusieurs stratégies de recyclage sont possibles pour les monopieux, elles sont développées dans le rapport *Belgium Offshore Wind Farms Decommissioning Costs Project* du *FPS Economy* [37], leurs descriptions se trouvent sur la figure 5.1. Cependant, seules les 3 dernières options sont réalistes et seront étudiées :

- Couper le pieu 3 mètres au dessus du sol et laisser le reste
- Couper le pieu 2 mètres en dessous du niveau du sol et laisser le reste
- Tout récupérer

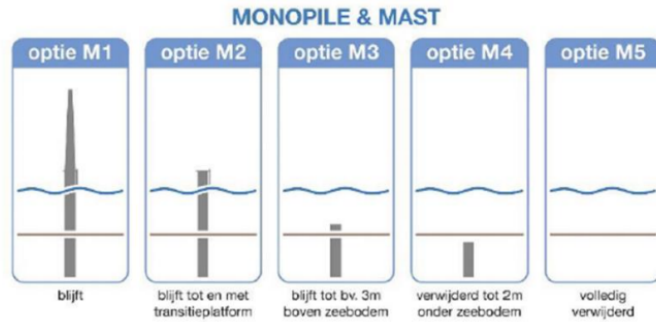


FIGURE 5.1 – Stratégies de recyclages

5.6.1 Flux d'activités

Le flux principal pour Q_{C-D} est la masse d'acier récupérée $M_{recycle}$, qui est le facteur important. La quantité recyclée dépendra de la stratégie de recyclage choisie qui dépend de l'intérêt d'augmenter la réduction liée au module **D**.

Parallèlement à cela, certains flux sont semblables à la phase de production et de mise en œuvre et ne nécessitent pas plus d'explications, comme le navire, les distances à parcourir par le pieu et la fraction massique f_{scr} qui va définir à quel point le recyclage est intéressant. Le temps de démantèlement sur site peut se déduire à partir des chiffres de [37], donnant une durée variant entre 40 et 50 heures.

Pour réduire les émissions, il faudra chercher à augmenter la quantité d'acier récupérée, et diminuer les distances à parcourir.

5.6.2 Facteurs d'émissions du démantèlement

Les facteurs d'émissions dus à la consommation de carburant du navire se trouvent dans le tableau 5.8 et ceux liés aux déplacements dans le tableau 5.7.

Pour les facteurs de traitement pour recyclage et de décharge, les facteurs du *CTICM* [27] seront à nouveau utilisés.

Etape	Facteur d'émission (2023)
Traitement	$0.017 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{\text{acier}}$
Décharge	$0.0004 \text{ tCO}_2\text{e}/t_{\text{acier}}$

TABLE 5.10 – Facteurs d'émissions de le recyclage d'acier

5.6.3 Crédit de recyclage

Le crédit de recyclage fonctionne comme un facteur d'émission négatif. Il valorise les bénéfices au-delà des frontières du système, en calculant la quantité destinée à la réutilisation en y soustrayant la quantité de ferraille de base. Malheureusement, une perte d'environ 10% est toujours existante (couche de peinture, érosion, etc), ce crédit se calcule selon la formule 5.19.

$$EF_D = \eta_{rec} \cdot \left(EF_{EAF} - EF_{BF-BOF} \right) \cdot (1 - f_{scr}) = -1.62 \cdot \eta_{rec} \cdot (1 - f_{scr}) \quad (5.19)$$

5.6.4 Calcul final

$$GWP_{C-D} = \sum_{j=C1}^{C4} GWP_C + GWP_D \quad (5.20)$$

Avec :

$$GWP_{C1} = \left(\frac{d_{navire}/v_{navire}}{N_{pieux}} \cdot 44 + t_{retrait} \cdot 14 \right) \cdot EF_{fuel} \quad (5.21)$$

$$GWP_{C2} = M_{ferraille} (d_{camion} \cdot EF_{camion} + d_{train} \cdot EF_{train} + d_{bateau} \cdot EF_{bateau}) \quad (5.22)$$

$$GWP_{C3} = M_{ferraille} \cdot EF_{traitement} \quad (5.23)$$

$$GWP_{C4} = M_{ferraille} \cdot EF_{dechets} \quad (5.24)$$

$$GWP_D = M_{ferraille} \cdot \eta_{rec} \cdot (1 - f_{scr}) \cdot EF_{valorisation} \quad (5.25)$$

Chapitre 6

Analyse et optimisations

6.1 Bilan carbone pour un cas de référence

Il est désormais temps de calculer ce bilan pour un monopieu selon un cas de référence. Une valeur arrondie a été considérée pour la masse pour simplifier les calculs. Un résumé de toutes les valeurs et hypothèses prises est développé dans le tableau 6.1.

Flux d'activités	Valeur
M_{acier}	1000 [t]
S_{pieu}	1500 [m^2]
f_{scr}	0.2 [-]
d_{camion}	200 [km]
d_{train}	500 [km]
d_{bateau}	500 [km]
d_{navire}	100 [km]
$t_{implantaion} = t_{demantelement}$	2 [jours]
N_{pieux}	4
$N_{pieux,site}$	40
Catégorie de surface	II
Carburant	MGO
Stratégie de recyclage	Hors-sol (50%)

TABLE 6.1 – Données pour le cas de référence

Ce qui donne les calculs suivants :

$$GWP_{A1-A2} = 1000 \cdot (0.8 \cdot 2.32 + 0.2 \cdot 0.7) = 1000 \cdot 1.996$$

$$GWP_{A3} = 1000 \cdot 0.188 + 1500 \cdot 0.03714$$

$$GWP_{A4} = 1000 \cdot (200 \cdot 0.116 + 500 \cdot 0.015 + 500 \cdot 0.026)/1000$$

$$GWP_{A5} = (3.084 + 28) \cdot 4.043$$

$$GWP_{B1-B7} = ((0.0188 + 0.39) \cdot 25 + (0.112 + 0.72) \cdot 5) \cdot 4.043$$

$$GWP_{C1-C4} = GWP_{A5} + GWP_{A4}/2 + 500 \cdot (0.017 + 0.0004)$$

$$GWP_D = 500 \cdot 0.9 \cdot 0.8 \cdot (-1.62)$$

Modules	Émissions	Pourcentage
A1-A2	1996.0[tCO ₂ e]	77.77 %
A3	243.71[tCO ₂ e]	9.29 %
A4-A5	169.37[tCO ₂ e]	6.46 %
B1-B7	58.15[tCO ₂ e]	2.22 %
C1-C4	156.22[tCO ₂ e]	5.95 %
D	-583.2[tCO ₂ e]	-22.23 %
Total vie	2623.5[tCO ₂ e]	100 %
Total réel	2040.3[tCO ₂ e]	77.8 %

TABLE 6.2 – Résultats du bilan carbone de référence

Le monopieu étudié arrive à un bilan carbone total de 2623.5[tCO₂e]. Le crédit de recyclage **D** neutralise presque un quart des émissions en amont pour une stratégie qui n'est pas optimale (la moitié du pieu est encore dans le sol), là où l'approvisionnement **A1-A2** représente près de 80 % des émissions positives dans le bilan. Bien que les autres modules aient un impact non négligeable (entre 2 et 10 %), ils restent mineurs, ce qui est encore plus mis en valeur sur le graphe 6.1.

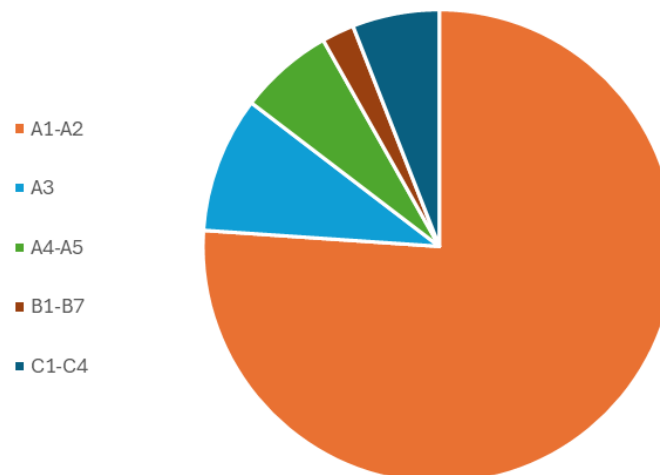


FIGURE 6.1 – Proportions du bilan carbone

La priorité pour réduire le bilan carbone est donc d'optimiser les modules **A1-A2** et **D**, même si cela doit se faire au dépend d'autres modules. La section 6.4 calcule l'influence de certains leviers majeurs définis.

6.2 Validation du bilan carbone avec la littérature

Avant de valider la méthode, il convient de souligner que les possibilités de comparaisons directes entre le bilan carbone réalisé dans le cadre de ce travail et les données disponibles dans la littérature sont limitées.

En effet, les ressources disponibles sont peu nombreuses, manquent de détails quant à leur développement, s'appuient sur des hypothèses différentes ou bien intègrent des composants secondaires.

Par conséquent, toute tentative de confrontation souffre d'une incertitude dans les comparaisons. À noter que, comme le poids du pieu de référence a été estimé à 1000 tonnes, la transition selon l'unité fonctionnelle (1 tonne ou 1 kg d'acier) n'en est que plus simple, les tableaux suivants parleront donc de $kgCO_2e$ par kg_{acier} .

6.2.1 Comparaison avec un élément d'ossature

La **CTICM** fournit une fiche de déclaration environnementale pour des tubes circulaires en acier utilisés comme élément d'ossature sans revêtement anti-corrosion. Bien que les monopieux de ce travail soient sensiblement plus grands, il peut être intéressant de faire la comparaison car la plupart des modules y sont développés [27].

Module	$GW P_{cticm}$	$GW P_{ref}$
A1-A2	1.82 $kgCO_2e$	1.96 $kgCO_2e$
A3	0.188 $kgCO_2e$	0.243 $kgCO_2e$
A4-A5	0.093 $kgCO_2e$	0.169 $kgCO_2e$
B1-B7	/ $kgCO_2e$	0.058 $kgCO_2e$
C1-C4	0.066 $kgCO_2e$	0.156 $kgCO_2e$
D	-0.832 $kgCO_2e$	-0.583 $kgCO_2e$

TABLE 6.3 – Comparaison entre la référence et un élément d'ossature

Le bilan carbone du monopieu de référence et le bilan carbone de ces éléments d'ossature donnent donc des résultats relativement semblables. Pour les modules **A1-A2**, une part de ferraille plus importante a dû être considérée et le module **A3** ne prend pas en compte le travail de surface.

Pour les modules allant de **A4** à **C4**, la différence s'explique simplement par les utilisations : un pieu doit être amené et implanté sur un site offshore, là où ces éléments d'ossature suivent un chemin plus simple. Finalement, une perte se fait au niveau du module **D** car une part moins importante d'acier est récupérée pour la référence.

Les légères différences sont donc explicables logiquement, venant de considérations et d'utilisations différentes.

6.2.2 Comparaison avec un monopieu EEW

L'EEW SPC propose également une fiche de déclaration environnementale pour un monopieu non surfacé. La comparaison est désormais plus directe mais malheureusement moins de modules sont développés [11].

Module	$GW P_{pieu,EEW}$	$GW P_{ref}$
A1-A2	2.83 $kgCO_2e$	1.96 $kgCO_2e$
A3	0.168 $kgCO_2e$	0.243 $kgCO_2e$
D	-1.47 $kgCO_2e$	-0.583 $kgCO_2e$

TABLE 6.4 – Comparaison entre la référence et le pieu EEW

Les émissions pour matière première **A1-A2** sont plus importantes pour l'EEW, cela vient de la fraction de ferraille qui a été estimée comme nulle [11], approchant donc le facteur d'émission à une valeur de 2.70, ce qui est attendu pour cette époque. Une légère différence existe également pour l'usinage, qui est due à la différence de traitement de surface. La grosse différence du module **D** provient du fait que le pieu EEW est considéré comme intégralement recyclé, contrairement au cas de référence.

6.2.3 Comparaison avec un monopieu complexe EEW

L'EEW SPC propose une seconde fiche de déclaration environnementale, cette fois-ci pour des monopieux complexes, comprenant des éléments structuraux supplémentaires pour se passer des pièces de transition. En théorie, il n'est donc pas possible de comparer le bilan de ce travail et ce type d'éolienne : les matériaux, les procédés et les principes étant trop différents. Cependant, on peut supposer que les étapes d'implantation et de démantèlement seront semblables, ce qui permettrait de valider au moins l'ordre de grandeur du module **A4-A5** [12].

Module	$GW P_{complexe,EEW}$	$GW P_{ref}$
A1-A2	4.369 $kgCO_2e$	1.96 $kgCO_2e$
A3	0.288 $kgCO_2e$	0.243 $kgCO_2e$
A4-A5	0.087 $kgCO_2e$	0.169 $kgCO_2e$
B1-B7	/ $kgCO_2e$	0.058 $kgCO_2e$
C1-C4	0.094 $kgCO_2e$	0.156 $kgCO_2e$
D	-0.793 $kgCO_2e$	-0.583 $kgCO_2e$

TABLE 6.5 – Comparaison entre la méthode et le monopieu complexe par kilo d'acier

Comme attendu, la plupart des facteurs d'émissions sont différents. Cependant, on peut observer que les modules **A4-A5** prennent un ordre de grandeur semblable dans les 2 cas. Bien qu'il ne soit pas possible de confirmer l'exactitude du résultat pour le bilan de référence, il est cependant possible de s'assurer qu'il n'est pas totalement inexact.

6.3 Discussion sur la méthode du bilan carbone

La méthode de calcul du bilan carbone développée repose sur un ensemble de choix méthodologiques et d'hypothèses simplificatrices, obligatoires face à la complexité du système et à la limite des données disponibles. Il convient donc à nouveau de garder un œil critique.

La comparaison avec la littérature a dû être menée malgré beaucoup de différences sur les méthodologies, sur les périmètres d'analyse, etc. Comme mentionné, ces écarts rendent toute confrontation directe difficile.

Cependant, il est important de souligner que les résultats obtenus restent très cohérents avec ceux de cette littérature. Les principales différences observées ayant pu être expliquées de manière logique. Cette convergence relative permet de valider la robustesse de la méthode, au minimum dans l'ordre de grandeur.

Finalement, même s'il n'est pas possible de garantir l'absolue précision des résultats, la méthode fournit des estimations claires et cohérentes. Elle constitue ainsi un outil pertinent pour identifier les principaux postes d'émissions dans une logique de réduction de l'empreinte carbone.

6.4 Optimisations majeures

Maintenant que les ordres de grandeur de la méthode ont été validés, il est désormais possible de développer les pistes pour réduire le bilan carbone global, en commençant premièrement par optimiser les modules majeurs : **A1-A2** et **D**

6.4.1 Facteur majeur : Origine de l'acier

Le premier facteur étudié est la fraction massique f_{scr} . Elle diminue énormément le facteur d'émission EF_{A1-A2} , le faisant passer de 2.32 à 0.7 tCO_2e/t_{acier} .

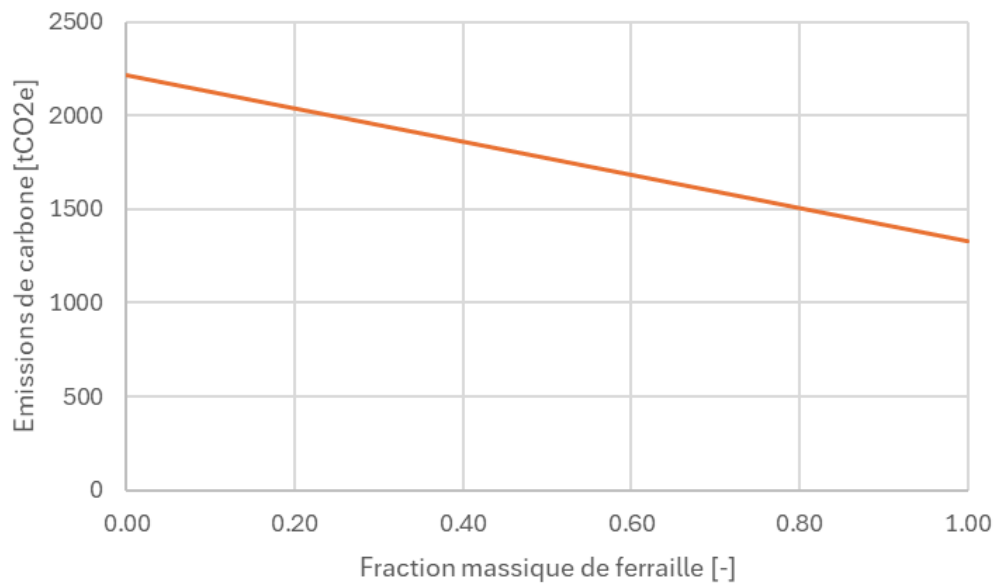


FIGURE 6.2 – Sensibilité du bilan carbone à la fraction massique de ferraille

Le graphe 6.2 prouve que cette fraction massique a une importance capitale sur le bilan carbone, car une réduction de 40% est possible entre la configuration sans ferraille et la configuration la plus propre. Cela s'explique par une énorme diminution pour le GWP_{A1-A2} , qui passe d'une valeur de 2320[tCO₂e] à 700[tCO₂e].

À noter que le crédit de recyclage se retrouve quant à lui de plus en plus réduit, jusqu'à atteindre une valeur nulle pour $f_{scr} = 1$. Il s'agit là d'une "faille" dans cette méthode pour le module D du bilan, car elle ne reflète pas l'intérêt du recyclage pour des fractions massiques de ferraille importantes.

Pour les projets réalistes, il n'est pas possible d'atteindre une fraction massique aussi haute, mais il conviendra de porter une attention particulière à ce facteur, tant il est déterminant dans le bilan global.

6.4.2 Facteur majeur : Masse d'acier

Le second facteur étudié est la masse d'acier du pieu, importante pour une grande partie des modules.

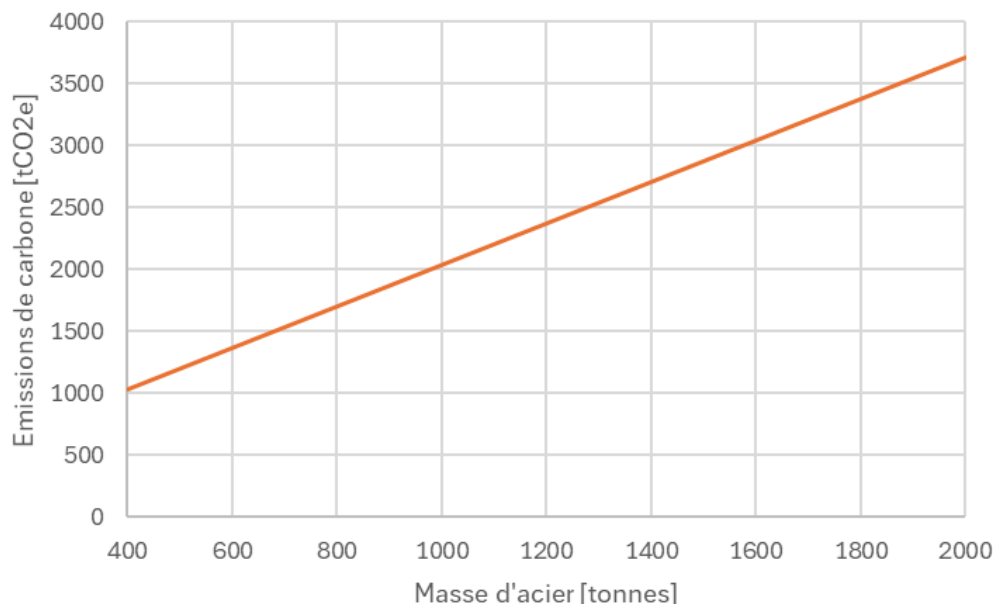


FIGURE 6.3 – Sensibilité du bilan carbone à la masse d'acier

Le graphe 6.3 montre que la masse d'acier a un impact quasi proportionnel sur le bilan carbone. Par exemple, multiplier la masse par 2 augmente le bilan carbone de 82% et la diviser par 2 le réduit de 41%. Cela s'explique par le fait que la masse a une influence sur les modules **A1-A2**, **A3**, **A4**, **C** et **D**, soit la quasi-totalité des modules.

Cette observation est importante car cela veut dire que les facteurs environnementaux vont également avoir un impact presque proportionnel sur le bilan, et donc que les conclusions sur la variation de la masse faites lors du dimensionnement sont totalement applicables au bilan carbone.

Cela met en valeur l'importance de mener correctement le dimensionnement, de ne pas surestimer certains facteurs, de connaître parfaitement les conditions du site, car l'inverse amènerait à une augmentation de la masse et donc obligatoirement à une augmentation du bilan carbone. Il est également important de choisir les bonnes conditions pour implanter les éoliennes qui, pour rappel, sont un sol performant, des vagues faibles et une mer peu profonde.

6.4.3 Facteur majeur : Stratégie de recyclage

Le prochain facteur étudié est la stratégie de recyclage utilisée. Pour rappel, 3 options étaient possibles : soit couper le pieu au-dessus du sol (environ 50% de masse récupérée), soit creuser légèrement le sol et couper le pieu un peu en dessous du niveau du sol (environ 65%), soit le faire vibrer ou le tirer pour le récupérer en intégralité (100%).

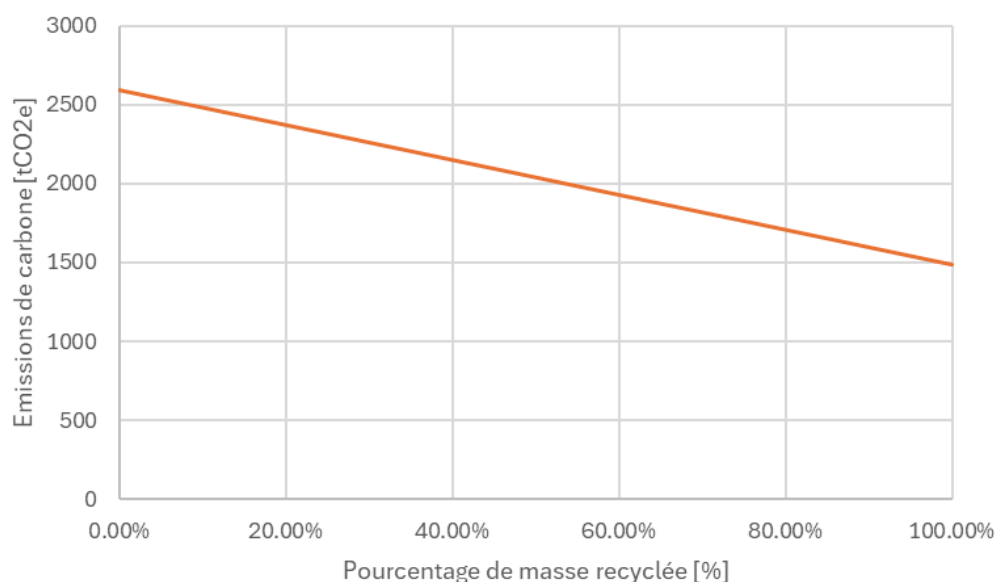


FIGURE 6.4 – Sensibilité du bilan carbone à la stratégie de recyclage

Le graphe 6.4 montre l'impact de la stratégie de recyclage sur le bilan carbone en fonction du pourcentage de la masse recyclée. Ce facteur, comme attendu, est également très important car même si la valeur du module **C** s'en retrouve très légèrement modifiée, la réduction apportée par le module **D** est très impactante. Là où le recyclage hors-sol ne permet qu'une réduction de 22.2% et où le recyclage intermédiaire ne donne qu'une réduction de 31%, le recyclage complet amène une réduction allant jusqu'à 44%.

À préciser que les hypothèses prises ici supposaient que le temps de démantèlement sur site est constant selon les méthodes utilisées, ce qui n'est en réalité pas le cas. La méthode hors-sol est beaucoup plus simple et rapide à mettre en place (pour des pieux aussi imposants), là où l'extraction complète du pieu peut s'avérer beaucoup plus compliquée, voire même impossible dans certains cas.

Cependant, les émissions dues à l'extraction restent minimales, et le potentiel derrière le recyclage est beaucoup trop important pour être ignoré. Quel que soit le projet, il sera donc toujours important de récupérer le maximum d'acier possible.

6.5 Amélioration selon les facteurs majeurs

Maintenant que les principaux leviers de réduction du bilan carbone sont identifiés, il est possible de faire une première optimisation, qui va permettre de connaître la différence qui peut se faire rien qu'en optimisant ces facteurs. Les conditions sont quasiment identiques au cas 6.1 à l'exception des grandeurs du tableau 6.6, qui découlent de conditions idéalisées.

Flux d'activités	Valeur
M_{acier}	750 [t]
S_{pieu}	1000 [m^2]
f_{scr}	0.4
Stratégie de recyclage	Totale (100%)

TABLE 6.6 – Données pour le cas optimisé

Ces nouvelles conditions donnent le bilan carbone suivant :

Modules	Émissions	Pourcentage
A1-A2	1254[tCO ₂ e]	68.93 %
A3	178.14[tCO ₂ e]	9.79 %
A4-A5	158.449[tCO ₂ e]	8.71 %
B1-B7	58.164[tCO ₂ e]	3.20 %
C1-C4	170.63[tCO ₂ e]	9.38 %
D	-612.36[tCO ₂ e]	-36.06 %
Total vie	1819.36[tCO ₂ e]	100%
Total réel	1163.26[tCO ₂ e]	63.94%

TABLE 6.7 – Résultat du bilan carbone optimisé

La valeur du bilan carbone de vie s'en retrouve diminuée de 30.65% et celle du bilan carbone total est diminuée de 42.98%. Il s'agit là d'un changement très important prouvant l'importance de d'abord optimiser la masse d'acier, l'origine de l'acier et son recyclage avant de penser aux autres facteurs. À noter que les choix liés au recyclage et à l'origine de l'acier relèvent plus de choix de conception et de méthodologie, là où la masse d'acier relève des conditions du site et est donc plus difficilement influençable.

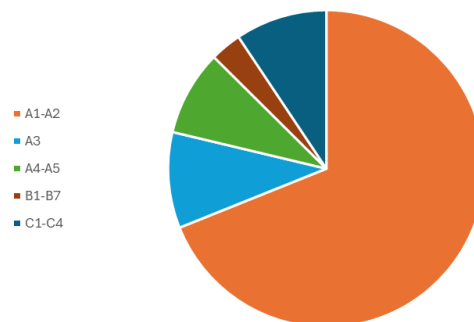


FIGURE 6.5 – Proportions pour le cas optimisé

6.6 Optimisations mineures

Maintenant que le bilan carbone a été optimisé au niveau des facteurs les plus importants, il est possible d'analyser l'influence plus légère des autres.

6.6.1 Distances

Le pieu suit de nombreux déplacements avant son implantation et après son extraction. Le navire d'implantation et les bateaux de contrôle ont également une distance à parcourir entre le port et le site offshore. Le graphe 6.6 montre ce qu'il se passe lorsque chacune de ces distances est nullifiée et lorsque le site offshore se trouve à seulement 30 km.

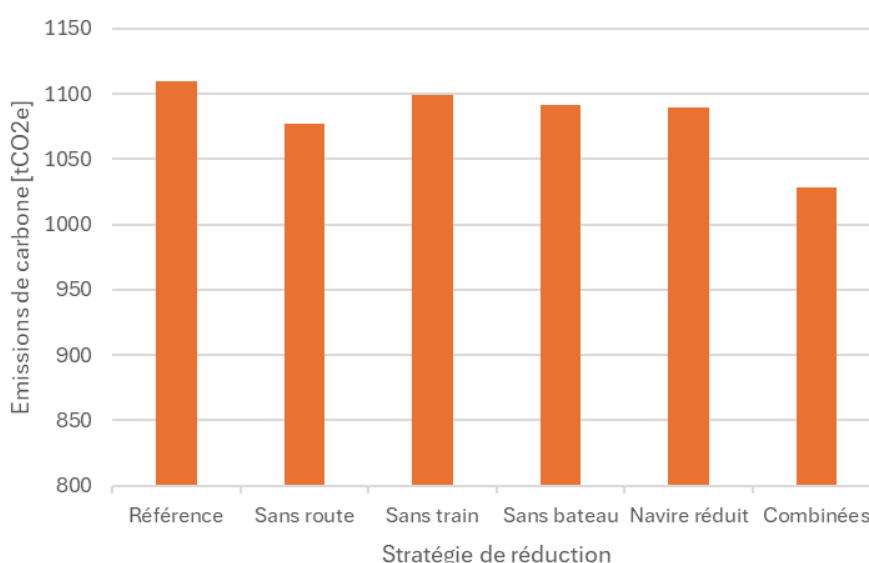


FIGURE 6.6 – Sensibilité au stratégies de déplacements

Toutes ces modifications ont un impact intéressant, surtout la distance faite sur route ou la distance du site. Une réduction non négligeable de 7.35% se fait lorsque tous les leviers sont combinés. Cependant, en pratique, là où il est effectivement recommandé d'éviter les camions, il est inutile de chercher à limiter la distance jusqu'au site, surtout si une zone plus lointaine permettrait de réduire la masse.

6.6.2 Type de carburant

Les carburants utilisés influent sur les modules **A5** et **B**. Le graphe 6.7 montre cependant qu'avec des facteurs d'émissions très proches, leur impact n'est pas très grand, sauf pour le LNG, qui amène une augmentation de 8.5%. Pour véritablement réduire via un changement de carburant, il faut donc attendre que des navires capables d'utiliser des carburants plus propres soient sur le marché.

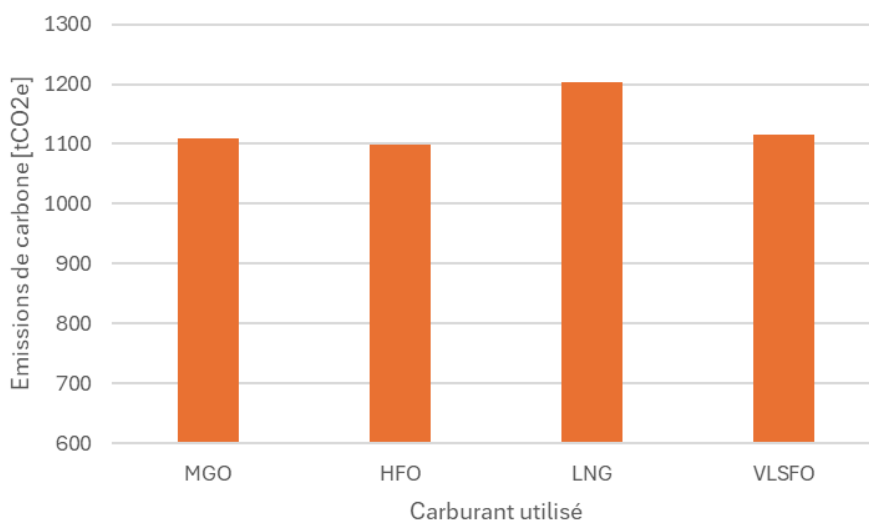


FIGURE 6.7 – Sensibilité aux carburants

6.6.3 Temps d'installation et de démantèlement

Les temps d'installation ou de démantèlement prennent également de l'importance, influent respectivement sur les modules **A5** et **C**. Le graphe 6.8 montre l'influence de cette durée dans le cas de l'implantation, les effets sur le démantèlement étant identiques. Bien qu'il s'agisse de cas idéalisés (le temps d'implantation dépend en réalité de la taille du pieu, du type de sol, des machines présentes et de la méthode utilisée), on aperçoit que ces temps ont une forte influence sur le bilan carbone. Une différence de 13 % se fait entre un cas où l'implantation dure 4 jours et un autre où elle dure 1 seul jour.

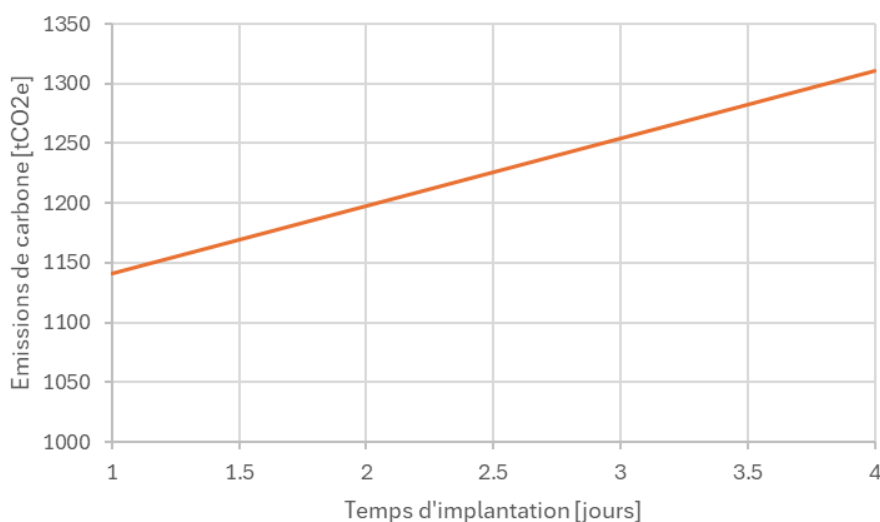


FIGURE 6.8 – Sensibilité au temps d'installation

6.7 Potentiel écologique théorique du vibro-fonçage

Le cas optimisé 6.6 considère une implantation par battage et il peut être intéressant d'estimer les effets du vibro-fonçage. Malheureusement, comme mentionné dans le dimensionnement et dans l'explication des temps d'implantation, les effets précis de cette méthode sont encore méconnus, surtout au niveau de son influence sur la courbe du sol.

Cependant, il est possible de supposer que la méthode va amener une variation de la résistance du sol allant de 70 à 90 %. En se basant sur les résultats de l'étude de la variance du sol 4.4.1, il est possible d'estimer la masse du pieu selon cette diminution.

Parallèlement à ça, le temps de base considéré dans le cas optimisé est de 2 jours, mais il est également estimé que la méthode de vibro-fonçage pourrait réduire cette durée. Il pourrait donc être intéressant de savoir quelle est la réduction de temps nécessaire pour que le bilan carbone s'équilibre malgré cette augmentation de masse. Les résultats de cette réflexion sont présentés dans le tableau 6.8.

Variation théorique	Masse du pieu	Temps d'implantation
70 %	837.98 tonnes	0.3 jours
75 %	818.85 tonnes	0.7 jours
80 %	802.65 tonnes	1 jour
85 %	787.58 tonnes	1.2 jours
90 %	773.93 tonnes	1.5 jours

TABLE 6.8 – Estimation de la réduction de temps nécessaire par variation de résistance

Bien que les durées de 0.3 et 0.7 jours soient inatteignables, supposer une durée d'implantation de 1 jour est de l'ordre du possible. Et il est donc possible d'équilibrer, voire même de diminuer le bilan carbone en utilisant le vibro-fonçage si la diminution de résistance du sol est limitée à 20%.

Cette réflexion se base sur beaucoup d'incertitudes : la variation réelle et le gain de temps par vibro-fonçage sont encore méconnus et le code de dimensionnement ayant servi à recalculer les masses n'est pas d'une précision exacte.

Le but est donc surtout de démontrer qu'un potentiel existe derrière le vibro-fonçage : même si une légère augmentation de la masse existe, elle pourrait être compensée par la réduction des émissions lors de l'implantation. Il est donc capital de développer les connaissances à ce sujet pour définir la véracité de cette affirmation. À noter que cette méthode pose également d'autres avantages, comme la réduction importante du bruit causé, capitale pour le confort de la vie marine.

Chapitre 7

Conclusion

Pour conclure ce travail, il est essentiel de revenir sur les résultats obtenus et d'en tirer les enseignements clés à partir d'une vue plus globale. L'objectif principal de ce mémoire était de mieux comprendre le bilan carbone des monopieux offshore, afin de pouvoir identifier les facteurs clés et réduire l'impact de ces pieux.

Le mémoire s'est structuré autour d'un double cadre analytique. Un dimensionnement avancé sur la méthode p-y, suffisamment précis pour capter l'interaction sol-pieu tout en restant compatible avec des études paramétriques étendues. Ce choix a montré qu'il n'était pas nécessaire de recourir d'emblée à des modèles lourds. Ensuite, une analyse de cycle de vie a été faite, découpant l'empreinte carbone en différents modules. Cette séparation a permis d'isoler les postes réellement structurants et d'identifier les leviers d'optimisation prioritaires.

Le dimensionnement et les variations paramétriques ont mis en évidence trois familles de facteurs qui gouvernent la masse finale du pieu. L'environnement marin, avec la hauteur de vagues et la profondeur d'eau, reste le plus déterminant, pouvant faire varier la masse de base jusqu'à 70% de sa valeur pour des cas extrêmes. Le régime du vent, avec les paramètres de Weibull, a un impact similaire sur la masse mais il a la particularité de ne pas être très influençable. Et finalement, les caractéristiques du sol, avec une sous-estimation de la résistance latérale ou une densité du sable, font varier la masse du pieu jusqu'à 15% de sa valeur initiale, ce qui confirme l'intérêt de reconnaissances géotechniques poussées.

L'analyse du cycle de vie d'un cas de référence, avec un monopieu de 1000 tonnes d'acier, 20 % de ferraille et une stratégie de recyclage hors sol, affiche un bilan carbone de 2 623 tonnes de CO_2e , dont 78 % imputables au module **A1-A2**. Le crédit de recyclage **D** amène l'empreinte réelle à 2 040 tonnes de CO_2e , compensant près d'un quart des émissions en amont. Ces 2 modules sont donc les plus déterminants.

L'optimisation des trois leviers majeurs identifiés : la masse d'acier, la teneur en ferraille et le recyclage total, permet de réduire l'empreinte de 43 %. Cette baisse spectaculaire confirme qu'il était nécessaire de connaître les facteurs qui influencent la masse de l'acier, de promouvoir le recyclage et que le choix de l'origine de l'acier est clé : substituer un procédé EAF à forte teneur en ferraille ou sécuriser les filières "low-carbon steel" pèse plus qu'un changement de carburant maritime ou la réduction de quelques centaines de kilomètres de transport.

Les leviers secondaires sont nombreux : ajustements logistiques, énergétiques, diminution du temps d'installation, ainsi que toutes les micro-optimisations de procédés de fabrication. Leurs effets cumulés restent pertinents une fois la masse, la métallurgie et le recyclage optimisés.

Concernant le vibro-fonçage, le mémoire ouvre une piste prometteuse : dans l'hypothèse où le vibro-fonçage accroîtrait la masse de 3 à 9 %, une réduction du temps d'installation pourrait permettre de rétablir l'équilibre carbone, et pourrait même devenir favorable tout en réduisant le bruit marin. Cette méthode mérite donc un suivi expérimental pour lever les incertitudes mécaniques et confirmer les bénéfices environnementaux qu'elle pourrait apporter.

Des bonnes pratiques sont alors de mise pour la conception de monopieux : intégrer la réflexion sur le carbone dès la phase de conception du pieu, privilégier les aciers à forte teneur en ferraille, penser au recyclage en fin de vie et maintenir une approche systémique.

Pour les recherches futures, il serait pertinent d'améliorer la méthode de dimensionnement afin d'avoir une analyse plus fine de ses effets sur le bilan carbone. De plus, une amélioration de certains facteurs d'émission, une meilleure connaissance des procédés de fabrication et la participation d'une entreprise spécialisée permettraient d'améliorer la précision de l'analyse de cycle de vie, mettant alors en lumière encore plus de pistes de réduction du bilan carbone.

Pour conclure, ce mémoire démontre que la performance carbone n'est pas figée, elle est avant tout une variable de conception. En mobilisant un dimensionnement rigoureux, des choix intelligents de matériaux et une stratégie de fin de vie circulaire, il est déjà possible de réduire grandement l'empreinte. Au-delà des chiffres, la démarche proposée constitue un cadre reproductible et améliorable pour d'autres typologies de fondation, voire pour d'autres secteurs du génie civil.

Le défi qui s'ouvre aux générations d'ingénieurs est donc clair : faire du carbone une contrainte de conception au même titre que la résistance ou la fatigue.

Bibliographie

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate change 2023 : Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change,” 2023.
- [2] Ministère de la Transition écologique, “Publication du 6e rapport de synthèse du giec,” 2023. Consulté le 28 mai 2025.
- [3] S. Bhattacharya, *Design of Foundations for Offshore Wind Turbines*. Chichester, UK : Wiley, 2019.
- [4] C. G. S. H. Díaz, “Review of the current status, technology and future trends of offshore wind farms,” *Ocean Engineering*, 2020.
- [5] Comité Français de Mécanique des Sols et de Géotechnique, “Recommandations pour la conception et le dimensionnement des fondations d’éoliennes offshore,” Rapport technique Version 2.0, Comité Français de Mécanique des Sols (CFMS), France, 2019.
- [6] American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design*. Washington, D.C. : API Publishing Services, 21st ed., 1993. API RP 2A-WSD.
- [7] L. Simonin, H. Rattez, B. Herman, W. Ovalle-Villamil, T. Quinten, M. Cabrera, T. Wehbe, O. Orakci, G. Anoyatis, and S. Francois, “Investigation of vibro-driven monopiles in a geo-centrifuge,” in *Proceedings of the 5th European Conference on Physical Modelling in Geotechnics (ECPMG 2024)*, (Delft, The Netherlands), ISSMGE, 2024. 2–4 October 2024.
- [8] “Environmental management — life cycle assessment — principles and framework,” 2006. Incorporating Corrigendum No. 1.
- [9] “Sustainability of construction works — environmental product declarations — core rules for the product category of construction products,” 2019.
- [10] Hout Info Bois, “Les performances du bois : Acv et epd,” 2025. Consulté le 1er juin 2025.
- [11] EEW Special Pipe Construction GmbH, “Environmental product declaration : Monopiles.” https://eew-group.com/fileadmin/user_upload/EPD_EEW_SPC_Monopile_2022.pdf, Aug. 2022. Déclaration environnementale de produit conforme à ISO 14025 et EN 15804+A2. Numéro d’enregistrement : EPD-EEW-236-EN. Publiée par Kiwa-Ecobility Experts.
- [12] EEW Special Pipe Constructions GmbH, “Environmental product declaration : Monopiles.” https://eew-group.com/fileadmin/user_upload/EPD_EEW_

- SPC_Monopile_2024.pdf, June 2024. Déclaration environnementale de produit conforme à ISO 14025 et EN 15804+A2. Numéro d'enregistrement : EPD-Kiwa-EE-000407-EN. Publiée par Kiwa-Ecobility Experts.
- [13] L. Arany, S. Bhattacharya, J. Macdonald, and S. J. Hogan, "Design of monopiles for offshore wind turbines in 10 steps," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 92, pp. 126–152, 2017.
 - [14] "Wind turbines – part 1 : Design requirements," Aug. 2005. IEC 61400-1 :2005(E).
 - [15] H. Rattez, "Lgciv2071 – geotechnics : Soil-structure interaction for piles," 2024. Cours de géotechnique, présenté le 5 novembre 2024.
 - [16] Innovative Geotechnics, "P-y curves for laterally loaded piles," 2025.
 - [17] Innovative Geotechnics, "Api p-y curve models for laterally loaded piles," 2023.
 - [18] Rocscience Inc., "Api method for sand – rspile documentation." <https://www.rocscience.com/help/rspile/documentation/soil-properties/lateral-analysis/api-method-for-sand>. Consulté le 27 mai 2025.
 - [19] H. G. Poulos and E. H. Davis, *Pile Foundation Analysis and Design*. New York : Rainbow-Bridge Book Co., 1980.
 - [20] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, and G. Scott, "Definition of a 5-mw reference wind turbine for offshore system development," Tech. Rep. NREL/TP-500-38060, National Renewable Energy Laboratory, 2009.
 - [21] P. Bortolotti, J. Jonkman, and et al., "Iea wind task 37 on systems engineering in wind energy – wp2.1 reference wind turbines," Tech. Rep. NREL/TP-5000-73492, National Renewable Energy Laboratory, 2019.
 - [22] E. Gaertner, J. Rinker, and et al., "Definition of the iea 15-megawatt offshore reference wind turbine," Tech. Rep. NREL/TP-5000-75698, National Renewable Energy Laboratory, 2020.
 - [23] I. W. T. 37, "Definition of the iea 22-megawatt offshore reference wind turbine," tech. rep., IEA Wind Technology Collaboration Programme, 2024.
 - [24] HOMER Energy, "Weibull distribution – homer pro documentation." https://homerenergy.com/products/pro/docs/3.15/weibull_distribution.html. Consulté le 28 mai 2025.
 - [25] S. M. Mroczek, S. R. Arwade, M. Davis, S. Hallowell, A. Myers, R. D. Riyanto, and W. Pang, "Reference monopile designs for us east coast sites supporting the iea 15 mw reference turbine using a novel conceptual design methodology," *Ocean Engineering*.
 - [26] World Steel Association, "Sustainability indicators 2024 report : Sustainability performance of the steel industry 2003–2023." <https://worldsteel.org>, November 2024. Accessed May 2025.
 - [27] Centre Technique Industriel de la Construction Métallique (CTICM), "Fiche de déclaration environnementale et sanitaire (fdes) — tube carré, rectangulaire ou circulaire en acier utilisé comme élément d'ossature." <https://www.inies.fr>, October 2022. Numéro d'enregistrement INIES : 20220830688-FC, version 1.2, valide jusqu'en octobre 2027.

- [28] DNV, “Dnv-rp-b401 :2021 – cathodic protection design,” Recommended Practice DNV-RP-B401, Det Norske Veritas (DNV), 2021. Edition May 2021, Consulté le 15 mai 2025.
- [29] European Aluminium, “Environmental profile report 2018 : Executive summary.” <https://www.european-aluminium.eu>, February 2018. Life-cycle inventory data for aluminium production and transformation processes in Europe. Consulté le 15 mai 2025.
- [30] J. A/S, “Environmental product declaration : Barrier 90.” <https://www.epd-norge.no/epdsearch>, 2020. EPD Norway, Declaration number : NEPD-2573-1299-EN. Valid from 27.11.2020 to 27.11.2025. Based on EN 15804+A1 and ISO 14025. Consulté le 16 mai 2025.
- [31] J. A/S, “Environmental product declaration : Jotamastic smart pack hb.” <https://www.epd-norge.no/epdsearch>, 2023. EPD Norway, Declaration number : NEPD-5123-4456-EN. Valid from 11.10.2023 to 11.10.2028. Based on EN 15804+A2 and ISO 14025. Consulté le 16 mai 2025.
- [32] Fred. Olsen Windcarrier, “Jack-up installation vessel blue tern – specifications.” <https://www.windcarrier.com>, 2020. Brochure technique, consultée le 16 mai 2025. Fiche descriptive du navire Blue Tern (ex. Bold Tern), livré en 2012 par Keppel Fels Singapore.
- [33] Climatiq, “Transport emission factors.” <https://www.climatiq.io/data/sector/transport>, 2025. Consulté en mai 2025.
- [34] B. Comer and L. Osipova, “Accounting for well-to-wake carbon dioxide equivalent emissions in maritime transportation climate policies,” tech. rep., International Council on Clean Transportation (ICCT), March 2021. ICCT Briefing Paper, Consulté le 16 mai 2025.
- [35] K. Vázquez, R. R. Rodríguez, and M. D. Esteban, “Proposal for a programme of periodic inspections for preventive maintenance of offshore monopiles,” *Ocean Engineering*, vol. 277, p. 114262, 2023. Available online 30 March 2023.
- [36] A. Gray, “Setting a benchmark for decarbonising o&m vessels of offshore wind farms.” <https://ore.catapult.org.uk/analysisinsight/setting-benchmark-decarbonising-om-vessels-offshore-wind-farms/>, February 2021. Presented as part of the PERISCOPE project, Consulté le 16 mai 2025.
- [37] Mott MacDonald, “Belgium offshore wind farms decommissioning costs project,” tech. rep., Belgian Federal Public Service for Health, Food Chain Safety and Environment, 2021. Final Report, Reference : 100100337 — A — 03. Consulté le 28 mai 2025.

Table des figures

1.1	Synthèse du GIEC par <i>ecologie.gouv.fr</i> [2]	1
2.1	Type de fondations selon les profondeurs [3]	3
2.2	Etapes du cycle de vie pour un monopieu [10]	8
3.1	Vue schématique d'une éolienne offshore et ses charges [3]	13
3.2	Charges appliquées à l'éolienne et au pieu	15
3.3	Vue schématique de la méthode des courbes p-y [15]	23
3.4	Forme de la courbe p-y pour le sable [18]	25
3.5	Coefficients C1, C2 et C3 pour le sable [6]	26
3.6	Représentation de la rigidité de l'éolienne vie des ressorts [13]	29
3.7	Distribution de Weibull selon le paramètre de forme [24]	32
3.8	Schéma du fonctionnement du code de dimensionnement	34
4.1	Variation de la masse selon le modèle d'éolienne	38
4.2	Variation de la masse par MW selon le modèle d'éolienne	38
4.3	Variation de la masse selon la profondeur d'eau	39
4.4	Variation de la masse selon la hauteur de vague	40
4.5	Variation de la masse selon l'intensité de Weibull	41
4.6	Variation de la masse selon la forme de Weibull	42
4.7	Variation de la masse selon l'incertitude sur les courbes p-y	43
4.8	Variation de la masse selon la densité du sol	44
5.1	Stratégies de recyclages	58
6.1	Proportions du bilan carbone	61
6.2	Sensibilité du bilan carbone à la fraction massique de ferraille	65
6.3	Sensibilité du bilan carbone à la masse d'acier	66
6.4	Sensibilité du bilan carbone à la stratégie de recyclage	67
6.5	Proportions pour le cas optimisé	68
6.6	Sensibilité au stratégies de déplacements	69
6.7	Sensibilité aux carburants	70
6.8	Sensibilité au temps d'installation	70

Liste des tableaux

2.1	Avantages et inconvénients de la méthode simplifiée	6
2.2	Avantages et inconvénients de la méthode courbe p-y	6
2.3	Avantages et inconvénients de la méthode par EF	7
3.1	Cas de charges représentatifs [13]	16
3.2	Caractéristiques des éoliennes pour les charges dues au vent	31
3.3	Caractéristiques pour les vagues	31
3.4	Caractéristiques des vents	32
3.5	Propriétés du sable selon la densité	33
3.6	Variable sur l'incertitude du sol	33
3.7	Propriétés de l'acier 355	33
3.8	Gravité et facteur de sécurité	33
3.9	Comparaison avec un exemple	35
4.1	Variables pour le cas de référence	37
5.1	Description modules pour un monopieu	47
5.2	Facteurs d'émissions de la production d'acier selon la méthode	48
5.3	Variables liés à la catégorie de revêtement	51
5.4	Facteurs d'émissions de la peinture	52
5.5	Facteurs d'émissions selon la catégorie de surface	52
5.6	Caractéristique du navire d'implantation	53
5.7	Facteurs d'émissions selon le transport utilisé	55
5.8	Facteurs d'émissions selon le carburant	55
5.9	Caractéristique des navires de vérifications	56
5.10	Facteurs d'émissions de le recyclage d'acier	59
6.1	Données pour le cas de référence	60
6.2	Résultats du bilan carbone de référence	61
6.3	Comparaison entre la référence et un élément d'ossature	62
6.4	Comparaison entre la référence et le pieu EEW	63
6.5	Comparaison entre la méthode et le monopieu complexe par kilo d'acier	63
6.6	Données pour le cas optimisé	68
6.7	Résultat du bilan carbone optimisé	68
6.8	Estimation de la réduction de temps nécessaire par variation de résistance	71

Annexe A

Code de dimensionnement

```
import numpy as np
import scipy
from scipy.optimize import fsolve
from scipy.special import gamma
from scipy.sparse import lil_matrix, csr_matrix
from scipy.sparse.linalg import spsolve

"""
-----
-----  DONNEES VARIABLES  -----
-----
"""

# Modèles d'éolienne
EOLIENNES = {
    "TEST": {
        "P" : 4.8, # MW
        "D_rotor" : 120.0, # m
        "R_rotor" : 60.0, # m
        "h_moyeu" : 87.0, # m
        "U_rated" : 12, # m/s
        "f_1P,max" : 0.2167, # Hz
        "m_ANC" : 243_000, # kg
        "m_tour" : 250_000, # kg
        "L_T" : 68.0, # m
        "D_t" : 3, # m
        "D_b" : 5, # m
        "C_T" : 0.5833, # [-]
    },
    "5MW": {
        "P" : 5, # MW
        "D_rotor" : 126.0, # m
        "R_rotor" : 63.0, # m
        "h_moyeu" : 90.0, # m
        "U_rated" : 11.4, # m/s
        "f_1P,max" : 0.2017, # Hz
    }
}
```

```

        "m_anc"      : 350_000,      # kg
        "m_tour"     : 347_500,      # kg
        "C_T"        : 0.614,        # [-]
    },
    "10MW": {
        "P"          : 10,            # MW
        "D_rotor"     : 198.0,        # m
        "R_rotor"     : 99.0,         # m
        "h_moyeu"     : 119.0,        # m
        "U Rated"     : 11,           # m/s
        "f_1P,max"    : 0.1467,       # Hz
        "m_anc"       : 720_800,      # kg
        "m_tour"      : 628_400,      # kg
        "C_T"         : 0.636,        # [-]
    },
    "15MW": {
        "P"          : 15,            # MW
        "D_rotor"     : 240.0,        # m
        "R_rotor"     : 120.0,        # m
        "h_moyeu"     : 150.0,        # m
        "U Rated"     : 10.59,        # m/s
        "f_1P,max"    : 0.126,        # Hz
        "m_anc"       : 1_017_000,    # kg
        "m_tour"      : 860_000,      # kg
        "C_T"         : 0.661,        # [-]
    },
    "22MW": {
        "P"          : 22,            # MW
        "D_rotor"     : 284.0,        # m
        "R_rotor"     : 142.0,        # m
        "h_moyeu"     : 170.0,        # m
        "U Rated"     : 11,           # m/s
        "f_1P,max"    : 0.1177,       # Hz
        "m_anc"       : 941_200,      # kg
        "m_tour"      : 1_574_000,    # kg
        "C_T"         : 0.636,        # [-]
    },
}

```

Modèles de sol

```

SOLS = {
    "TRES LACHE": {
        "k_soil"      : 10e6,        # N/m³
        "gamma_prime" : 9.5e3,       # N/m³
        "phi_prime_deg" : 30,        # deg
        "K_0"         : 0.5,         # [-]
        "A"           : 100,
    },
    "LACHE": {

```

```

        "k_soil"      : 15e6,  #  $N/m^3$ 
        "gamma_prime" : 10e3,  #  $N/m^3$ 
        "phi_prime_deg" : 32,   #  $deg$ 
        "K_0"         : 0.45,  #  $[-]$ 
        "A"           : 300,
    },
    "MOYEN": {
        "k_soil"      : 22e6,  #  $N/m^3$ 
        "gamma_prime" : 11e3,  #  $N/m^3$ 
        "phi_prime_deg" : 35,   #  $deg$ 
        "K_0"         : 0.4,   #  $[-]$ 
        "A"           : 600,
    },
    "DENSE": {
        "k_soil"      : 30e6,  #  $N/m^3$ 
        "gamma_prime" : 11.5e3, #  $N/m^3$ 
        "phi_prime_deg" : 38,   #  $deg$ 
        "K_0"         : 0.37,  #  $[-]$ 
        "A"           : 1000,
    },
}

#Variabilité sur la résistance du sol
var_sol_all = np.array([0.5, 0.55, 0.6, 0.65, 0.7, 0.75, 0.8, 0.85,
                        0.9, 0.95, 1.0, 1.05, 1.1, 1.15, 1.20, 1.25])

# Hauteurs d'eau
h_w_all = np.array([10, 12.5, 15, 17.5, 20, 22.5, 25, 27.5, 30,
                    32.5, 35, 37.5, 40, 42.5, 45, 47.5, 50]) # m

#Intensité de turbulence
I_ref_all = np.array([0.12, 0.14, 0.16, 0.18]) #  $[-]$ 

#Vitesse moyenne sur site
K_all = np.array([1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
                  12, 13, 14, 15, 16]) #  $m/s$ 

#Forme de distribution de weibull
s_all = np.array([1, 1.25, 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5,
                  2.75, 3, 3.25, 3.5]) #  $[-]$ 

#Hauteur de vague significative, période de retour 50 ans
H_s_50y_all = np.array([1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11,
                        12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20]) # m

"""
-----
----- DONNEES CONSTANTES -----

```

```

-----
"""

# Constantes liées au matériau
f_yt = 355e6      # Limite élastique de l'acier [Pa]
f_y  = f_yt/1.1   # Limite d'élasticité de l'acier de calcul [Pa]
E    = 210e9      # Module de Young de l'acier [Pa]
E_T  = 200e9      # Module de Young de l'acier de la tour [Pa]
E_P  = 210e9      # Module de Young de l'acier du pieu [Pa]
rho_s = 7850      # Masse volumique de l'acier [kg/m³]
nu_s  = 0.3       # Coeff de poisson de l'acier [-]

# Paramètres généraux
rho_a = 1.225     # Densité de l'air [kg/m³]
rho_w = 1030      # Densité de l'eau [kg/m³]
g      = 9.81     # Accélération de la pesanteur [m/s²]
mu_a   = 1.81e-5  # Viscosité dynamique de l'air [Pa.s]
mu_w   = 1.14e-3  # Viscosité dynamique de l'eau [Pa.s]
L_k    = 340.2    # Echelle de longueur intégrale [m]
lambda_env = 1.35 # Facteur de sécurité environnementales [-]

# Constantes liées à la méthode EF
N = 101           # Nombre de points (nodes)
delta_conv = 1e-3  # Critère de convergence sur y
max_iter = 100     # Nombre maximal d'itérations pour convergence

#Coefficients liés aux vagues
C_D_imposed = 1.2
C_m_imposed = 2

-----
-----
MODELES ET FORCES DE VENTS
-----
-----
"""

def u_turb(I_ref, U_R, f_1p_max, K, s, D_r):
    """
    Calcule les composantes turbulentes de la vitesse du vent

    Entrée :
        I_ref      : intensité de turbulence
        U_R        : vitesse nominale de l'éolienne
        f_1p_max   : la fréquence maximale à laquelle l'éolienne peut tourner
        K          : le paramètre de l'échelle de Weibull
        s          : le paramètre de distribution de Weibull
        D_r        : le diamètre du rotor
    """

```

```

Sortie :
    u1 : vitesse turbulente NTM
    u2 : vitesse turbulente ETM
    u3 : vitesse turbulente EOG
    """

U_avg = K * gamma(1 + 1/s)
U_10_1y = 0.8 * K * (-np.log(1 - 0.98**(1 / 52596)))*(1 / s)
sigma_U_g = 0.11 * U_10_1y

u1 = 1.28 * I_ref * (0.75 * U_R + 5.6) * ((1 / (((6 * L_k) /
    U_R * f_1p_max) + 1)**(2/3)))*0.5
u2 = 2 * 2 * I_ref * (0.072 * (U_avg / 2 + 3) * (U_R / 2 - 4) + 10) *
    ((1 / (((6 * L_k) / U_R * f_1p_max) + 1)**(2/3)))*0.5
u3 = min(1.35 * (U_10_1y - U_R), 3.3 * sigma_U_g /
    (1 + 0.1 * (D_r / (L_k / 8))))

return u1, u2, u3

def F_wind(I_ref, U_R, f_1p_max, K, s, D_r, C_t, h_moyeu, h_w):
    """
    Calcule les forces et moments dus au vent sur l'éolienne

    Entrée :
        I_ref      : intensité de turbulence
        U_R        : vitesse nominale de l'éolienne
        f_1p_max   : la fréquence maximale à laquelle l'éolienne peut tourner
        K          : le paramètre d'échelle de Weibull
        s          : le paramètre de distribution de Weibull
        D_r        : le diamètre du rotor
        C_t        : le coefficient de poussée
        h_moyeu    : la hauteur du moyeu
        h_w        : la profondeur d'eau

    Sortie :
        F1 : force dans le cas U-1
        W1 : moment dans le cas U-1
        F2 : force dans le cas U-2
        W2 : moment dans le cas U-2
        F3 : force dans le cas U-3
        W3 : moment dans le cas U-3
    """
    u1, u2, u3 = u_turb(I_ref, U_R, f_1p_max, K, s, D_r)
    A_r = np.pi * (D_r/2)**2
    z_F_wind = h_moyeu + h_w

    F1 = 1/2 * rho_a * C_t * A_r * (U_R + u1)**2
    F2 = 1/2 * rho_a * C_t * A_r * (U_R + u2)**2
    F3 = 1/2 * rho_a * C_t * A_r * (U_R + u3)**2

```

```

    return F1, F1*z_F_wind, F2, F2*z_F_wind, F3, F3*z_F_wind

"""
-----
-----  MODELES ET FORCES DE VAGUES  -----
-----
"""

def wave_mod(H_s_50y):
    """
    Fonction qui va calculer la hauteur et la fréquence pour tous
    les modèles de vagues

    Entrée :
        H_s_50y : hauteur de vagues significatives période de retour de 50 ans

    Sortie :
        H1 : hauteur de la vague pour W1
        T1 : période de la vague pour W1
        H2 : hauteur de la vague pour W2
        T2 : période de la vague pour W2
        H4 : hauteur de la vague pour W4
        T4 : période de la vague pour W4
    """
    T_s_50y = 11.1 * (H_s_50y/g)**0.5

    H1 = 0.8 * H_s_50y
    T1 = 11.1 * (H1/g)**0.5

    H2 = H1 * (0.5*np.log(10800/T1))**0.5
    T2 = 11.1 * (H2/g)**0.5

    H4 = H_s_50y * (0.5*np.log(10800/T_s_50y))**0.5
    T4 = 11.1 * (H4/g)**0.5

    return H1, T1, H2, T2, H4, T4

def wave_fact(H, T, S):
    """
    Calcule les composantes eta et k selon un modèle donné

    Entrée :
        H : hauteur des vagues
        T : période des vagues

    Sortie :
        eta_D : elevation de surface d'eau pour la traînée
        eta_I : elevation de surface d'eau pour l'inertie

```

```

        k      : nombre d'onde
    """
    eta_D = H/2
    eta_I = 0

    def equation_dispersion(k, T, S):
        return g * k * np.tanh(k * S) - (2 * np.pi / T)**2

    k_init = (2 * np.pi / T) / np.sqrt(g * S)
    k_solution = fsolve(equation_dispersion, k_init, args=(T, S))[0]

    return eta_D, eta_I, k_solution

def F_wave_factor(S, H, T, k, eta_D, eta_I):
    """
    Prépare une partie des formules pour les force et les moment
    sur le pieu pour un modèle donné

    Entrée :
        S      : profondeur d'eau
        H      : hauteur de vague
        T      : période de vague
        eta_D  : elevation d'eau pour la traînée
        eta_I  : elevation d'eau pour l'inertie
        k      : nombre d'onde

    Sortie :
        F : Force due aux vagues
        M : Moment du aux vagues
    """
    PFD = 0.5 * rho_w * (np.pi**2 * H**2) / (T**2 * np.sinh(k * S)**2) * (
        (np.exp(2 * k * (S + eta_D)) - np.exp(-2 * k * (S + eta_D))) /
        (8 * k) + (S + eta_D) / 2)

    PFI = 0.5 * rho_w * (np.pi**3 * H) / (T**2 * np.sinh(k * S)) *
        (np.sinh(k * (S + eta_I)) / k)

    PMD = 0.5 * rho_w * (np.pi**2 * H**2) / (T**2 * np.sinh(k * S)) * (
        ((S + eta_D) / (8 * k) - 1 / (16 * k**2)) * np.exp( 2 * k * (S + eta_D))
        - ((S + eta_D) / (8 * k) + 1 / (16 * k**2)) * np.exp(-2 * k * (S + eta_D))
        + ((S + eta_D) / 2)**2 + 1 / (8 * k**2) )

    PMI = 0.5 * rho_w * (np.pi**3 * H) / (T**2 * np.sinh(k * S)) * (
        ((S + eta_I) / (2 * k) - 1 / (2 * k**2)) * np.exp(k * (S + eta_I)) -
        ((S + eta_I) / (8 * k) - 1 / (2 * k**2)) * np.exp(-k * (S + eta_I)) +
        1 / k**2)

    return PFD, PFI, PMD, PMI

```

```

def Pre_F_wave(H_s_50y, S):
    """
    Calcule toutes les valeurs partielles pour calculer les forces et les moments

    Entrée :
        H_s_50y : hauteur de vagues significative période de retour de 50 ans
        S       : profondeur d'eau

    Sortie :
        Un tableau de 4 par 3 avec les valeurs des préfacteurs dedans
    """
    #Calculs des hauteurs et périodes
    H1, T1, H2, T2, H4, T4 = wave_mod(H_s_50y)

    #Calculs eta et k
    eta_D_1, eta_I_1, k_1 = wave_fact(H1, T1, S)
    eta_D_2, eta_I_2, k_2 = wave_fact(H2, T2, S)
    eta_D_4, eta_I_4, k_4 = wave_fact(H4, T4, S)

    #Calculs des pré-valeurs
    PFD_1, PFI_1, PMD_1, PMI_1 = F_wave_factor(S, H1, T1, k_1, eta_D_1, eta_I_1)
    PFD_2, PFI_2, PMD_2, PMI_2 = F_wave_factor(S, H2, T2, k_2, eta_D_2, eta_I_2)
    PFD_4, PFI_4, PMD_4, PMI_4 = F_wave_factor(S, H4, T4, k_4, eta_D_4, eta_I_4)

    # Réduction en array pour lisibilité
    part_wave = np.array([[PFD_1, PFI_1, PMD_1, PMI_1],
                          [PFD_2, PFI_2, PMD_2, PMI_2],
                          [PFD_4, PFI_4, PMD_4, PMI_4]])

    return part_wave

def wave_coeff():
    """
    Calcule les coefficients de trainée et d'inertie

    Entrée :

    Sortie :
        C_D : Coefficient de trainée
        C_m : Coefficient d'inertie
    """
    C_D = C_D_imposed
    C_m = C_m_imposed

    return C_D, C_m

def F_wave(D, prewave):
    """
    Calcule les forces et moments dus aux vagues sur le pieu

```

Entrée :

D : Le diamètre du pieu
prewave : le résultat de Pre_F_wave

Sortie :

F1 : Force dans le cas U-1
M1 : Moment dans le cas U-1
F2 : Force dans le cas U-2
M2 : Moment dans le cas U-2
F3 : Force dans le cas U-3
M3 : Moment dans le cas U-3

"""

C_D, C_m = wave_coeff()

Modèle 1 (W1)

PFD_1, PFI_1, PMD_1, PMI_1 = prewave[0]

FD_1 = D * C_D * PFD_1

FI_1 = D**2 * C_m * PFI_1

MD_1 = D * C_D * PMD_1

MI_1 = D**2 * C_m * PMI_1

Modèle 2 (W2)

PFD_2, PFI_2, PMD_2, PMI_2 = prewave[1]

FD_2 = D * C_D * PFD_2

FI_2 = D**2 * C_m * PFI_2

MD_2 = D * C_D * PMD_2

MI_2 = D**2 * C_m * PMI_2

Modèle 3 (W3)

PFD_4, PFI_4, PMD_4, PMI_4 = prewave[2]

FD_4 = D * C_D * PFD_4

FI_4 = D**2 * C_m * PFI_4

MD_4 = D * C_D * PMD_4

MI_4 = D**2 * C_m * PMI_4

F1 = FD_1 + FI_1

M1 = MD_1 + MI_1

F2 = FD_2 + FI_2

M2 = MD_2 + MI_2

F4 = FD_4 + FI_4

M4 = MD_4 + MI_4

return F1, M1, F2, M2, F4, M4

"""

 ----- CAS DE CHARGES -----

```

"""

def resultants(wind_load, wave_load):
    """
    Calcule moments et force des 3 cas de charges

    Entrée :
        wind_load : Un tableau avec les forces et moments dus au vent
        wave_load : Un tableau avec les forces et moments dus aux vagues

    Sortie :
        F_tot_1 : Force résultante pour E1
        M_tot_1 : Moment résultant pour E1
        F_tot_2 : Force résultante pour E2
        M_tot_2 : Moment résultant pour E2
        F_tot_3 : Force résultante pour E3
        M_tot_3 : Moment résultant pour E3
    """
    F_tot_1 = lambda_env * (wind_load[0] + wave_load[0])
    M_tot_1 = lambda_env * (wind_load[1] + wave_load[1])

    F_tot_2 = lambda_env * (wind_load[2] + wave_load[4])
    M_tot_2 = lambda_env * (wind_load[3] + wave_load[5])

    F_tot_3 = lambda_env * (wind_load[4] + wave_load[2])
    M_tot_3 = lambda_env * (wind_load[5] + wave_load[3])

    return F_tot_1, M_tot_1, F_tot_2, M_tot_2, F_tot_3, M_tot_3

"""
-----
----- Courbes p-y pour le sable -----
-----
"""

def sand_coef(phi_prime_deg):
    """
    Calcule les coefficients nécessaires pour le calcul pour le sable

    Entrée :
        phi_prime_deg : angle de friction du sol

    Sortie :
        phi_prime : angle de friction du sol en gradient
        alpha      : angle d'interface
        beta       : angle de rupture du sol
        K_a        : coefficient de Rankine actif
    """

```

```

phi_prime = np.deg2rad(phi_prime_deg)
alpha = phi_prime / 2
beta = np.pi / 4 + phi_prime / 2
K_a = (1 - np.sin(phi_prime)) / (1 + np.sin(phi_prime))

return phi_prime, alpha, beta, K_a

def sand_p_u(z, D):
    """
    Calcule la résistance latérale ultime du sol

    Entrée :
        z : profondeur [m]
        D : diamètre actuel du pieu [m]

    Sortie :
        p_u : résistance latérale ultime [N/m]
    """
    C1 = np.tan(beta) ** 2 * np.tan(alpha) / np.tan(beta - phi_prime) \
        + K_0 * (np.tan(phi_prime) * np.sin(beta) / (np.cos(alpha) *
            np.tan(beta - phi_prime)) \
            + np.tan(beta) * (np.tan(phi_prime) * np.sin(beta) - np.tan(alpha)))
    C2 = np.tan(beta) / np.tan(beta - phi_prime) - K_a
    C3 = K_a * (np.tan(beta)**8 - 1) + K_0 * np.tan(phi_prime) * np.tan(beta)**4

    return min((C1 * z + C2 * D) * gamma_prime * z, C3 * D * gamma_prime * z)

def sand_p(y, z, D):
    """
    Calcule la résistance latérale du sol selon l'équation API

    Entrée :
        y : déplacement latéral [m]
        z : profondeur [m]
        D : diamètre du pieu [m]

    Sortie :
        p : pression latérale [N/m]
    """
    if z == 0:
        return 0 # pas de résistance si pas dans le sol

    A = max(3 - 0.8 * z / D, 0.9)
    p_u_val = sand_p_u(z, D)

    return var_sol * A * p_u_val * np.tanh(k_soil * z * y / (A * p_u_val))

```

```

def sand_D_k_y(y, z, D):
    """
    Calcule la raideur du sol, pour la méthode EF

    Entrée :
        y : déplacement latéral [m]
        z : profondeur [m]
        D : diamètre du pieu [m]

    Sortie :
        Dk_y : raideur latérale équivalente [N/m²]
    """
    if y == 0:
        return 0 # éviter division par zéro
    return sand_p(y, z, D) / y

"""
-----
----- PARTIE ÉLÉMENTS FINIS -----
-----
"""

class IterationLimit(Exception):
    """Exception levée si le système ne converge pas,
    permet à l'optimiseur de continuer"""
    pass

def solver(D, L, H, M):
    """
    Résout le système EF pour obtenir le déplacement y(z)

    Entrée :
        D : diamètre testé du pieu [m]
        L : longueur testée du pieu [m]
        H : force horizontale en tête de pieu [N]
        M : moment en tête de pieu [Nm]

    Sortie :
        z      : profondeurs de chaque noeuds [m]
        y      : déplacement de chaque noeuds [m]
        y0     : déplacement en tête (z = 0) [m]
        n_iter : nombre d'itérations effectuées
    """
    t = min(0.00635 + D / 100, 0.09) # épaisseur du pieu [m]

    I = np.pi / 64 * (D**4 - (D - 2 * t)**4) # inertie du pieu [m⁴]

```

```

l = L / (N - 1)  # longueur d'un élément

y_old = np.full(N + 4, 0.01)  # initialisation déplacement
y = y_old.copy()

b = np.zeros(N + 4)  #initialisation b
b[0] = 2 * l**3 * H / (E * I)
b[1] = l**2 * M / (E * I)

K = lil_matrix((N + 4, N + 4))  #initialisation K vide (plus rapide)

# Lignes de conditions aux limites (fixes)
K[0, 0:5] = np.array([-1, 2, 0, -2, 1])  # V(0) = H
K[1, 1:4] = np.array([1, -2, 1])  # M(0) = M
K[N + 2, N:N + 3] = np.array([1, -2, 1])  # M(L) = 0
K[N + 3, N - 1:] = np.array([-1, 2, 0, -2, 1])  # V(L) = 0

# Pré-initialisation de la forme générale de K
for j in range(2, N + 2):
    K[j, j - 2:j + 3] = [1, -4, 0, -4, 1]

conv_count = 0
n_iter = 0

while n_iter < max_iter and conv_count < 3:
    y_avg = (y + y_old) / 2  #mieux pour calcul itératif
    y_old = y.copy()

    # Mise à jour diagonale K
    for j in range(2, N + 2):
        z_j = (j - 2) * l
        dky_val = sand_D_k_y(y_avg[j], z_j, D)
        stiffness = 6 + (l**4) / (E * I) * dky_val
        K[j, j] = max(stiffness, 1e-8)  # éviter division par zéro

    try:
        y = spsolve(K.tocsr(), b)
    except Exception as e:
        raise IterationLimit(f"Erreur de résolution : {e}")

    if np.all(np.abs(y - y_old) < delta_conv):
        conv_count += 1
    else:
        conv_count = 0

    n_iter += 1

if n_iter >= max_iter:
    raise IterationLimit("Le système n'a pas convergé assez vite.")

```

```

z = np.linspace(0, L, N)
return z, y, y[2], n_iter

"""
-----
----- CONTRAINTES -----
-----
"""

def compute_internal_stresses(y, L, D):
    """
    Calcule les efforts internes dans le pieu à partir du déplacement EF

    Entrée :
        y : vecteur de déplacement EF (N + 4)
        L : longueur du pieu [m]
        D : diamètre du pieu [m]

    Sortie :
        V_Ed : effort tranchant [N]
        M_Ed : moment fléchissant [Nm]
    """
    t = min(0.00635 + D / 100, 0.09) # épaisseur du pieu [m]

    I = np.pi / 64 * (D**4 - (D - 2*t)**4) # inertie du pieu [m4]
    l = L / (N - 1) # longueur d'un élément EF

    # Tranches intérieures
    y_center = y[2:-2]
    y_plus_1 = y[3:-1]
    y_minus_1 = y[1:-3]
    y_plus_2 = y[4:]
    y_minus_2 = y[:-4]

    # Moment fléchissant ( $d^2y/dz^2$ )
    M_Ed = E * I * (y_minus_1 - 2 * y_center + y_plus_1) / (1**2)

    # Effort tranchant ( $d^3y/dz^3$ )
    V_Ed = E * I * (-y_minus_2 + 2 * y_minus_1 - 2 * y_plus_1 + y_plus_2) /
            (2 * 1**3)

    return V_Ed, M_Ed

def compute_frequency(D):
    """
    Calcule la fréquence propre du pieu

```

Entrée :

D : Diamètre d'entrée

Sortie :

f0 : la fréquence propre du système

"""

$L_S = h_w + 15 + 1.5$

#Inertie pieu

$t = \min(0.00635 + D / 100, 0.09)$ *# épaisseur du pieu [m]*

$I_P = \pi \cdot (D^4 - (D - 2t)^4) / 64$ *# inertie du pieu [m⁴]*

#Raideur des ressorts

$K_L = 1.074 \cdot (n_h^{0.6}) \cdot ((E_P \cdot I_P)^{0.4})$

$K_{LR} = -0.99 \cdot (n_h^{0.4}) \cdot ((E_P \cdot I_P)^{0.6})$

$K_R = 1.48 \cdot (n_h^{0.2}) \cdot ((E_P \cdot I_P)^{0.8})$

#EI_ETA

$q = D_b / D_t$

$f_q = \frac{1}{3} \cdot \frac{(2 \cdot q^2 \cdot (q - 1)^3)}{(3 \cdot (2 \cdot q^2 \cdot \ln(q) - 3 \cdot q^2 + 4 \cdot q - 1))}$

$EI_{eta} = E_T \cdot I_T \cdot f_q$

#Facteur de rigidité adimensionnel

$\eta_L = K_L \cdot L_T^3 / EI_{eta}$

$\eta_{LR} = K_{LR} \cdot L_T^2 / EI_{eta}$

$\eta_R = K_R \cdot L_T / EI_{eta}$

#fréquence initiale

$f_{FB} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E_T \cdot I_T}{L_T^3 \cdot (m_{RNA} + (33 / 140) \cdot m_T)}}$

#Réducteur

$C_L = 1 - \frac{1}{1 + 0.6 \cdot (\eta_L - (\eta_{LR}^2 / \eta_R))}$

$C_R = 1 - \frac{1}{1 + 0.5 \cdot (\eta_R - (\eta_{LR}^2 / \eta_L))}$

$C_S = \sqrt{\frac{1}{1 + (1 + L_S / L_T)^3 \cdot (E_T \cdot I_T / (E_P \cdot I_P)) - (E_T \cdot I_T / (E_P \cdot I_P))}}$

#clacul fréquence naturelle

$f_0 = C_L \cdot C_R \cdot C_S \cdot f_{FB}$

return f0

"""

----- *OPTIMISATION* -----

"""

```

def steel_volume(L, D, h_w):
    """
    Calcule le volume d'acier du pieu [m³]

    Entrée :
        L : longueur du pieu dans le sol [m]
        D : diamètre [m]
        h_w : hauteur d'eau [m]

    Sortie :
        V_steel : volume d'acier [m³]
    """
    t = min(0.00635 + D / 100, 0.09)
    return (L + h_w) * (np.pi * (D**2 - (D - 2*t)**2) / 4)

def check_constraints(y, L, D):
    """
    Vérifie les contraintes de service et de résistance

    Entrée :
        y : déplacement EF
        L : longueur du pieu [m]
        D : diamètre [m]

    Sortie :
        0 si OK, sinon (code, valeur dépassement)
    """
    if abs(y[2]) > 0.05 * D:
        return 1, abs(y[2]) / (0.05 * D) # déplacement trop grand

    l = L / (N - 1)
    theta = (y[3] - y[1]) / (2 * l)
    theta_lim = np.deg2rad(0.5)
    if abs(theta) > theta_lim:
        return 4, abs(theta) / theta_lim # rotation trop importante

    V_Ed, M_Ed = compute_internal_stresses(y, L, D)

    t = min(0.00635 + D / 100, 0.09)
    I = np.pi / 64 * (D**4 - (D - 2*t)**4)
    A = np.pi / 4 * (D**2 - (D - 2*t)**2)
    A_v = 2 * A / np.pi # section de cisaillement équivalente

    V_pl_Rd = A_v * f_y / np.sqrt(3)
    M_Rd = (I / (D / 2)) * f_y

    if np.any(np.abs(V_Ed) > V_pl_Rd):
        return 2, np.max(np.abs(V_Ed) / V_pl_Rd) # cisaillement
    if np.any(np.abs(M_Ed) > M_Rd):

```

```

        return 3, np.max(np.abs(M_Ed) / M_Rd)        # moment

    return 0, None

def optimize_pile(wind_load, wave_preload):
    """
    Optimise L et D pour minimiser le volume d'acier

    Entrée :
        U : vitesse du vent [m/s]
        h_w : hauteur d'eau [m]
        autres : géométrie éolienne

    Sortie :
        result.x : [L_opt, D_opt]
        result.fun : volume optimal
    """
    def cost_function(params):
        L, D = params
        try:
            # Définition des forces
            wave_load = F_wave(D, wave_preload)
            loads = resultants(wind_load, wave_load)

            # Réaction du sol
            z_2, y_2, lost1, lost2 = solver(D, L, loads[2], loads[3])
            z_3, y_3, lost3, lost4 = solver(D, L, loads[4], loads[5])

            if y_2[2] > y_3[2] :
                y = y_2
            else :
                y = y_3

            # Vérifications
            code, val = check_constraints(y, L, D)

            if code != 0:
                return 1e6 * val # pénalité
            return steel_volume(L, D, h_w)
        except:
            return 1e20 # échec

    #bounds = [(10, 80), (3, 25)] # L, D
    bounds = [(10, 80), (3, 25)] # L, D
    result = scipy.optimize.differential_evolution(cost_function, bounds)
    return result.x, result.fun
    """

```

```

-----
----- EXÉCUTION PRINCIPALE -----
-----
"""

# Paramètres de l'éolienne : "TEST", "5MW", "10MW", "15MW", "22MW"
eolienne = EOLIENNES["15MW"]
D_r      = eolienne["D_rotor"]
R_r      = eolienne["R_rotor"]
h_moyeu  = eolienne["h_moyeu"]
U_R      = eolienne["U_rated"]
f_1p_max = eolienne["f_1P,max"]
C_T      = eolienne["C_T"]
#m_RNA   = eolienne["m_ANC"]
#m_T     = eolienne["m_tour"]
#L_T     = eolienne["L_T"]
#D_t     = eolienne["D_t"]
#D_b     = eolienne["D_b"]
#D_m     = (D_b+D_t)/2
#t_T     = m_T / (rho_s * L_T * np.pi * D_m)
#I_T     = 1/16 * t_T * np.pi * (D_b**3 + D_t**3)

#Paramètres des sols : "TRES LACHE", "LACHE", "MOYEN", "DENSE"
sols     = SOLS["MOYEN"]
k_soil   = sols["k_soil"]
gamma_prime = sols["gamma_prime"]
phi_prime_deg = sols["phi_prime_deg"]
K_0      = sols["K_0"]
#A_sol   = sols["A"]
#n_h     = A_sol * gamma_prime / 1.35
phi_prime, alpha, beta, K_a = sand_coef(phi_prime_deg)

#Variabilité sol
var_sol = 1

#Paramètre d'hauteur d'eau
h_w = 25

#Paramètre d'intensité de turbulence
I_ref = 0.16

#Intensité de Weibull
K = 8

#Forme de distribution de Weibull
s = 2

#Hauteur de vague, période de retour de 50 ans
H_s_50y = 10

```

```

def main():

    print("Préparation de l'optimisation")
    wind_load = F_wind(I_ref, U_R, f_1p_max, K, s, D_r, C_T, h_moyeu, h_w)
    wave_preload = Pre_F_wave(H_s_50y, h_w)

    print("Optimisation en cours ... (Ignorez le code erreur ci-dessous)")
    [L_opt, D_opt], V_opt = optimize_pile(wind_load, wave_preload)
    print("Optimisation terminée")

    #print("\n Résultats de l'optimisation pour : ", var)
    print("\n Résultats de l'optimisation : ")
    print(" - Longueur optimale du pieu L : ", L_opt, " m")
    print(" - Diamètre optimal du pieu D : ", D_opt, " m")
    print(" - Volume d'acier nécessaire V : ", V_opt, " m³")

    wave_load = F_wave(D_opt, wave_preload)
    loads = resultants(wind_load, wave_load)
    """
    print(" \n - Force et moment E1 : ", loads[0]/1000000, loads[1]/1000000)
    print(" - Force et moment E2 : ", loads[2]/1000000, loads[3]/1000000)
    print(" - Force et moment E3 : ", loads[4]/1000000, loads[5]/1000000)
    """

    # Réaction du sol
    z_2, y_2, lost1, lost2 = solver(D_opt, L_opt, loads[2], loads[3])
    z_3, y_3, lost3, lost4 = solver(D_opt, L_opt, loads[4], loads[5])

    if y_2[2] > y_3[2] :
        print(" \n - Cas de charge limitant : E2")
    else :
        print(" \n - Cas de charge limitant : E3")

# Lancement du programme
if __name__ == "__main__":
    main()

```


UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl