



Rapport de projet PJ81 : Conception et modélisation d'une éolienne

FERRANDI Ludovic
KINDNESS Sarah SUDRIÈS Léo
TAOUBI Oumaima PONGERARD Mylène
TOGNACCA Elio RICHARD Axel
DEVINCENZ Hugo CERULLI Lucas

4A GM-IM année 2020/2021
Groupe n°2

Rapport de projet PJ81 :

Conception et modélisation d'une éolienne

FERRANDI Ludovic
KINDNESS Sarah SUDRIÈS Léo
TAOUBI Oumaima PONGERARD Mylène
TOGNACCA Elio RICHARD Axel
DEVINCENZ Hugo CERULLI Lucas

4A GM-IM année 2020/2021
Groupe n°2

I.	INTRODUCTION	- 1 -
II.	Définition de l'architecture	- 2 -
	A. Le diagramme pieuvre.....	- 3 -
	B. Chaîne info-énergie	- 3 -
	C. Schéma cinématique et liaisons mécaniques.....	- 4 -
III.	Prédimensionnement.....	- 5 -
	A. Pâle	- 5 -
	B. Mât	- 6 -
IV.	Conception et Calculs des composants pour une durée de vie de 30ans.....	- 10 -
	A. Multiplicateur	- 10 -
	1. Choix type de multiplicateur	- 10 -
	2. Dimensionnement engrenages	- 10 -
	3. Roulements	- 11 -
	4. Fixation dans la nacelle	- 11 -
	B. Transmission.....	- 12 -
	1. Arbre.....	- 12 -
	2. Fixation	- 13 -
	3. Moyeu.....	- 13 -
	C. Nacelle	- 15 -
	1. Couverture de la nacelle.....	- 15 -
	2. Support Nacelle	- 19 -
V.	Choix composants mécaniques et technologiques	- 22 -
	A. Le mât.....	- 22 -
	B. Nacelle	- 24 -
	1. Vérin hydraulique	- 24 -
	2. Palier.....	- 25 -
	C. Rotor.....	- 25 -
	1. Choix des pales :	- 25 -
	2. Couronne d'orientation du pitch.....	- 26 -
	3. Moteur du pitch	- 27 -
	D. Multiplicateur	- 28 -
	E. Transmission.....	- 28 -
VI.	Rapport Qualité, Sécurité et Environnement.....	- 29 -
	A. Principes, normes et conformités du produit fabriqué.....	- 29 -
	1. Prise en compte de la norme sur les aérogénérateurs – Etude de la norme Allemande .-	- 29 -
	2. Principe de base pour la conception	- 29 -

3.	Systèmes de sécurité, dispositif de protection et surveillance	- 29 -
4.	Exigences pour les fabricants, gestion de la qualité, matériaux et production :	- 30 -
5.	Hypothèses de chargement :	- 30 -
6.	Analyses de forces	- 31 -
7.	Structures	- 31 -
8.	Mât	- 31 -
9.	Composants de machines.....	- 31 -
10.	Prévention des risques	- 32 -
11.	La certification de nos produits.....	- 32 -
B.	Etude des défaillances et des risques.....	- 33 -
1.	Le QSE	- 33 -
2.	L'outil AMDEC.....	- 33 -
3.	La méthode des 5M.....	- 36 -
4.	Présentation des résultats.....	- 37 -
C.	Estimation des coûts	- 46 -
1.	La qualité :	- 46 -
2.	Sécurité :	- 46 -
3.	Environnement :	- 47 -
4.	Maintenance :	- 47 -
D.	Analyse environnementale.....	- 47 -
1.	Consommation d'eau et eaux usées (Etape 4)	- 47 -
2.	Le sol et le stockage (Etape 5)	- 49 -
3.	L'air, les odeurs, les poussières et le bruit (Etape 6)	- 49 -
4.	L'énergie (Etape 7).....	- 51 -
5.	La production et le recyclage des déchets (Etape 8).....	- 52 -
E.	Analyse de cycle de vie détaillée et éco-conception.....	- 53 -
1.	Hypothèses de l'ACV	- 53 -
2.	Résultats avant éco-conception	- 54 -
3.	Pistes d'éco-conception	- 55 -
4.	Résultats après éco-conception	- 56 -
VII.	Rapport de Gestion de Projet.....	- 58 -
A.	Premiers temps de la gestion de projet / phase de démarrage.....	- 58 -
B.	Gestion des Risques.....	- 61 -
C.	Communication	- 62 -
D.	Assurer la continuité du projet et vérifier l'avancement	- 62 -
E.	Gestion du manque de personnel.....	- 63 -

F.	Analyse de fin de projet.....	- 64 -
VIII.	ANNEXES.....	- 66 -

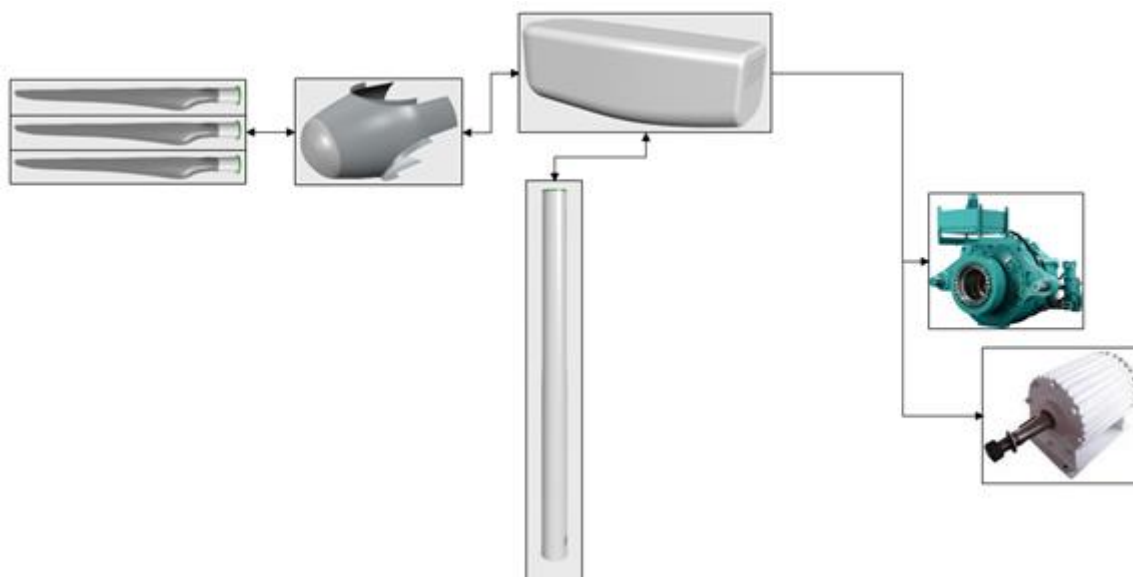
I. INTRODUCTION

Pour notre projet, nous avons dû réaliser la conception et la modélisation d'une éolienne. Dans une équipe de huit à dix personnes, nous devons nous organiser pour travailler comme un petit bureau d'étude. Un cahier des charges nous a été transmis afin de définir les besoins de ce projet. L'objectif principal est le suivant : la création d'un parc de 600 éoliennes en Afrique de l'Ouest en bord de mer. Pour ce faire, nous avons subdivisé notre travail en plusieurs thèmes pour livrer une éolienne qui pourra être fabriquée en Pologne, livrée au Sénégal puis mise en place et entretenue là-bas. Ainsi, nous avons créé une éolienne capable de produire 1MW tout en respectant les hauteurs que limite la taille des grues en Afrique. La gestion des sols et de l'environnement a aussi été étudiée pour limiter l'impact écologique : réduire au maximum l'impact sur la faune et la flore et ne pas polluer les nappes phréatiques. L'optimisation a été l'un des critères essentiels de notre projet. Nous avons fait le choix de concevoir une éolienne hybride de type à la fois 2 et 3 pour que nos éoliennes puissent produire de l'énergie même lors de vents faibles. La régulation de l'éolienne grâce à un ensemble de capteurs et de dispositifs de surveillance, permettra de fournir l'électricité la plus propre possible : 50Hz pour que notre alternateur envoie 20 000 kV sur les lignes haute tension du pays. Etant donné le contexte il a été impératif pour nous de fournir l'éolienne la plus sûre pour les travailleurs et les consommateurs du pays. Nous avons donc décidé de respecter point par point la norme Allemande au sujet des éoliennes. Nous avons choisi d'utiliser l'acier CORTEN pour mener notre projet grâce aux qualités de celui-ci que nous décrirons dans ce document. Ce rapport présente l'ensemble du projet que nous avons réalisé. Vous trouverez en premier lieu les schématisations ainsi que les calculs préliminaires puis les étapes de dimensionnement, de choix de composants et de modélisation. Enfin, une présentation de la partie Qualité Environnement Sécurité et de la Gestion de Projet sera exposée.

II. Définition de l'architecture

Le but de la définition de l'architecture est de définir les différents éléments qui composent un système et de mettre en évidence leurs interactions. Qu'ils soient conceptuels (liens entre le système et les sous-systèmes, l'environnement, la population...) ou physique (liaisons mécanique, principes de conception, solutions techniques...), ces interactions sont représentées schématiquement et c'est ce qui sera présenté dans cette section. Dans un premier temps, nous observerons une vue d'ensemble du système avec les différents « blocs » système qui le compose. Ensuite, nous verrons un diagramme pieuvre afin de définir les interactions entre le produit et son environnement. Nous en dégagerons sa fonction principale ainsi que ses fonctions secondaires. Nous travaillerons sur ces fonctions à l'aide de chaîne info-énergie, nous permettant de définir les sous-systèmes de notre projet. Enfin, après avoir créé le schéma cinématique de l'éolienne, nous exposerons les solutions techniques envisagées pour les liaisons mécaniques principales. Ce travail nous permet d'avoir une vue d'ensemble sur le projet et de planifier sa réalisation. Au cours du projet, nous avons conscience que certaines solutions techniques envisagées vont évoluer afin qu'elles puissent s'intégrer totalement dans le système final. Cette analyse préliminaire est donc primordiale pour commencer à éliminer des solutions et établir un repère pour la conduite de projet.

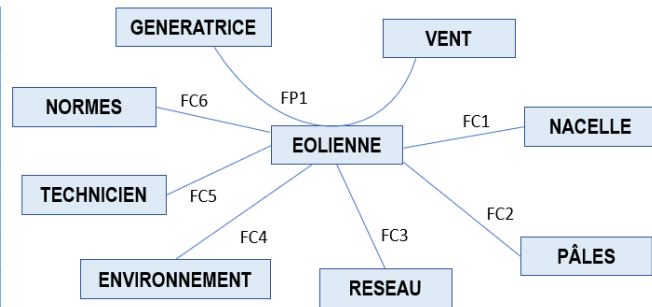
Après lecture du cahier des charges et des normes, nous avons identifiés les principaux éléments qui composent notre système. Ils sont schématisés sur l'illustration ci-dessous ainsi que leurs interactions.



Nous avons retenu donc quatre parties distinctes : Le mât (et ses fondations), la nacelle (composée d'un rotor, un multiplicateur et une génératrice), un moyeu et les pâles. Les liaisons entre ces éléments seront détaillées en fin de cette section et les solutions ainsi que les calculs associés seront disponibles dans la suite de ce rapport.

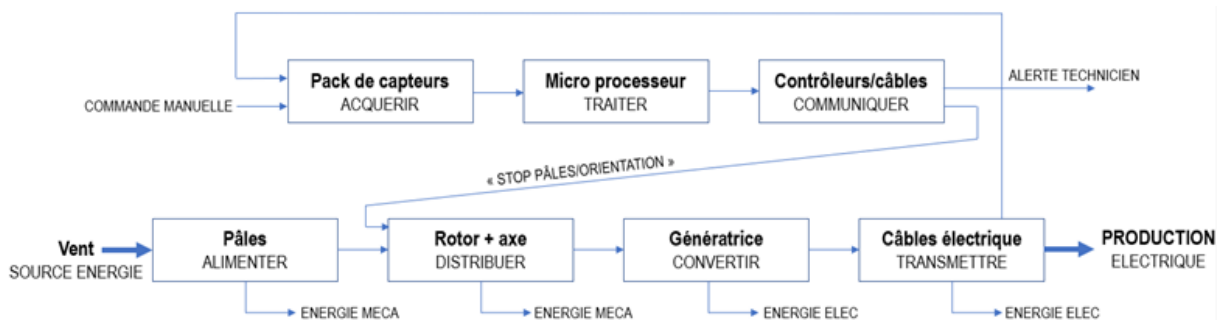
A. Le diagramme pieuvre

Fonction	Description
FP1	Produire de l'électricité
FC1	Orienter l'éolienne
FC2	Orienter les pâles
FC3	Distribuer l'électricité sur le réseau
FC4	Résister à l'environnement
FC5	Permettre une maintenance/installation
FC6	Respecter les normes

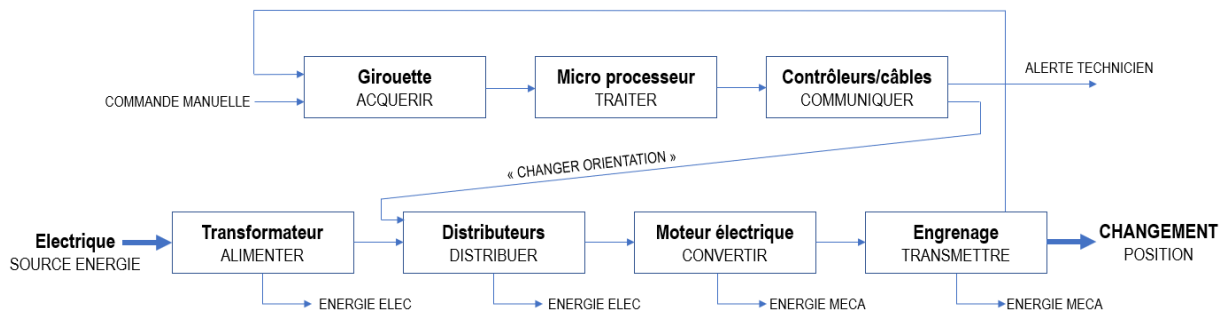


Dans ce diagramme pieuvre, la fonction principale est de « produire de l'électricité ». Cette fonction sera détaillée dans les prochaines sections. Cette analyse met en évidence des interactions indispensables comme « résister à l'environnement » ou « permettre une maintenance ». Ces fonctions sont à prendre en compte à chaque étape de conception de notre éolienne. Nous retrouvons aussi une fonction « respect des normes ». Il est primordial de prendre en compte les normes en vigueur afin de concevoir un système qui sera validé en fin de production. Il y a un gros travail d'étude de ces normes avant d'entamer la conception de l'éolienne.

B. Chaîne info-énergie



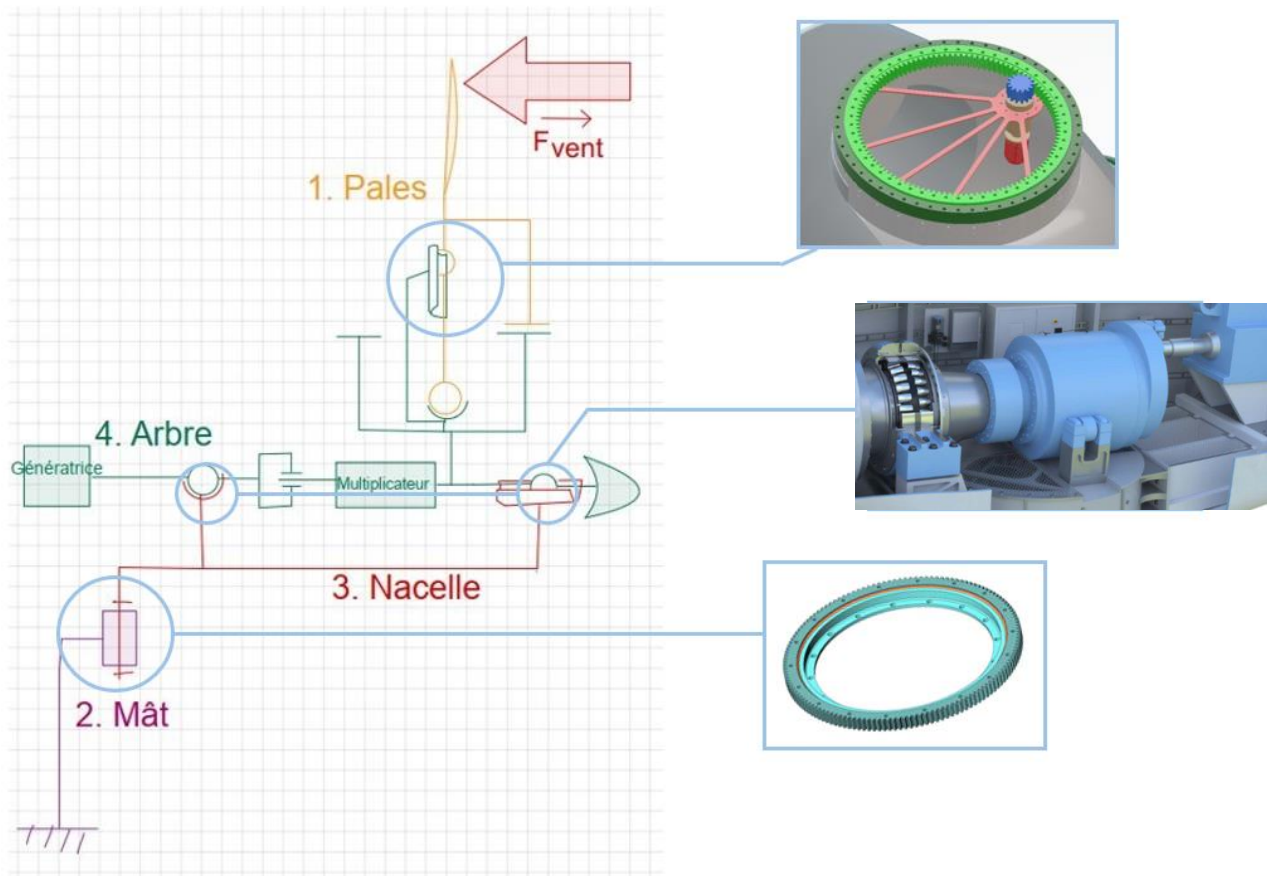
La chaîne info-énergie nous permet de comprendre le fonctionnement de notre système et d'identifier ses principaux composants. Avec cet outil, nous avons une vue d'ensemble sur les principaux sous-systèmes que nous allons devoir dimensionner et concevoir. Il apparaît aussi la chaîne « info » qui nous renseigne sur le système de surveillance de l'éolienne. Nous devons réfléchir aux capteurs à installer et à l'algorithme de détection qui déclenchera les actions nécessaires en réponse au trouble détecté.



Cette chaîne info-énergie est pour la fonction « orienter la nacelle ». Elle permet, dans le détail, de comprendre comment va fonctionner le système de surveillance. L'orientation de la nacelle sera faite par un moteur électrique. Une girouette, positionnée à un endroit stratégique, détectera le sens du vent. Quand l'éolienne n'est plus bien positionnée, le microprocesseur déclenchera l'action « orienter la nacelle ».

C. Schéma cinématique et liaisons mécaniques

À la suite de la définition du système et des sous-systèmes, nous avons réalisé un schéma cinématique nous permettant de situer les différentes liaisons entre les éléments. Nous avons ensuite réfléchi aux solutions disponibles pour réaliser ces liaisons.



Après réflexion et prédimensionnement des efforts, nous choisissons d'opter pour une grande couronne d'orientation pour la nacelle, trois petites couronnes d'orientation pour les pâles et deux roulements pour l'axe du rotor. Les étapes de dimensionnements, de choix et de conception de ces éléments seront présentées plus en détails dans la suite de ce rapport.

III. Prédimensionnement

A. Pâle

Au niveau de la démarche de prédimensionnement pour le choix des pales, nous avons commencé par évaluer les efforts auxquels seraient soumises chacune des 3 classes d'éoliennes décrite par la norme IEC dans les conditions les plus critiques de fonctionnement et de vent centenaire.

Le classeur "Prédimensionnement théorique" rassemble l'ensemble des calculs qui concernent les pales et les efforts qu'elles génèrent dans différentes conditions de vent spécifiées en début de document.

C'est la page "**pré dim Type II (CAO)**" du classeur qui rassemble les calculs qui sont pertinents pour nous étant donné que nous avons fait le choix stratégique de fournir des systèmes éoliens de classe 2.

Ayant fait le choix de fournir de éoliennes de type 2, ce sont les données de vent de type 2 mentionnées par la norme allemande qui ont servi de base à notre calcul.

Le profil NACA étant connu, nous nous sommes basés sur les valeurs qui lui correspondent pour la suite des calculs.

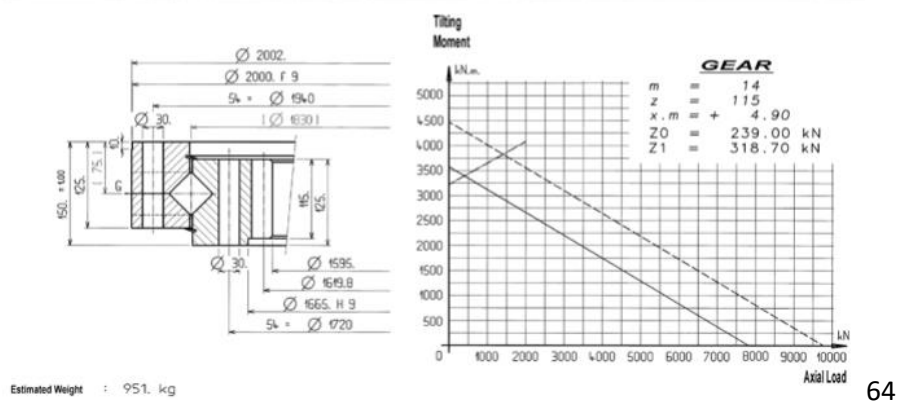
Nous avons divisé la pale en 10 sections (pas de $r/10$) pour déterminer le couple moteur (dM) généré par la pale ainsi que le moment fléchissant (M_{max}) induit par le vent sur la pale.

Une étude sur la théorie de Rankine-Froude nous a également permis de trouver la valeur théorique de la poussée de qu'effectue le vent sur l'ensemble du disque éolien.

La page "**Effort Pitch**" rassemble quant à elle les calculs qui concernent la répartition des efforts sur la couronne de pitch. Pour vérifier le choix de la couronne, on a besoin des efforts générés par :

- La force centripète (Traction uniforme)
- Le moment fléchissant de la pale (Traction localisée + Compression localisée)
- Le moment moteur de la pale (Traction localisée + Compression localisée)

Comme l'indique les calculs sur cette page, nous nous plaçons sur un point de fonctionnement majoré à un chargement axial de 1163 kN et un moment fléchissant de 720 kN.m. La figure fournie par le fabricant nous conforte donc dans le choix de cette couronne de pitch.



64

Enfin, la page "Efforts Selon Norme Allemande" modélise les efforts théoriques de pression, d'effort de poussée et de couple rotor à l'aide de la méthode énoncée dans la norme Allemande (présente également dans la norme IEC). Nous obtenons des estimations de chargement proches de celles obtenus à l'aides des autres méthodes.

Conclusion : L'ensemble des modélisations énoncées ci-dessus nous ont donc permis de choisir une pale catalogue en profil NACA.

B. Mât

Dans cette section nous détaillerons le dimensionnement du mât. Grâce au prédimensionnement, nous avons déterminé une hauteur de mât de 55 mètres. Par soucis de transport et en accord avec le cahier des charges, nous avons décidé de décomposer le mât en trois sections distinctes. Une de 15m et deux de 20m. Il a donc fallu dimensionner la fonction encastrement entre ces différents segments.

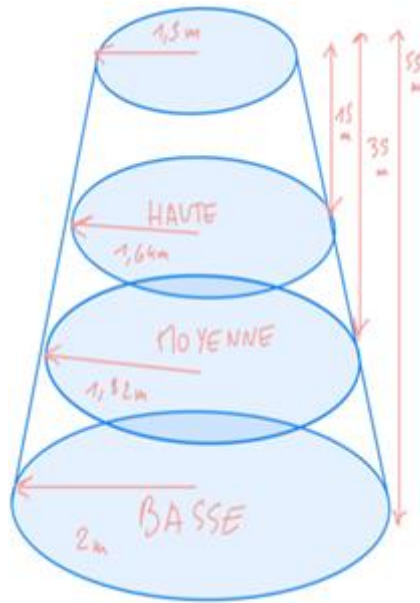
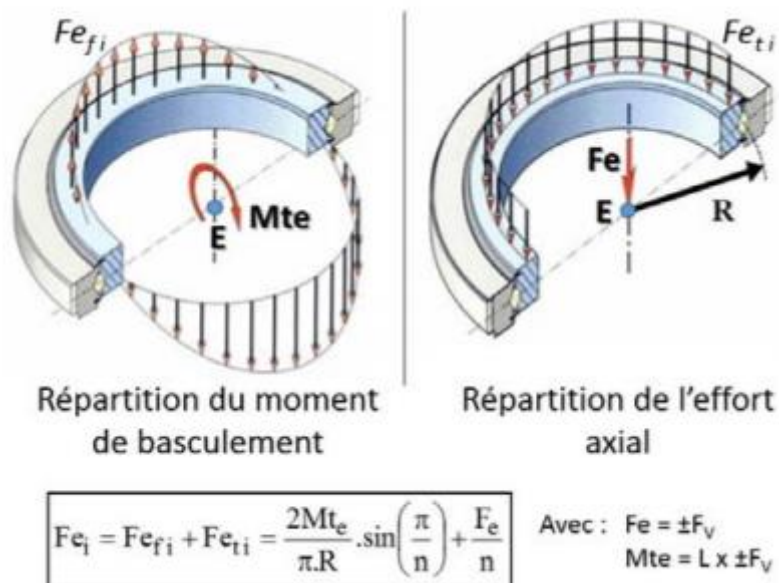


Schéma des différentes sections

Dans la feuille « liaisons parties mât » de l'Excel « Dimensionnement structure », on retrouve les différents calculs, sections par sections. Dans l'encart bleu, on a les données d'entrée, comprenant la géométrie et les caractéristiques du mât (dimension et poids). Pour chaque section, on retrouve : le calcul des efforts reportés au sommet de la section, un calcul du secteur le plus critique avec une analogie au calcul des couronnes d'orientation, un calcul de la condition de non-glissement, la détermination du nombre de vis ainsi que le calcul de l'effort de serrage.



Analogie de calcul pour l'effort critique

Pour chaque section, le calcul de la condition de non-glissement est respecté car l'effort généré par le poids de la nacelle est toujours supérieur au vent le plus violent possible dans cette zone géographique (vent cinquantenaire). Il n'est donc pas nécessaire d'installer un système de sécurité supplémentaire pour limiter l'arrachement de la nacelle.

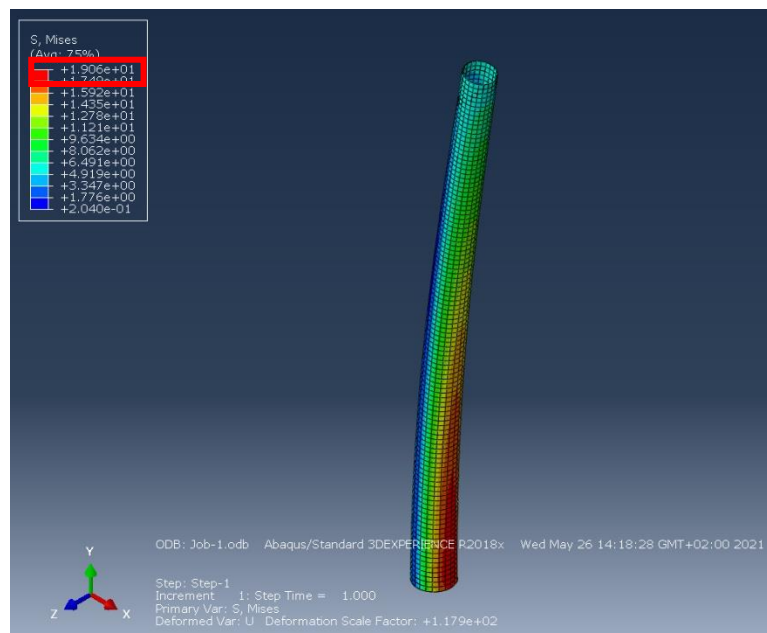
De ce fait, lors du calcul de l'effort presseur, on s'est rendu compte que le poids de la nacelle compensait largement l'effort produit par le vent. Ainsi, on se retrouve avec un effort presseur négatif. Cela veut dire que le poids de la nacelle suffit à contrer l'effort engendré par un vent latéral. Il est donc inutile d'ajoute la valeur de cet effort dans FOi tot.

Pour chaque section, on ajuste donc le nombre et le diamètre de vis. Nous choisissons une classe 10.9 pour assurer la tenue en fatigue. Nous appliquons un coefficient de 2. La distance radiale correspond à l'écartement en degrés entre chaque vis et la distance longitudinale à l'espacement entre deux vis, comme pour les arrêtes d'un polygone. Le serrage des vis sera effectué grâce à une clef dynamométrique et le calcul du couple de serrage est disponible sous le dimensionnement des vis.

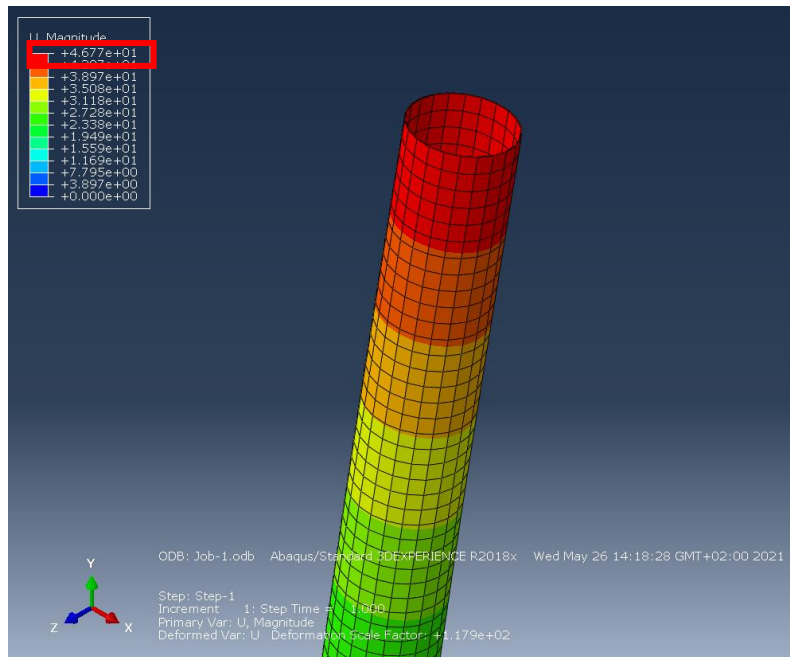
Un calcul de l'effort en cisaillement sur les vis ainsi que le dimensionnement de pion de centrage est disponible dans l'encart violent en début de la feuille Excel. Voici un tableau récapitulatif pour chaque section.

Classe 10.9	Section 1	Section 2	Section 3
Nombre de vis	60	50	40
Diamètre des vis [mm]	20	20	20
Effort de serrage [N.m]	222	157	139
Outil de serrage	Clé dynamométrique		

Avec les efforts estimés lors du prédimensionnement et réajusté en fin de projet, nous avons effectué une modélisation éléments finis sur le mât afin de vérifier sa tenue en statique. Nous avons pour cela utilisé le logiciel ABAQUS. Nous avons appliqué trois efforts différents sur le mât : Le poids de la nacelle, la force du vent ainsi qu'un moment correspondant à l'effort du vent et appliqués sur la nacelle et les pâles. L'objectif est de déterminer si les efforts localisés ne vont pas dépasser la limite élastique de l'acier CORTEN qui est de 350 MPa ainsi que le déplacement de la flèche qui, selon les normes de 40cm.



Champs des contraintes de VonMises [MPa]



Déplacements sur la structure [mm]

Sur cette modélisation, nous pouvons voir que notre structure résiste aux efforts et que la flèche ne dépasse pas 40 cm. Cependant, cette analyse est effectuée sur un mât plein, sans trou pour la porte. Étant donné que la structure résiste largement aux efforts avec une épaisseur de tôle de 2 cm, nous choisissons de poser des renforts soudés au niveau du trou de la porte afin de consolider la structure.

IV. Conception et Calculs des composants pour une durée de vie de 30ans

A. Multiplicateur

1. Choix type de multiplicateur

À la suite du prédimensionnement, nous avons les valeurs des différentes vitesses du rotor. En prenant en compte la puissance de l'alternateur de 1.1 MW, nous avons calculé les couples maximums auquel serait exposé le multiplicateur et la vitesse souhaitée en sortie pour en déduire le rapport de transmission. Grâce au Excel nommé *Dim. Réducteur* nous savions que le couple maximal à l'entrée serait de 516 kN.m et le rapport de transmission d'environ 73.69. Au vu de ces très grandes valeurs, voulant garder une architecture simple et pouvoir imposer un désaxage en sortie, nous avons choisi de répartir notre transmission à travers deux trains épicycloïdaux qui absorberaient la majeure partie du couple, suivis d'un étage simple pour assurer l'exactitude du rapport et le désaxage jusqu'à l'alternateur. Nous devons aussi tenir compte de la durée de vie exigée : 30 ans et donc de la facilité de maintenance.

2. Dimensionnement engrenages

On s'est donc servi du logiciel Kisoft pour dimensionner les trois étages du multiplicateur. Les engrenages sont en Acier de cémentation 18CrNiMo7-6. Nous avons réparti le rapport de transmission ainsi : le premier train épicycloïdal multiplierait la vitesse par 5, le second train épicycloïdal la multiplierait de 7.5 et le dernier étage simple la multiplierait par 2 pour avoir un rapport total de 75. En rentrant ces paramètres dans le logiciel, nous avons choisi les trains avec certaines caractéristiques soit imposées par la norme, soit que nous jugions importantes. En effet, nous voulions un coefficient de sécurité sur la fatigue des dentures et les flancs des engrenages $S_f > 1.4$ et $S_h > 1.2$; une taille uniforme sur les deux trains pour faciliter la conception du carter, aussi réduite que possible pour avoir de l'espace pour se déplacer autour dans la nacelle ; un engrènement supérieur à 2 pour protéger les dents ; et une masse réduite. Nous avons donc sélectionné les trains ci-dessous (*cf dossier Kisoft du livrable*) :

		Paramètres Train 1	Paramètres train 2	Paramètre étage	
entraxe	a	665	538	373,247	mm
épaisseur	b1	310	280,451	120,65	mm
	b2	310	271,951	115,82	mm
	b3	310	280,451		
module	m	22	16	9,652	mm
angle	alpha	20	20	20	deg
	beta	28	20	20	
déport	x1	0,695	0,473	0,088	mm
	x2	0,815	0,821	0,283	mm
	x3	-0,475	0,041		mm
engrènement	epsilon	2,009	2,011	1	

coef de sécurité	Sf	1,426	1,997	2,437	
	Sh	1,234	1,222	1,208	
masse	m	5350	4000,26	220	kg

En prenant en compte les paramètres réels de notre multiplicateur sélectionné, (cf *Excel Dim Réducteur*) nous obtenons un rapport final de 74.12 et une vitesse de sortie de 1473 tr/min nous donnant ainsi notre puissance de sortie de 1.1 MW.

3. Roulements

Avec ce choix de multiplicateur, il fallait donc des roulements pour soutenir et assurer la rotation des six satellites et deux porte-satellites efforts, ainsi qu'à la sortie du multiplicateur. Nous avons, par un calcul simple de PFS, déterminé les efforts présents dans chaque roulement et nous avons donc calculé, grâce au Excel, les forces appliquées au roulement. Pour les roulements sur le satellite, comme les efforts sont réduits et qu'il n'y a pas de force axiale, nous avons décidé que des roulements plats seraient adaptés. Contrairement, sachant que les efforts axiaux sont plus élevés au niveau des porte-satellites nous avons pris des rouleaux coniques qui répondent au porte-à-faux présent par leur montage en O. Les roulements choisis ainsi que les calculs de dimensionnement sont disponibles dans le fichier Excel *Dimensionnement Roulement*.

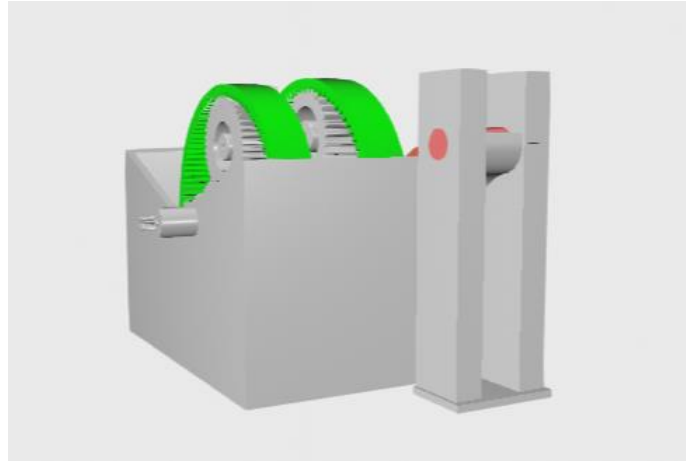
Afin d'améliorer l'isostatisme de l'arbre principal qui lie la partie rotor au multiplicateur nous avons revu le montage de roulement afin d'avoir 3 points de fixations :

- 2 points de fixations au niveau du multiplicateur montés sur silentbloc.
- 1 point de fixation au niveau du roulement

Nous avons exploré la gamme SKF des roulements dédiés à l'industrie éolienne et avons fait le choix d'un roulement à rouleaux coniques, à deux rangées de diamètre intérieur 415 mm. Le coefficient de sécurité obtenu est de 9 (voir feuille « Roulement Transmission Pale » de l'Excel « Dimensionnement Roulement »). Ce roulement permet donc de garantir la durée de vie du roulement. Nous n'avons pas eu le temps de modéliser sur 3D Expérience ce changement de montage. Nous vous joignons donc ici un montage modèle.

4. Fixation dans la nacelle

Pour la fixation du multiplicateur dans la nacelle nous avons opté pour la solution suivante :

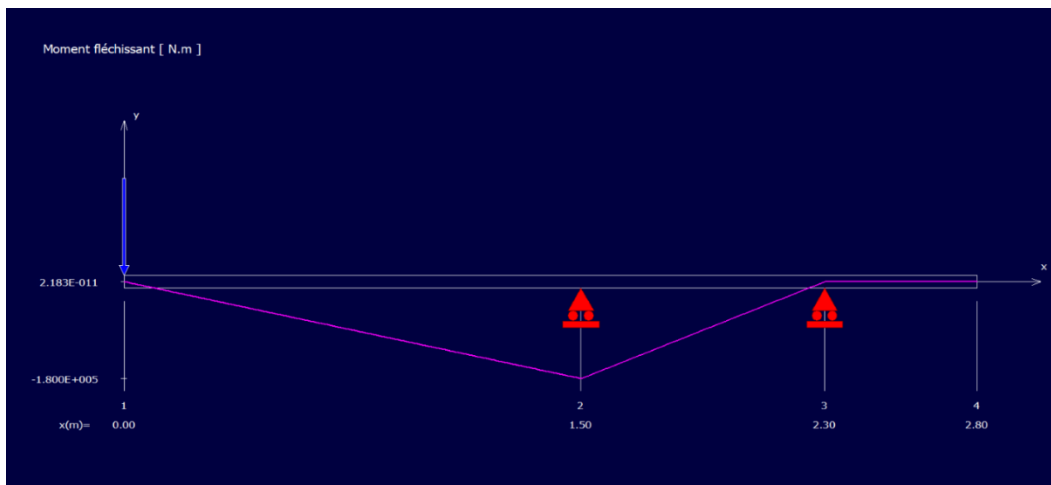


Notre carter du multiplicateur est donc conçu pour avoir des oreilles dans lequel on insèrera par frettage un axe (en rouge sur l'image) qui sera posé sur des appuis verticaux, encastrés sur la structure portante de la nacelle (cf CAO). Cet axe a été dimensionné dans le document Excel *Dim.Axe* pour résister au poids du carter.

B. Transmission

1. Arbre

L'arbre reliant le rotor au multiplicateur a été dimensionné en statique et en fatigue dans le Excel *Vérification des arbres* pour résister au couple d'entrée sur le rotor et au poids des pâles. Ces efforts ont été déterminés par un modèle RDM7 et par la suite introduits dans le Excel, dimensionnant un arbre creux de diamètre 700 mm avec gorges d'entrée en Acier 34CrMo4(35CD4) pour obtenir un coefficient de sécurité en statique de 4.2 et un coefficient de sécurité en fatigue de 2.6.



2. Fixation

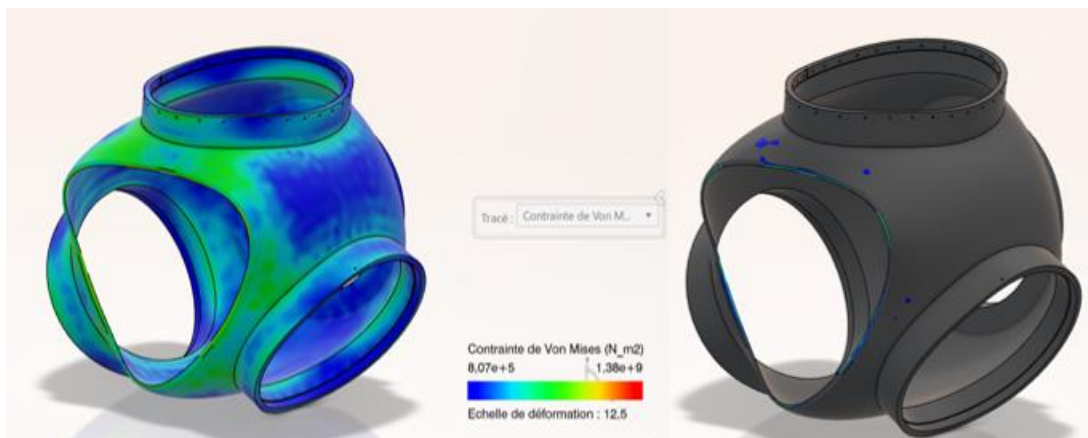
Nous avons un souci d'hyperstatisme dans la fixation de l'axe de transmission et du multiplicateur sachant que nous avons deux points de fixation obligatoires dans le multiplicateur. Il fallait donc trouver une solution pour maintenir l'axe de transmission en un seul point : nous avons donc décidé de placer un roulement spécifique nommé le "Nautilus" (cf. *Fiche technique Nautilus*) en aval du rotor comme seul point de fixation de l'axe. Ce roulement, par sa double rangée de rouleaux (voir image ci-dessous) fait le travail de deux roulements mais en un seul endroit. On peut donc directement l'installer dans notre assemblage multiplicateur sans avoir d'hyperstatisme. De plus, il est prévu pour avoir une maintenance simple et pour avoir une durée de vie correspondante plus longue que deux roulements équivalents.



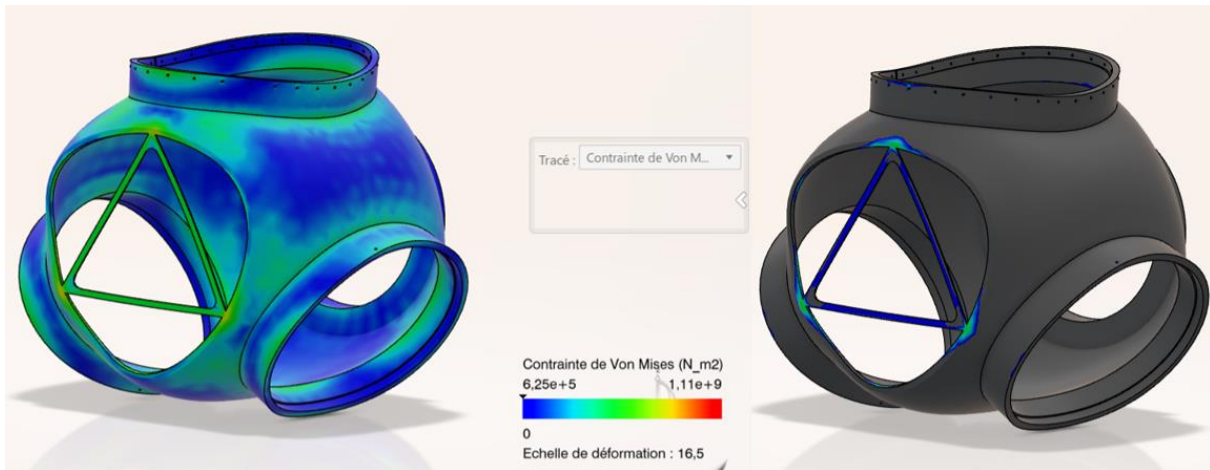
3. Moyeu

Concernant le moyeu support des pâles, un premier modèle a été conçu sur 3Dexpérience. Le premier critère concernant les dimensions a été l'intégration de cette pièce dans l'assemblage. En effet, nous avons déterminé une longueur de pale nécessaire au respect du cahier des charges. Le diamètre de pied de pale était donc imposé (Diamètre = 1644 mm). Ce diamètre ayant lui-même une influence sur la couronne d'orientation de diamètre extérieur 2002 mm, nous avons donc conçu notre moyeu de façon à pouvoir intégrer les 3 pales. Ce moyeu possède donc un diamètre extérieur de 3000 mm.

Nous avons ensuite effectué des simulations éléments finis afin de déterminer l'épaisseur de cette pièce.



Pour une **épaisseur de 20mm**, la contrainte de Von Mises atteint facilement 700 MPa. Sur la capture de droite, on peut voir les points où la contrainte dépasse 750 MPa.

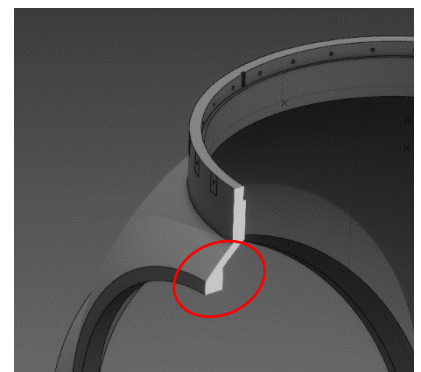


Pour une **épaisseur de 30mm**, la contrainte de Von Mises atteint des valeurs proches de 500 MPa. Sur la capture de droite, on peut voir les points où la contrainte dépasse 500 MPa. Afin de rigidifier la structure nous avons rapidement esquissé des renforts visant à limiter l'écrasement de l'ouverture. On constate qu'une concentration de contrainte existe au niveau des points d'ancrage des renforts. Cette observation est logique car l'encastrement entre les renforts et la structure à rigidifier n'a pas été travaillé dans le détail. En effet, des congés auraient permis de soulager ces zones.



Pour une **épaisseur de 40mm**, la contrainte de Von Mises atteint des valeurs proches de 350 MPa. Sur la capture de droite, on peut voir les points où la contrainte dépasse 400 MPa. Sur ce modèle, les renforts ont été supprimés pour laisser place à un renfort de la circonférence.

Nous avons conservé ce modèle dans l'assemblage. Le matériau de cette pièce sera de l'**acier 35CrMo4 (Re= 550 MPa)**.



C. Nacelle

1. Couverture de la nacelle

La conception de la couverture de la nacelle de nos éoliennes a été réalisée en plusieurs étapes. En premier lieu, il nous a fallu faire un choix de géométrie. Ce choix fait, nous nous sommes basé sur les composants à intégrer au sein de la nacelle afin de déterminer l'espace nécessaire au sein de celle-ci.

Après le prédimensionnement, nous avons réalisé des simulations numériques à l'aide du logiciel SolidWorks 2020. En appliquant un **vent cinquantaire** à plusieurs géométries simples de nacelle.

Sur SolidWorks nous avons simulé les cinq situations de vent cinquantaire qui sont, d'après la norme allemande, les situations les plus critiques pour la nacelle :

- Vent d'arrachement arrière
- Vent d'arrachement oblique
- Vent d'arrachement latéral
- Vent d'arrachement oblique arrière
- Vent d'arrachement oblique avant

Nous avons appliqué ces sollicitations sur quatre géométries de nacelles simples de manière à collecter des données de pression et d'effort à l'aide du module Flow Simulation de SolidWorks. Le but était dans un premier temps d'identifier si un profil de nacelle serait particulièrement avantageux pour ces sollicitations critiques.

C'est la sollicitation oblique arrière qui génère les efforts et les pressions les plus importantes sur l'ensemble des profils. C'est d'ailleurs l'exemple que nous illustrons ci-dessous.

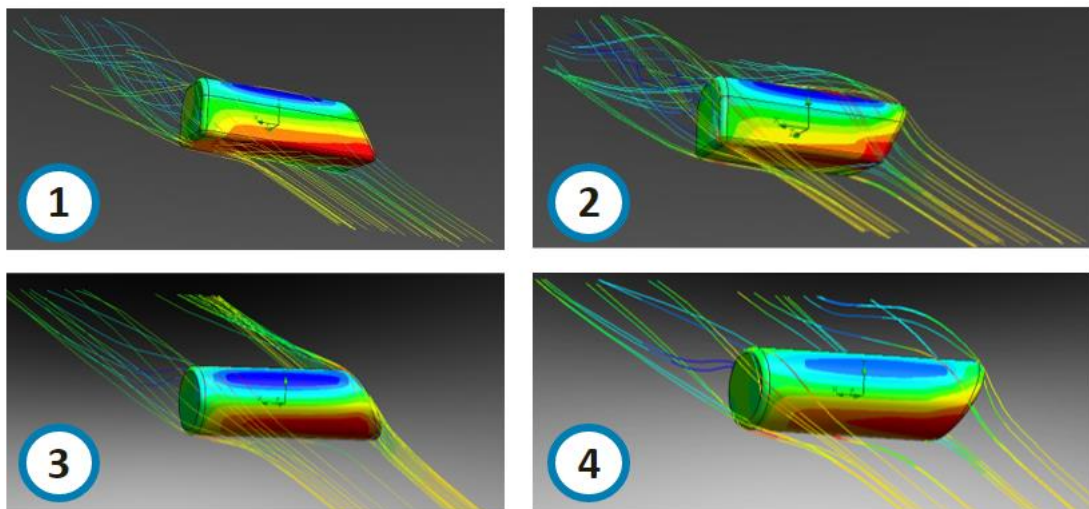


Figure 1 : Simulation de pression pour un vent cinquantaire en arrachement arrière oblique 1

Simulation	Pression maximale (Pa)	Effort (kN) sur Y
1	1317	11,7
2	1883	10,2
3	1550	9,8
4	1570	9,3

Tableau 1 : Résultats de pression pour chaque géométrie en arrachement oblique arrière 1

On peut remarquer que les valeurs de pression obtenues sont relativement faibles et proches les unes des autres. Elles se rapprochent également des résultats que nous pouvons obtenir avec la formule de pression du vent ($P = 0,613.V^2$).

Nous avons réalisé cette étude sur les 4 modèles avec l'ensemble des sollicitations citées plus haut, les écarts de pression et d'efforts ne justifient pas de choisir une géométrie plutôt qu'une autre. Nous avons donc décidé de choisir un profil qui favorisera le bon arrangement de nos composants dans la nacelle donc un profil qui se rapproche du profil n°2.

Nous avons ensuite comparé ces résultats dans les mêmes conditions mais avec la géométrie finale (Figure 2).

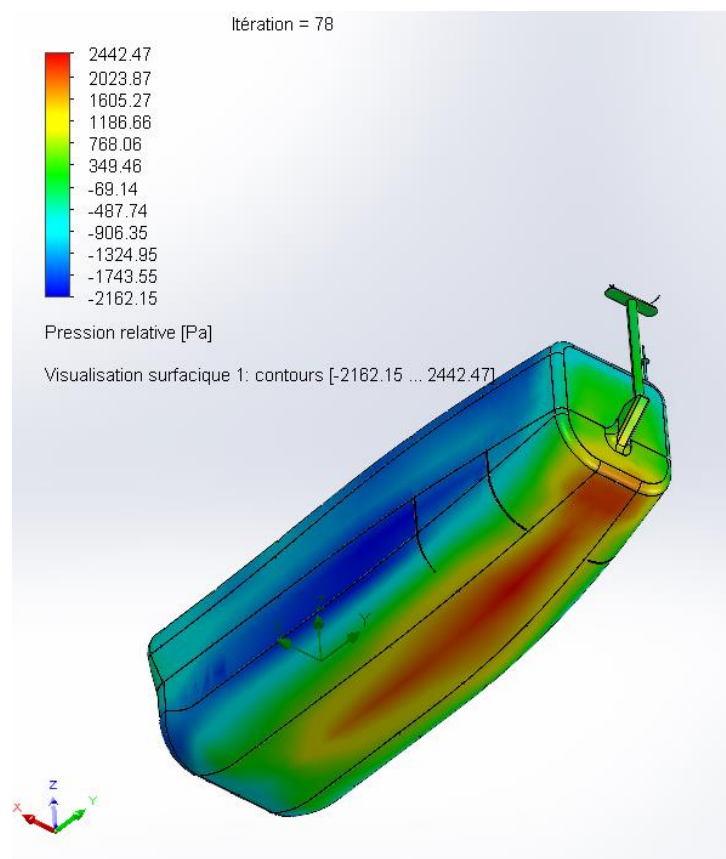


Figure 2 : Vérification de l'arrachement de la nacelle avec la géométrie finale

La pression maximale obtenue (Figure 2) sur le modèle de nacelle final est du même ordre de grandeur de celle des géométries simplifiées ce qui montre une bonne approximation de ces géométries.

Le dimensionnement final de la nacelle (Figure 3) a été réalisé en connaissant l'espace nécessaire pour insérer l'ensemble des composants tels que le multiplicateur. La longueur se justifie notamment par notre choix d'intégrer l'échangeur thermique huile/eau et eau/air à l'intérieur de la nacelle. Pour rappel, il s'agit d'un élément particulièrement volumineux mais relativement léger si on le compare aux autres éléments de la nacelle ce qui justifie notre réduction de section et de structure portante à l'arrière de la nacelle.

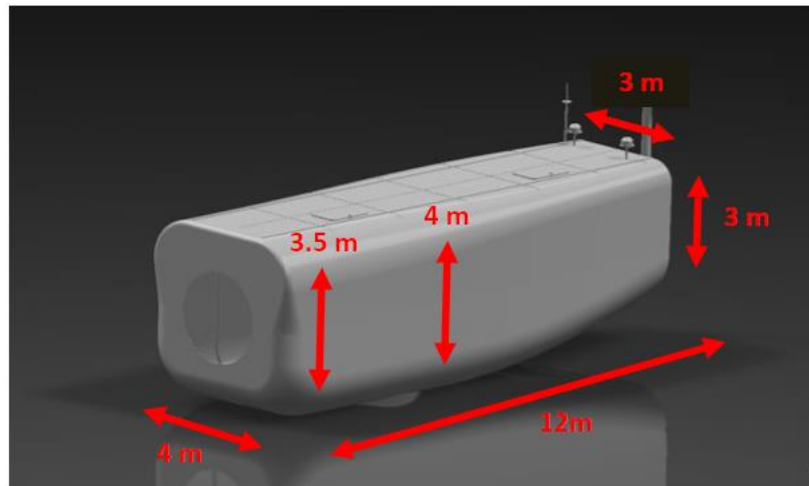


Figure 3 : Dimensions finale de la couverture de nacelle

Concernant le matériau utilisé pour la réalisation de cette couverture de nacelle, nous avons choisi au départ de la réaliser en acier Corten. Malgré des simulations qui assuraient le maintien de la nacelle, nous avons choisis de changer de matériau car il était risqué d'ouvrir la nacelle lors d'une maintenance par exemple. En effet, la masse importante de l'acier risquait d'induire des efforts très importants au niveau des soudures de la liaison entre le mécanisme d'ouverture de nacelle et la paroi de la nacelle. Pour cette raison, nous avons décidé de réaliser notre éolienne en matériau composite et plus particulièrement en résine époxy renforcé en fibre de verre non tissée.

Avec une concentration importante en fibre de verre (60%) et une armature en acier, on assure un matériau suffisamment résistant et léger. La couverture de la nacelle serait donc réalisée en moulage injection sandwich de la même façon que les coques de dériveurs et quillards de sport sont fabriqués.

Nous avons par la suite réalisé des simulations supplémentaires en sollicitation latérale afin de dimensionner l'épaisseur de la couverture de la nacelle. On applique pour cela un vent cinquantenaire sur une surface latérale ce qui constitue une contrainte maximale pour les fibre composites (Figure 4).

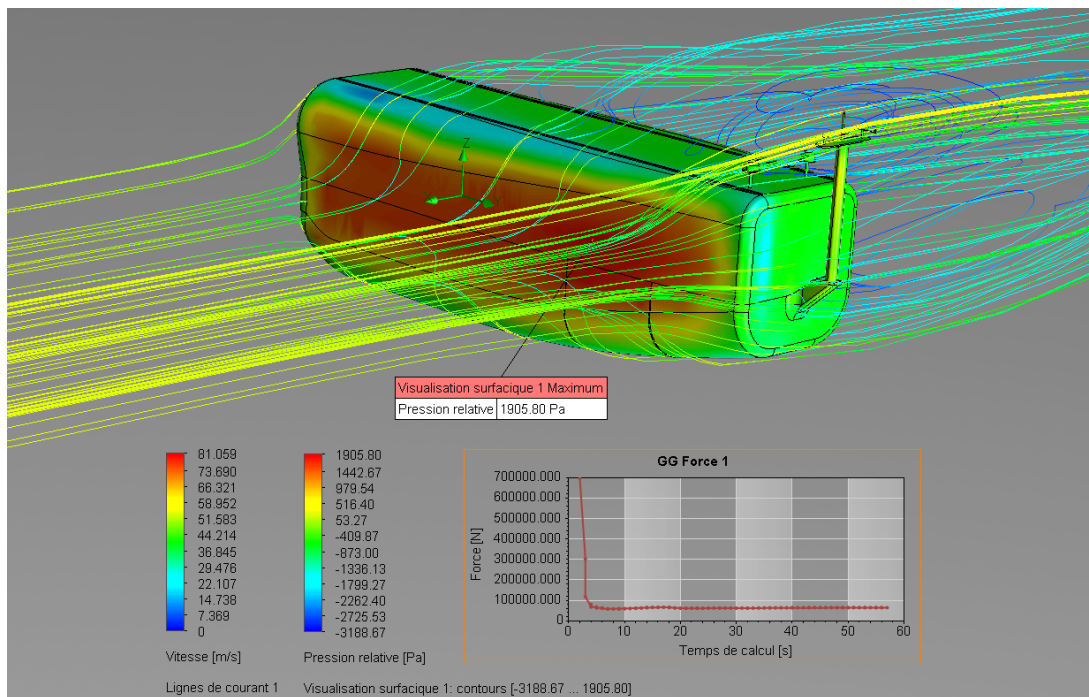


Figure 4 : Effort appliqué sur un côté latéral de la nacelle

Avec une épaisseur de 5mm de composite, on obtient une contrainte de Von Mises maximale de 93,8 MPa qui est inférieure à la limite d'élasticité du matériau qui est de 240 MPa ainsi qu'un déplacement maximal de 2,85 mm qui reste acceptable dans le cas critique d'un vent cinquantaenaire.

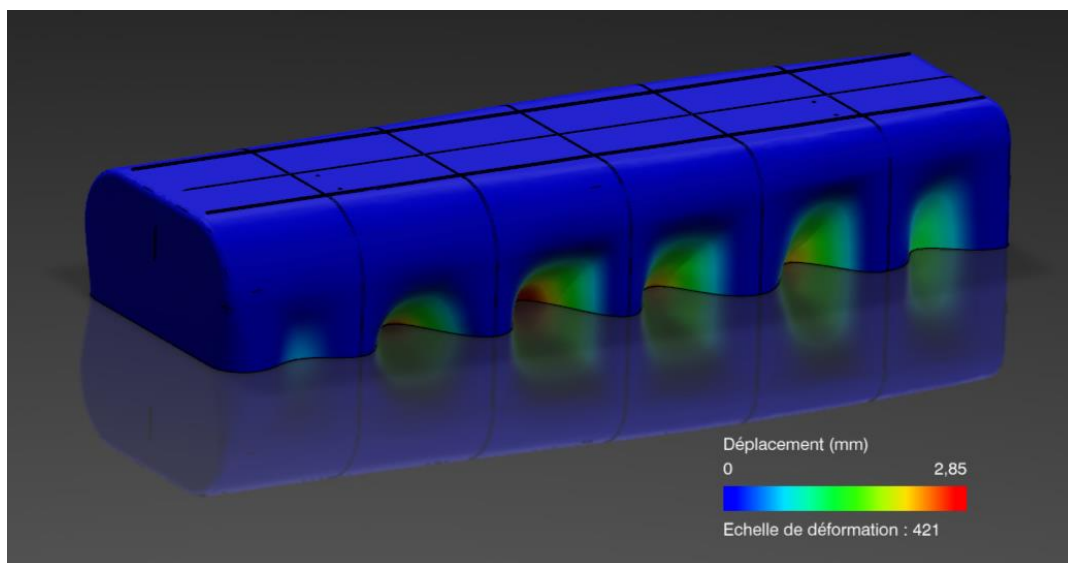


Figure 5 : Déplacements de la paroi de la couverture de la nacelle soumise à un vent cinquantaenaire

L'ensemble des simulations réalisées sont détaillées (images et Excel) dans le dossier « Simulation Nacelle ».

Nous avons enfin étudié le système permettant d'ouvrir la nacelle en cas de maintenance lourde. Il s'agit là d'une n'est absolument pas fréquent et est nécessaire seulement dans les cas de remplacement ou grande maintenance de composant massif comme la génératrice ou le multiplicateur doivent être démontés et évacués de la nacelle.

Cette ouverture sera assurée par un vérin choisis sur catalogue qui sera situé sur un des renforts métalliques de la nacelle (Figure 6). Ce dernier poussera dans le même plan que le centre de gravité de la couverture de nacelle. De cette façon, c'est le pivot central qui prendra l'ensemble de la charge.

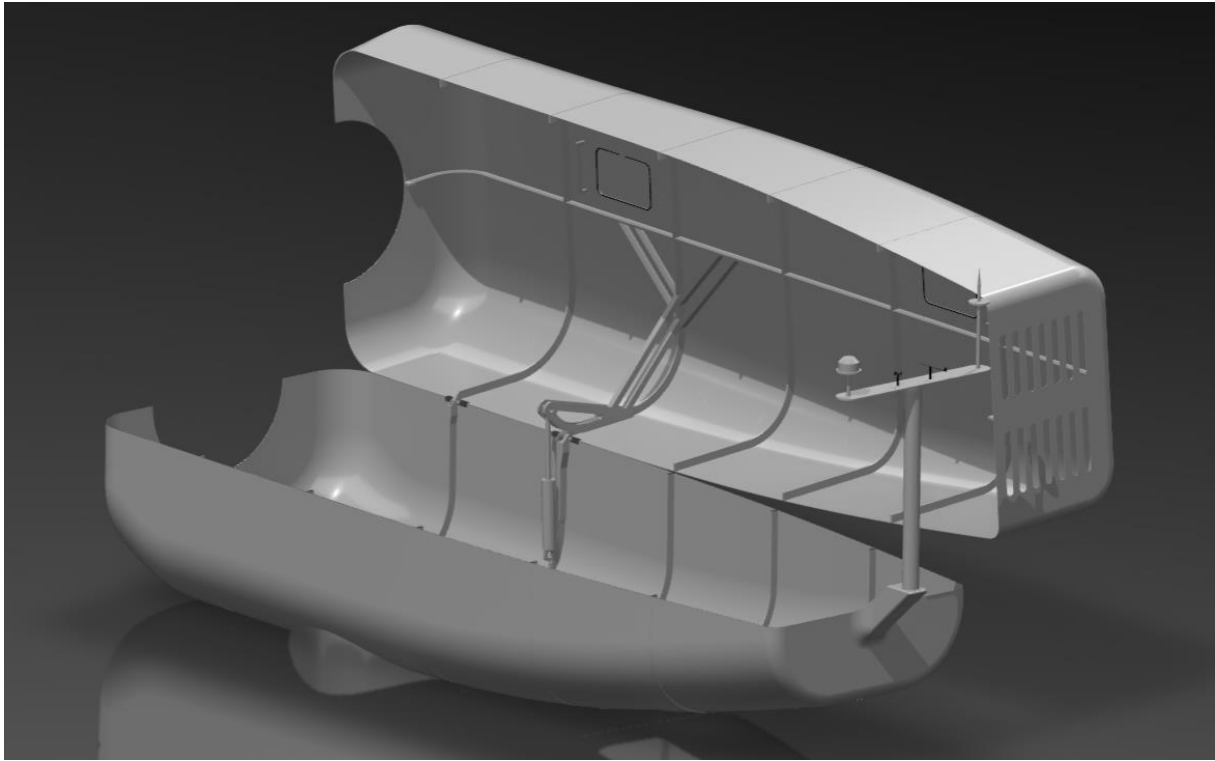


Figure 6 : Ouverture de la couverture de la nacelle

On peut également noter certains détails réalisés sur notre couverture de nacelle tels que :

- Des aérations à l'arrière de la nacelle pour évacuer le fonctionnement de l'échangeur
- Deux trappes au-dessus de la nacelle pour permettre aux techniciens d'accéder à l'extérieur pour les maintenances + Une grande trappe d'évacuation sur le dessous.
- Une station météorologique fixe avec l'ensemble des capteurs ainsi que le paratonnerre et la balise d'obstacle

2. Support Nacelle

Pour créer la nacelle, nous avons décidé de nous appuyer en premier lieu sur les surfaces fonctionnelles de notre assemblage. En effet pour créer la structure portante de la nacelle nous avons dû nous appuyer sur les surfaces fonctionnelles de toutes les autres parties de l'assemblage : qui sont le multiplicateur, le rotor, le mat et la génératrice.

Sur la figure ci-dessus, nous pour voir en surbrillance les zones de contact avec les autres éléments de l'assemblage

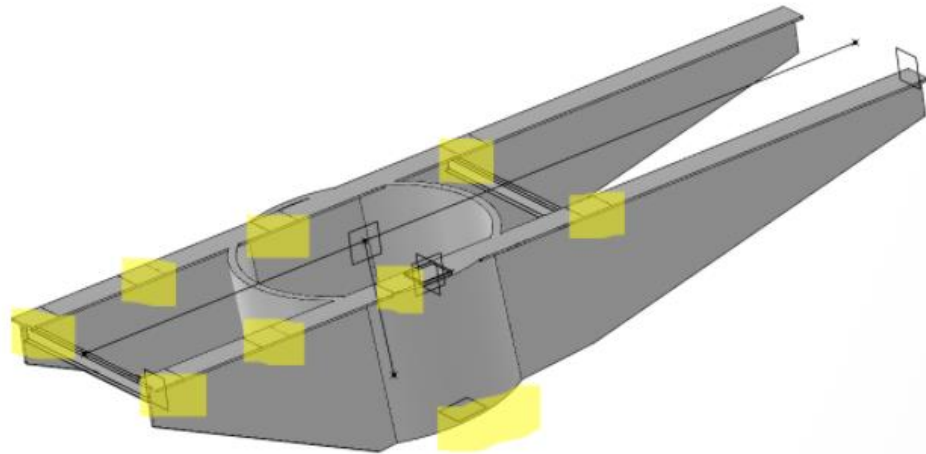


Figure 1

Conditions aux limites :

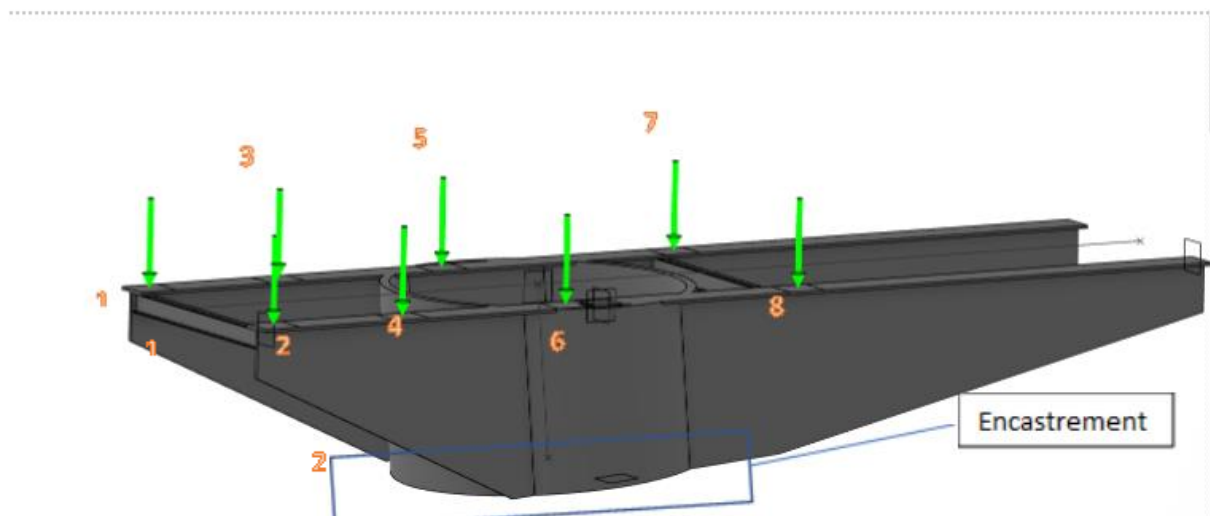


Figure 2

Nous avons choisi pour les conditions aux limites d'encastrement le bas du cylindre, ce qui correspond à l'emplacement de la couronne d'orientation.

Quant aux efforts, le poids du rotor complet est réparti sur les quatre premiers efforts. Tandis que nous avons mis les efforts du multiplicateur sur les points 5 et 6. Sur le point 6 nous avons rajouté un effort du au couple du réducteur pour simuler la surcharge de à l'effet gyroscopique. Pour finir, nous avons rajouté un effort correspondant au poids de la génératrice.

Les deux poutres en I de part et d'autre du cylindre central, sont là pour simuler le fait que le rotor (à l'avant) et la génératrice (à l'arrière), vont lier les deux longerons et donc fortement limiter la déformation.

Simulation :

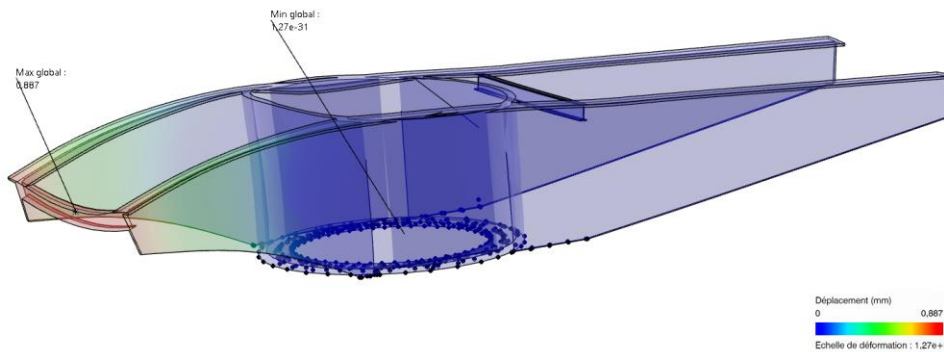


Figure 3 Modèle élément fini résultat en déplacement

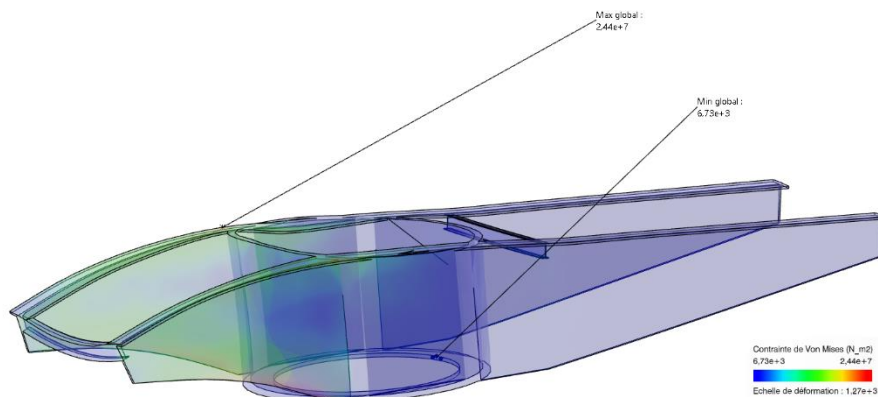


Figure 4 Modèle élément fini résultat en contrainte de Von Mises

Grâce aux conditions limites que nous avons définies plus haut, nous obtenons les simulations suivantes, un déplacement maximum de $U = 0.8\text{mm}$ et contrainte de Von Mises de $\sigma = 24\text{ Mpa}$. Nous avons donc un coefficient de sécurité très élevé pour la structure de la nacelle, ce qui est très important car c'est la pièce qui relie toutes les pièces de la nacelle.

Fabrication Support nacelle

Pour fabriquer le support nacelle, nous optons pour le mécanosoudage de grande plaque d'acier en 34CrMo4. Les deux longerons ont un profil en I dont l'âme et la plaque seront aussi mécanosoudés.

Par ailleurs, les deux longerons traversent le cylindre principal, qui sera sectionné en ces points pour laisser passer les longerons, puis mécanosoudés pour plus de résistance.

V. Choix composants mécaniques et technologiques

Pour commencer le projet, la première étape est de choisir la correspondance entre les différents composants de l'éolienne.

A. Le mât

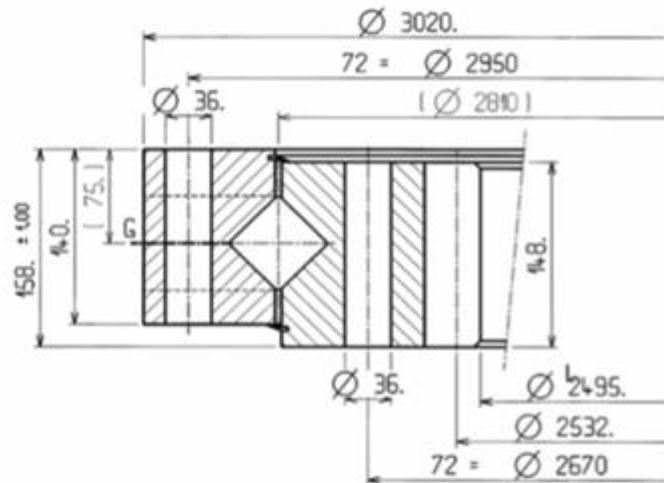
Couronne d'orientation et choix du moteur :

Le dimensionnement de la couronne d'orientation de la nacelle s'est fait à partir du catalogue ROLLIX. Nous avons deux contraintes principales : la taille de la couronne ainsi que les efforts appliqués. Nous avons donc, dans un premier temps, choisi une couronne en fonction de sa taille et nous avons ensuite vérifié son dimensionnement au niveau des efforts. Une fois fait, il a fallu vérifier la fonction fixation, déterminer le couple d'entraînement nécessaire, le choix du (des) moteur(s), le matage des vis, la durée de vie ainsi que la fonction lubrification.

Tous ces calculs sont disponibles dans l'Excel « Dimensionnement structure » dans la feuille « choix couronne nacelle ». On a sélectionné la couronne de référence « 07-2810-09 » pour sa grande taille, s'adaptant au sommet du mât.

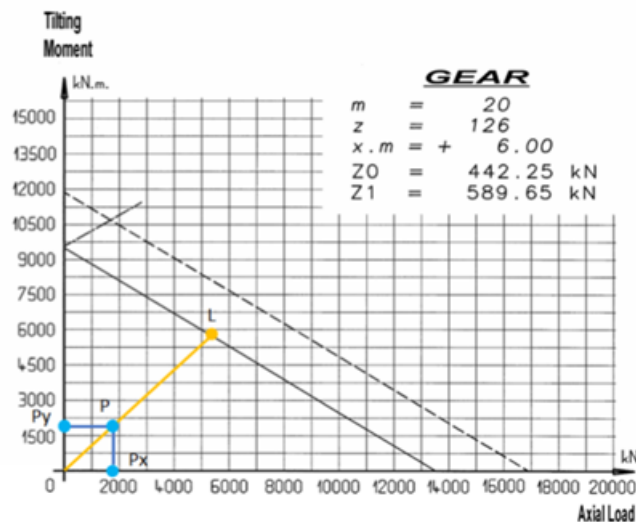
Choix couronne : 07-2810-09	
Dext [mm] =	3020
Dint [mm] =	2495
e [mm] =	158
m =	20
z =	126
Poids [kg] =	2155

Dimensions et caractéristiques de la couronne



Estimated Weight : 2154. kg

Le calcul des efforts se fait en suivant la procédure ROLLIX. En fonction de la couronne choisit et des efforts en entrée, des coefficients sont instaurés. Un effort équivalent est calculé ; en fonction des efforts axiaux, radiaux et du moment de renversement, afin de vérifier la tenue de la couronne. Ces calculs sont disponibles dans le premier encart nommé « Catalogue ROLLIX ». Pour chaque couronne, un graphique illustrant les différentes capacités de chargement est associé. Il nous renseigne sur d'autres caractéristiques de la couronne et nous permet surtout de valider la tenue des efforts.



Courbes de capacité pour la couronne 07-2810-09

P_x et P_y correspondent respectivement à l'effort F_{eq} et au moment de renversement. Pour la tenue des efforts, il faut que le point P soit en dessous de la courbe. Dans notre cas, P est bien en dessous de la courbe. Le rapport OL/OP est calculé afin de déterminer le K_t , qui nous permettra de déterminer la durée de vie. Dans notre cas, $K_t = 3$. La durée de vie est estimée à 11 ans pour une rotation en continue, ce qui est très satisfaisant.

Concernant la fonction fixation, le catalogue ROLLIX nous conseille fortement l'utilisation de rondelles avec ce type de couronne ainsi que l'utilisation de vis de classe 10.9. Un calcul du nombre de vis est proposé. Dans notre cas, la couronne est surdimensionnée en effort vu que c'est la taille qui est dimensionnante. De ce fait, le calcul n'est pas représentatif puisqu'il donne un $N = 1,57$. Nous avons donc choisi d'utiliser 60 vis de 10.9. Le détail des calculs est disponible dans l'encart « fonction fixation ».

Nous avons effectué un calcul du matage car le mât est confectionné en acier Corten, avec un R_e plus faible qu'un acier normal. L'encart « vérif matage » résume ce calcul. Comme le résultat n'est pas satisfaisant, nous avons décidé d'interposer de grande rondelle en acier dur entre le mât et la couronne afin d'absorber les efforts. Ces rondelles seront segmentées en quart, réalisés par usinage sur de grandes plaques d'acier. Leur dimensionnement est disponible dans l'encart « Dim rondelle par segment »

Enfin, dans l'encart « couple moteur » et « choix moteur », on retrouve le calcul ROLLIX pour l'effort nécessaire à la rotation ainsi que le dimensionnement du moteur en fonction du rapport de réduction, du couple nécessaire et de la vitesse de rotation de la nacelle. Finalement, nous choisissons un moteur électrique de 7500 N.m afin d'assurer la rotation. C'est le moteur de référence « RPR065DC » issu du catalogue *Yaw and pitch drive* du fabricant Brevini.

B. Nacelle

1. Vérin hydraulique

Pour faciliter l'accès à la nacelle pour le montage et le démontage des différents composants, il est primordial que la nacelle puisse s'ouvrir. Cette ouverture de nacelle est assurée à l'aide d'un vérin hydraulique.

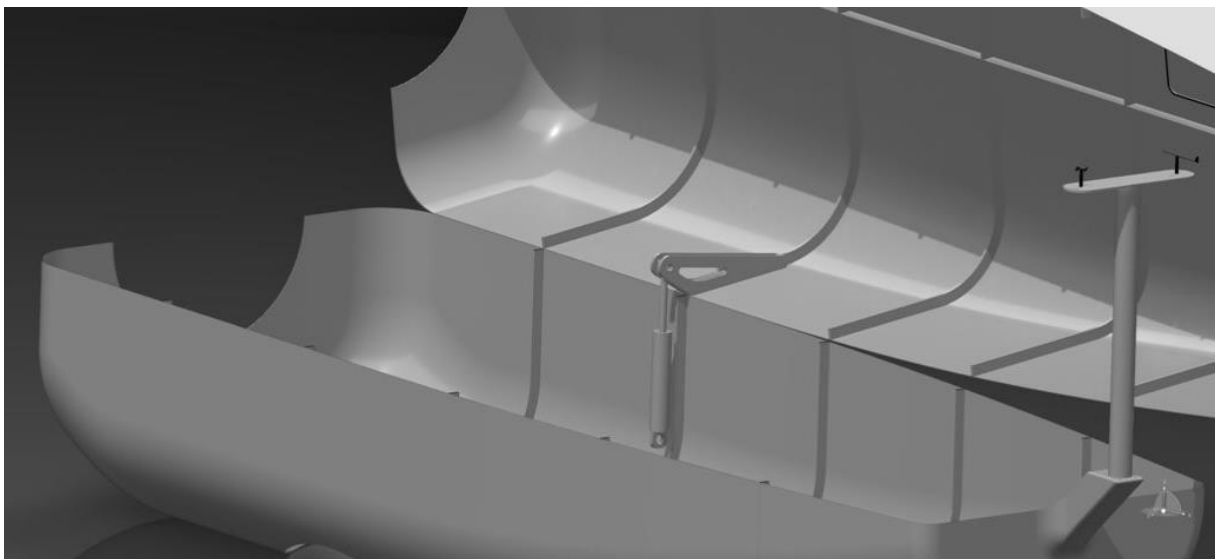


Figure 1 : Ouverture de la nacelle

Le choix du vérin hydraulique est basé sur deux critères :

- L'encombrement :

- Une course de 80 cm
 - Une tige de longueur maximale de 1,50 m
- La capacité : Nous avons calculé la force nécessaire pour ouvrir la nacelle. Il faut que le vérin soit capable de soulever une masse de 15 tonnes.

A partir de ces contraintes, nous avons pu faire le choix d'un vérin hydraulique ENERPAC RR_5032¹ qui est capable de fournir une force de 30 tonnes, donc nous avons un coefficient de 2.

2. Palier

Pour assurer une liaison pivot entre les deux demi-nacelle, nous ajoutons deux pièces intermédiaires, qui s'agissent des paliers lisses en bronze encastrées à la demi-nacelle fixe par une liaison par frettage. Le choix des paliers est fait par rapport à ses dimensions : un diamètre de $d=50$ mm et une longueur de $L=40$ mm².



Figures 2 : Palier lisse

C. Rotor

1. Choix des pales :

Pour choisir nos pales, nous avons commencé par déterminer la surface du disque éolien : la surface balayée par les pales de l'éolienne en vue de la puissance électrique que doit fournir une éolienne de type 2 et le coefficient de puissance C_p :

$$S = \frac{2 * (P_{elec} * 1000)}{C_{pmax} * \rho * V^3 * \eta}$$

A partir de cette valeur de surface, nous pouvons donc déterminer le rayon de ce disque : on trouve $r=27,911$ m, donc on choisit une pale de 28m.

¹ RR_5032 du catalogue <https://shop.faure-technologies.com/fr/rr3014-verin-double-effet-a-grande-course-capacite-30-tonnes-course-368-mm>

²https://www.norelem.fr/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/fr/23/23760_Datasheet_16522_Palier_lisse_cylindrique_bronze_fritt_-fr.pdf



2. Couronne d'orientation du pitch

La liaison Pitch permet de diminuer la vitesse de rotation du rotor ou le freiner en cas d'urgence. La pale est montée sur le moyeu par l'intermédiaire d'une couronne d'orientation à denture intérieure (**Rollix 07-1830-04**). Sa bague extérieure est encastrée au moyeu, et sa bague intérieure est liée à la pale par une liaison boulonnée. Elle a été choisie à l'aide du catalogue ROLLIX en fonction de son diamètre boulonné.

Par la suite, nous avons fait une vérification des efforts sur la couronne. Nous avons calculé l'effort normal sur la couronne provenant du couple moteur généré par la pale, et l'effort normal sur la couronne généré par l'effort de flexion de la pale. Nous ajoutons cela à la force centripète de la pale, on trouve un effort de 1 163 217N.

Cet effort est largement majoré pour plusieurs raisons :

- Premièrement, les efforts générés par les couples moteurs et la flexion de la pale s'exercent en réalité aux deux opposés de la périphérie de la couronne sous forme d'une traction d'un côté et d'une compression à l'opposé de la périphérie. Donc on pourrait donc quasiment diviser ces deux valeurs par deux.
- Deuxièmement, l'effort centripète est un effort de traction uniforme sur toute la périphérie de la couronne donc cela peut compenser une partie des efforts de compression liés aux moments de torsion et le moment moteur de la pale.

On place le point qui correspond à la valeur d'effort calculée et le moment fléchissant sur le graphe de vérification des efforts. On trouve qu'on est au de dessous de la courbe limite présentée en rouge, donc notre couronne est surdimensionnée.

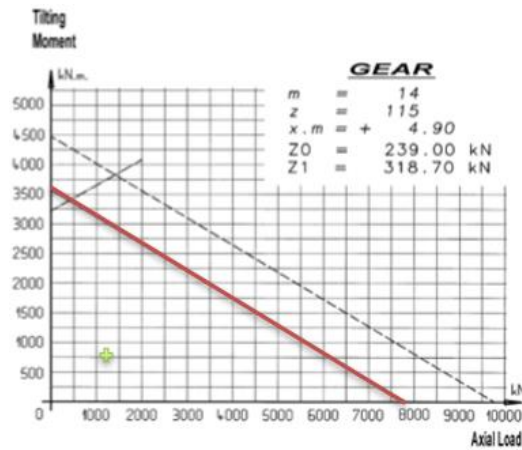
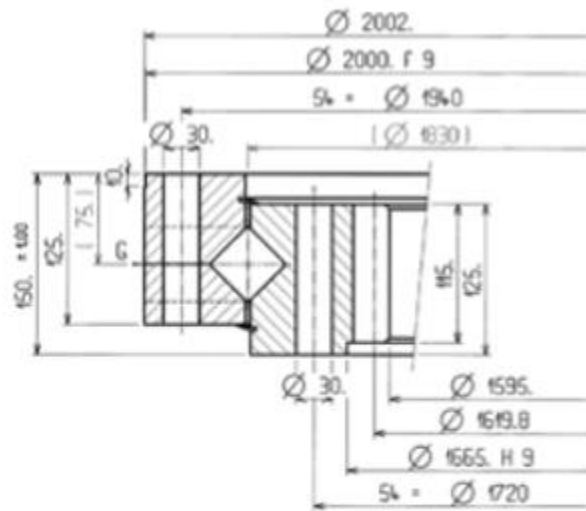


Figure 1 Graphe de vérification des efforts



Estimated Weight : 951. kg

Figure 2 couronne d'orientation Rollix 07-1830-04

3. Moteur du pitch

La rotation de la pale selon son axe est assurée par un moteur électrique. Pour déterminer le couple nécessaire pour entrainer le pitch, on s'est mis dans un cas où la vitesse peut varier entre 15 m/s et 25 m/s selon les trois types d'éoliennes présentées dans le tableau ci-dessous :

Vent [m/s]	Couple [N.m]
15	1611
20	2864
25	4475

Donc d'après les résultats du tableau et à l'aide du catalogue du fabricant, on peut choisir le moteur de type **Brevini RPR065DC** qui peut offrir un couple de 7500 N.m.



Moteur : Brevini RPR065DC

D. Multiplicateur

Le style des dents :

Pour la transmission de puissance entre les différents éléments du multiplicateur, nous avons choisi de mettre en place des roues dentées avec des dentures droites, car nos arbres de transmissions ont des axes parallèles. Ce type de dents est le plus simple et le plus économique en terme des coûts d'usinage. Cette forme de dents peut être obtenue par taillage avec un outil crémaillère.

E. Transmission

L'arbre de transmission :

La mise en forme de l'arbre de transmission sera faite avec du forgeage libre, par déformation plastique à chaud d'un lingot. Ce procédé permet de gagner de la matière et réduire de temps d'usinage, ainsi qu'il assure une amélioration des caractéristiques mécaniques du métal. La finition de l'arbre de transmission est faite par tournage avec un tour de grandes dimensions.

VI. Rapport Qualité, Sécurité et Environnement

A. Principes, normes et conformités du produit fabriqué

1. Prise en compte de la norme sur les aérogénérateurs – Etude de la norme Allemande

L'étape d'initialisation du projet éolien a consisté à étudier les normes existantes à propos des aérogénérateurs éoliens. Nous en avons plusieurs à disposition et nous avons choisi d'étudier la norme Allemande plutôt que les autres. Cette dernière étant assez complète et prenant elle-même d'autres normes en référence nous avons jugé pertinent de nous fier à celle-ci. La suite de cette partie sera donc un résumé des informations pertinentes que nous avons pu extraire de cette norme. Nous nous servirons ainsi de ces informations comme amorce du projet.

2. Principe de base pour la conception

- Obligation de la possession d'une certification pour les aérogénérateurs :

En effet, nous allons devoir respecter une norme précise, dans notre cas la norme Allemande, pour notre aérogénérateur qui devra être certifié. Le but est de garantir un fonctionnement sûr et économique pendant toute sa durée de vie.

- Doit être capable de résister aux cas de charges spécifiques imposées :

Dans la documentation nous avons pu relever les charges auxquelles l'éolienne sera soumise dans sa vie, les déformations ainsi que les contraintes. Il nous faudra identifier clairement les cas de charges maximums. Nous devons également faire en sorte que les différents éléments résistent aux charges durant leur fabrication.

Tous les composants faisant état d'une défaillance mineur ne devront pas engendrer des dégâts plus conséquents.

3. Systèmes de sécurité, dispositif de protection et surveillance

- L'éolienne doit être composée d'un système de commande ainsi que d'un système de sécurité.
- Le système de commande permet de contrôler l'éolienne, il doit maintenir l'éolienne dans son cadre de fonctionnement normal contrairement au système de sécurité qui intervient lorsqu'une valeur limite est dépassée.
- L'éolienne doit impérativement comporter un certain nombre de composants permettant d'assurer le fonctionnement en toute sécurité.

La norme indique qu'il est indispensable d'avoir deux systèmes de freinage et de constamment vérifier que l'éolienne possède l'énergie nécessaire pour au moins un freinage d'urgence. Le système de freinage doit être conçu de manière qu'il reste opérationnel si l'alimentation externe échoue. Au moins un système de freinage doit fonctionner sur un système d'aérodynamisme.

- Pour la surveillance de l'éolienne, il est imposé par la norme d'utiliser un certain nombre de capteurs afin d'assurer un guidage en temps réel de l'éolienne.

Ces informations doivent permettre de réaliser un algorithme de traitement de données exigé dans le cahier des charges.

4. Exigences pour les fabricants, gestion de la qualité, matériaux et production :

- Les fabricants doivent pouvoir être vérifiés avec un document prouvant la qualité et la certification. Ils doivent avoir des installations et des équipements adaptés et du personnel compétent.
- Chaque matériau utilisé doit être clairement nommé dans chaque document officiel afin d'assurer sa traçabilité, et avoir des caractéristiques adaptées à l'utilisation.
- La protection anti-corrosion est à prendre en compte, que ce soit sur le mât ou les composants mécaniques et électriques.
- On estime qu'il faudra remplacer un composant corrodé, on assume donc une absence de corrosion pour les calculs en fatigue.
- Il faudra éviter les poches d'eau et de la condensation dans la conception.

5. Hypothèses de chargement :

- La structure doit résister aux conditions environnementales moyenne mais aussi à des conditions exceptionnelles. Il existe donc différents modèles de vent leur configuration sont exprimés.
- Il est donc demandé de prendre en compte des profils de vent dit « normal » (NWP) et des modèles de « turbulence normale » (NTM).
- Il faut faire attention à prendre en compte des changements aléatoires de la vitesse du vent sur la zone balayée par le rotor car cela peut avoir un effet considérable sur la résistance à la fatigue.
- Il faudra également prendre en compte des modèles de turbulences tridimensionnelles qui prennent en compte tous les composants de la vitesse du vent.
- Les modèles de vent extrême (EWM) seront basés sur des vitesses de référence par rapport à la catégorie de l'éolienne.
- D'autres modèles notamment sur la présence de rafales, de changement de direction, et de cisaillement de vent dans des conditions extrêmes seront à prendre en compte.
- Il faudra considérer aussi les cycles de démarrage et d'arrêt du système sur une année avec 1000 procédures de démarrage et d'arrêt pour un vent à V_{in} , 50 pour un vent à V_r , et 50 pour un vent à V_{out} .

6. Analyses de forces

- La partie décernée aux analyses de forces dans la norme Allemande étudiée contient de précieuses informations concernant les méthodes de calculs à utiliser (contraintes, dynamique, quasi-statiques).
- Elle contient également de précieux documents permettant de vérifier les états limites ultimes et de service de chacun des composants de l'éolienne.
- Elle précise l'analyse de force avec la méthode des éléments finis.
- Elle détaille également certaines informations concernant la résistance des matériaux de l'éolienne tels que des facteurs de sécurité.

7. Structures

- La nacelle devra avoir un système de protection contre la foudre.
- La structure devra résister aux tremblements de terre.

8. Mât

- Le mât doit répondre à des critères précis, la flèche de celui-ci ne doit pas dépasser 5mm par mètres de hauteurs de mât.
- Nous devons prendre en compte dans notre étude les vibrations, avec une fréquence naturelle 20% supérieure à celle des pâles.
- L'épaisseur du mât doit être égale à au moins 1/20 du rayon de celui-ci, et divisé en plusieurs tronçons de 20 à 30m pour assurer la transportabilité en camion.
- La durabilité du mât est une priorité absolue car son entretien sera séparé par de longs intervalles de temps.

9. Composants de machines

- Il est indispensable de fournir un ensemble de documents tels que les dessins techniques des éléments importants de l'éolienne au format standard.
- Il nous faudra également réfléchir aux moyens de transport des pièces ainsi que le montage de l'éolienne.
- La norme nous donne des informations précises concernant certains systèmes tels que le système de tangage des pâles, les roulements, le réducteur, les freins mécaniques et le dispositif de verrouillage. Pour chacun de ces composants, la norme nous fournit les efforts à appliquer, les documents à fournir ainsi que les facteurs de sécurité à prendre en compte. Elle sera donc indispensable pour la réalisation de certains calculs.

10. Prévention des risques

- La température intérieure de la tour doit être à 20°C pour le confort et la sécurité. Pour cela, la nacelle doit avoir une isolation thermique. Les surfaces accessibles pouvant provoquer des brûlures doivent être protégées et un système de ventilation peut être mis en place.
- L'ascension du mât se fait via un élévateur pour limiter les troubles physiologiques. Un élévateur peut être fixé à l'extérieur pour les besoins de nettoyage et de maintenance. L'échelle est présente pour pallier toute panne d'élévateurs.
- Les outils et les pièces seront montés grâce à un palan.
- Dans la nacelle, le plancher doit être de plain-pied, éviter les enjambements, et permettre l'accès au matériel. Un dispositif de sécurité auquel s'attache l'opérateur, la ligne de vie, doit suivre le sens de déplacement et être fixé au niveau des trappes d'accès. Ces trappes étant une sortie de secours, elles doivent pouvoir être ouvertes dans les deux sens par une personne seule.
- L'entretien est assuré par deux personnes travaillant ensemble.
- Il faudra un extincteur dans la nacelle et un deuxième s'il y a une quantité importante de combustible. Ils seront placés des deux côtés de la turbine.

11. La certification de nos produits

Afin de certifier la conformité de nos produits fabriqués, vendus et livrés nous savons que nous devons nous plier à certaines règles. C'est notamment pourquoi nous avons pris la décision de nous référer à la norme allemande concernant les aérogénérateurs. Pour nous assurer de la conformité de nos produits nous cherchons à obtenir la certification CE de nos produits. Le marquage CE indique qu'un produit a été évalué par le fabricant et qu'il a été jugé conforme aux exigences de l'UE en matière de sécurité, de santé mais aussi de protection de l'environnement. C'est là tout l'intérêt de mener une démarche QSE tout au long de la durée de vie de ce projet, du berceau à la tombe.

Pour obtenir la certification CE et garantir la conformité de nos produits nous avons décidé de :

- Nous plier à toutes les exigences, importantes et applicables à notre cas, citées dans la norme allemande sur les aérogénérateurs. La norme étant un document officiel, sourcé, traçable et de référence, nous pouvons nous fier aux informations relatives à ce dernier.
- De déterminer nous même dans la mesure du possible de la conformité de nos composants et de se fier aux conformités déjà établies sur les produits importés ou services utilisés.
- Préparer toute la documentation technique avant la mise en place sur le marché.
- Veiller à ce que toute la documentation technique soit accessible aux autorités de contrôle et de surveillance dès la mise en place sur le marché. Nous devons également veiller à ce que toute la sauvegarde de la documentation technique soit stocké à un emplacement connu.
- Faire en sorte de conserver la documentation technique pendant au moins 10 ans à compter de la date de mise en place sur le marché.

- Veiller à ce que la documentation technique contienne les noms et adresses de tous les représentants.
- Veiller à ce que la documentation technique contienne une description succincte du produit.
- Veiller à l'identification du produit (numéro de série par exemple).
- Veiller à ce que la documentation technique contienne les noms et adresses des établissements participants à la conception et à la fabrication du produit.
- Veiller à ce que le nom et l'adresse de l'organisme de certification soit notifié si certains composants sont évalués en externe.
- Veiller à ce que tous les processus de travaux, fabrications, montage, maintenance et utilisation soit certifiés et conformes.
- Veiller à ce que les résultats des essais soient certifiés, disponibles, sourcés et traçables.
- Veiller à ce que tous les risques soient connus, informés et indiqués dans la documentation et signalisé sur le poste de travail.
- Veiller à ce qu'un document permettant d'assumer l'entière responsabilité en cas de problèmes allant à l'encontre de la conformité du produit soit prise. Un tel document doit être disponible en libre consultation.

B. Etude des défaillances et des risques

1. Le QSE

La Qualité Sécurité et Environnement est une partie importante d'un projet qui permet de prévenir l'ensemble des risques industriels. Il vise à assurer le respect des normes vis-à-vis du produit (la qualité du produit), la prise en compte des enjeux humains, sociaux, économiques et juridiques ainsi que l'étude des impacts environnementaux du produit.

Afin d'exécuter correctement la démarche QSE nous avons utilisé tout au long de ce projet divers outils. Cette partie sera donc consacrée à l'étude, la présentation et les résultats des outils que nous avons utilisés.

2. L'outil AMDEC

L'outil d'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et de leur criticité (AMDEC) est un outil très important pour l'étude de la qualité, de la sécurité et de l'environnement de notre projet. Pour résumer rapidement l'intérêt de cet outil nous pouvons dire qu'il consiste en la prédiction et l'anticipation de certaines défaillances. Ces défaillances sont ensuite argumentées par leur provenance probable et leurs effets. Nous cherchons à évaluer dans un premier temps la défaillance par trois critères principaux : la criticité, l'occurrence et la détectabilité.

- L'occurrence permet de juger de la répétabilité de ces défaillances, c'est-à-dire leur capacité à resurgir pendant la durée de vie de notre projet.
- La détectabilité permet de juger la capacité qu'à un observateur à se rendre compte de la défaillance.

- La criticité permet de juger de l'importance du mode de défaillance, c'est-à-dire de l'évaluation quantitative de son impact humain, matériel ou environnemental.

Une fois les modes de défaillance évalués nous cherchons à trouver des solutions à ces problèmes en proposant des solutions techniques, technologiques, humaines, etc. Parmi cette liste de solution nous en sélectionnons quelques-unes et nous les appliquons. Afin de choisir les meilleures solutions de manière la plus objective possible il est important d'évoquer ces dernières lors des réunions d'entreprise. Cela nous permet d'avoir un avis global de l'équipe, divers avis et de prendre ensuite du recul pour être le plus objectif possible. De plus, il est important de communiquer avec les équipes chargées de la conception pour leur permettre d'anticiper ces solutions et de les prendre en compte dans leur travail.

Finalement, une fois la ou les solution(s) choisie(s) nous réévaluons le mode de défaillance en prenant compte de l'effet de ces solutions de manière objective pour remarquer si notre solution est pertinente.

Nous avons donc construit ce que l'on appelle des matrices d'occurrence, de détectabilité et de criticité. Ces matrices permettent, d'un niveau allant de 1 à 10, de noter ces modes de défaillances les uns en fonction des autres.

a) *La matrice d'occurrence*

Occurrence		
Niveau de gravité	Echelle	Définition
1	Improbable	Défaillance jamais rencontrée
2	Très peu probable	Défaillance pouvant survenir une fois en plusieurs années
3	Peu probable	Défaillance pouvant survenir une fois par an
4	Très rare	Défaillance pouvant survenir plusieurs fois par an
5	Rare	Défaillance pouvant survenir une fois par mois
6	Probable	Défaillance pouvant survenir plusieurs fois par mois
7	Courant	Défaillance pouvant survenir plusieurs fois par semaine
8	Régulier	Défaillance pouvant survenir tous les jours
9	Innévitable	Défaillance pouvant survenir plusieurs fois par jour
10	Omniprésent	Défaillance pouvant survenir à tout moment

La matrice d'occurrence

Détectabilité		
Niveau de gravité	Echelle	Définition
1	Evidente	La défaillance est évidente et ne nécessite aucun moyen de détection
2	Très facile	La défaillance est très aisée à détecter et ne demande pas de vigilance particulière
3	Moyennement Facile	La défaillance est aisée à détecter et ne nécessite pas de moyen de détection particulier
4	Facile	La défaillance est aisée à détecter mais demande tout de même d'être vigilant
5	Moyenne	La détection de la défaillance n'est pas évidente mais le matériel ou l'opérateur suffisent à sa détection
6	Peu difficile	La détection de la défaillance peu poser problème à l'opérateur s'il n'est pas attentif
7	Moyennement Difficile	La détection de la défaillance pose problème au matériel ou à l'opérateur malgré son attention
8	Difficile	Il est peu probable que la défaillance soit détectée par le matériel ou l'opérateur
9	Très difficile	Il est très peu probable que la défaillance soit détectée par le matériel ou l'opérateur.
10	Indétectable	La défaillance est indétectable par l'opérateur.

La matrice de détectabilité

b) La matrice de gravité :

Gravité			
Niveau de gravité	Echelle	Impact sur les biens matériels	Impact sur la sécurité des personnes
1	Très faible	La défaillance peu avoir un impact sur le matériel si elle est répétée un grand nombre de fois.	
2	Moyennement Faible	La défaillance peu avoir un impact sur le matériel si elle survient quelques fois.	
3	Faible	La défaillance a un impact minime sur le matériel n'altérant pas son fonctionnement.	
4	Peu Faible	La défaillance a un impact pouvant altérer le fonctionnement du matériel sur le long terme.	
5	Moyenne	La défaillance peut altérer le fonctionnement du matériel a court terme, il fonctionne en mode dégradé.	
6	Peu Grave	La défaillance altère le fonctionnement du matériel qui nécessite une maintenance (dommage réversible).	Blessure ou symptômes bénins Pas ou peu de dommages sans arrêt de travail
7	Moyennement Grave	La défaillance détruit un bien matériel utile au fonctionnement mais aisément remplaçable.	Blessure ou symptômes demandant des soins médicaux sans arrêt de travail
8	Grave	La défaillance détruit un bien matériel utile au fonctionnement et difficilement remplaçable.	Blessure ou maladie provoquant un arrêt de travail court Dommages réversibles entraînant une incapacité partielle ou permanente
9	Très grave	La défaillance détruit un bien matériel (dommage irréversible) nécessaire au fonctionnement impliquant un arrêt partiel.	Blessure ou maladie provoquant un arrêt de travail prolongé Dommages réversibles entraînant une incapacité partielle ou permanente
10	Catastrophique	La défaillance détruit un bien matériel (dommage irréversible) indispensable au fonctionnement et conduit à un arrêt total et définitif.	Blessure ou maladie mortelle

La matrice de gravité

Afin d'évaluer de la manière la plus objective possible ces matrices, nous avons été plusieurs à donner notre avis sur ces matrices. Une fois la convergence atteinte des différents avis de ces matrices nous jugions ces dernières pertinentes.

Nous pouvons voir également que la matrice de gravité comporte deux colonnes car elle prend en compte l'aspect humain de la gravité de la situation étudiée. Celle-ci commence son évaluation à partir d'une note de 6/10 car nous pensons qu'un impact humain est automatiquement plus grave qu'un impact matériel.

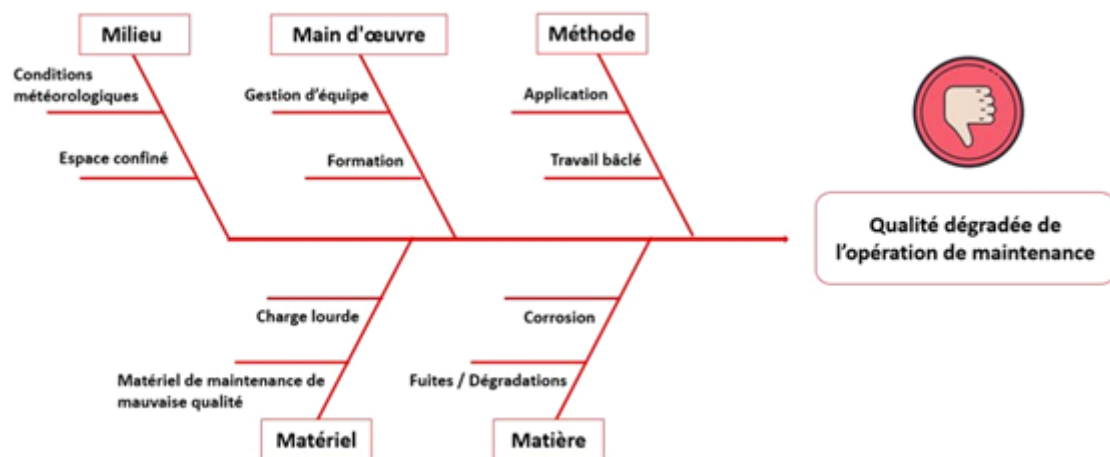
3. La méthode des 5M

La méthode des 6M s'est avérée très efficace dans l'évaluation des causes et effets. Cette méthode se présente sous la forme d'un diagramme ressemblant à une arête de poisson. Cette méthode nous a principalement servi pour évaluer les provenances et les causes des modes de défaillances que nous injecterons directement dans l'outil AMDEC.

Les 6M définissent :

- **Main d'œuvre** : La source de la défaillance provient directement de la main d'œuvre, c'est-à-dire que la contrainte étudiée serait causée par une erreur humaine, mais la question qui se soulève est pourquoi le personnel compétent n'a pas été à la hauteur ?
- **Machines/Matériel** : La source de la défaillance serait causée par un problème technologique ou d'outillage.
- **Matière** : La source de la défaillance proviendrait directement de la matière, c'est-à-dire à cause des propriétés d'un matériau qui ne serait pas adapté à la situation.
- **Méthodes** : La source de la défaillance proviendrait directement de la méthode d'utilisation, d'applicabilité ou de fonctionnement du système ou de la tâche. La méthodologie aurait une incidence directe sur le résultat d'une action.
- **Milieu** : La source de la défaillance proviendrait directement du milieu environnant, elle serait de source naturelle comme la température, l'humidité, la foudre, etc.
- **Mesure** : La source de la défaillance proviendrait directement de la mesure d'une valeur comme l'étalonnage ou encore la lisibilité des résultats.

Dans notre projet d'étude nous utiliserons une méthode 5M en s'affranchissant du dernier M : la mesure. Nous considérons que l'onglet de la mesure rentre dans le cadre du M de machines.



Exemple de la méthode des 5M dans le cas de la qualité dégradée d'une opération de maintenance

Pour examiner rapidement le cas présenté ci-dessus nous pouvons voir que la qualité dégradée d'une opération de maintenance peut provenir de tous les horizons. Dans un premier temps le milieu peut avoir son influence si les conditions météorologiques ne sont pas adaptées le personnel chargé de la maintenance pourrait être amené à effectuer sa tâche dans de mauvaises conditions et donc ne pas remplir son objectif correctement. De même, si le personnel est mal formé alors les dégâts seraient répercutés sur la main d'œuvre et donc une maintenance de faible qualité. Au niveau de la méthode si le travail est tout simplement bâclé alors la maintenance serait à réitérer. La matière joue aussi son rôle, admettons que notre agent de maintenance est à faire avec des composants corrodés alors la maintenance pourrait être dégradée face aux attentes. Enfin, si le matériel de maintenance est de mauvaise qualité ou tout simplement dégradée alors la maintenance serait automatiquement affectée.

Ainsi nous pouvons voir qu'il est intéressant d'utiliser cet outil pour déterminer les provenances de la défaillance évaluée et permet également d'identifier rapidement quel facteur pourrait apparaître le plus souvent.

Vous pouvez retrouver l'ensemble des modes de défaillances les plus critiques qui ont été évalués avec la méthode 5M en annexes.

4. Présentation des résultats

Tout au long de ce projet nous avons eu l'occasion de mettre en place un certain nombre d'AMDEC concernant les grands axes de notre projet que ce soit l'utilisation, le processus de montage ou encore la maintenance de notre éolienne. Nous allons consacrer dans cette partie la présentation des résultats des modes qui se sont révélés être les plus critiques.

Vous pouvez évidemment consulter l'ensemble des AMDECs dans le dossier QSE fournit.

a) L'AMDEC Fiabilité

L'AMDEC Fiabilité s'est construit dans l'idée d'anticiper d'éventuelles actions à prendre en compte dans notre processus de conception pour éviter l'insatisfaction du client. Afin de construire ce dernier nous avons revu les points les plus critiques associés aux livrables du projet.

Durée de vie non respectée	Pertes pour le client Cahier des charges non respecté	Structure sous-dimensionnée	5	5	6	150
----------------------------	--	-----------------------------	---	---	---	-----

Explication : En effet, le mode de défaillance le plus critique reste celui où le produit n'aurait pas une durée de vie conforme au cahier des charges. Cela causerait beaucoup de problèmes car il faudrait remplacer l'éolienne devenue inutilisable et ne respectant pas les normes de sécurité en vigueur.

La ductibilité reçoit une note de 5 tout simplement car l'évaluation de la durée de vie de nos éléments étant censés être déjà dimensionnés il resterait difficile de déterminer rapidement la durée de vie restante de notre éolienne.

Nous avons choisi d'évaluer l'occurrence à 5 pour éviter de sous-évaluer la défaillance. Même si nos produits respecteront le cahier des charges et seront fournis avec un document officiel de conformité il est possible que nos équipes aient sous-estimés certains éléments ou tout simplement que notre produit n'est pas à l'abri d'éventuels imprévus.

Enfin la gravité s'élève à 8 tout simplement parce que dans le cas où notre produit ne respecte pas le cahier des charges nous devrions changer l'éolienne aux frais de l'entreprise. Notre produit étant sous contrat mais également sous document de conformité nous sommes obligés d'assurer à la fois sa maintenance mais sa qualité de fonctionnement durant sa durée de vie.

Vérification de la longévité des éléments du système éolien	Prise en compte systématique d'un critère de longévité dans la conception de chaque élément du système éolien	5	2	8	80
---	---	---	---	---	----

Il est donc nécessaire d'éviter à tout prix ce type de défaillance. Pour cela nous choisissons de vérifier systématiquement la longévité de nos éléments en dimensionnant ces derniers par des logiciels de conception mais également des études plus poussées par éléments finis. En effectuant des analyses numériques nous pouvons nous assurer en amont que nos éléments respecteront la durée de vie prévue. De même en gardant une trace de ces analyses nous pourrions valider avec certitude nos documents de conformité.

Finalement, après réévaluation du mode de défaillance nous abaissons uniquement l'occurrence du mode de défaillance. La détectabilité reste la même car le problème reste lui aussi le même et sa difficulté à être détectée est donc inchangée. La gravité reste également la même car les enjeux de cette défaillance sont les mêmes. Enfin, l'occurrence se voit largement abaissée, les logiciels de conception et de dimensionnement utilisés dans le cadre de notre projet sont considérés fiables. Nous faisons donc confiance aux résultats obtenus tout en appliquant un coefficient de sécurité à ces résultats afin de garder un œil critique.

b) L'AMDEC Processus de montage

L'AMDEC associé au processus de montage est divisé en 5 grandes catégories. Dans un premier temps l'assemblage du mât puis de la nacelle, des pâles sur le moyeu, du cône sur le moyeu et enfin l'assemblage du rotor sur l'éolienne.

Dans chacune de ces étapes nous retrouvons à chaque fois le même mode de défaillance qui s'avère être le plus critique, il s'agit de l'exposition sonore.

Exposition sonore	Impact sur la santé	Conditions d'assemblage bruyantes Engins de chantier bruyants	4	8	7	224
-------------------	---------------------	--	---	---	---	-----

Extrait de l'AMDEC Processus de montage – Exposition sonore

Explication : Nous savons que sur un chantier les expositions sonores sont souvent importantes, dans ce cas-là et sans solutions envisagées les impacts sur la santé de nos ouvriers

peuvent être mis en jeu. En effet, l'assemblage d'une éolienne se base sur des éléments avec des volumes importants et des masses importantes faisant intervenir des engins de chantiers en conséquence et donc rapidement très bruyant.

Expliquons maintenant rapidement notre justification de la notation. Du côté détectabilité nous pensons que le facteur bruit est un phénomène très rapidement remarquable tout simplement parce que l'exposition sonore est quelque chose qui se va se démarquer bien plus distinctement que la corrosion d'une vis par exemple. Ainsi nous démarquons une notation de 4 correspondants à « la défaillance est aisée à détecter mais il faut tout de même rester vigilant ». L'aspect vigilance vient du fait que l'exposition peut paraître « normale » et rapidement négligé sur un chantier mais il est tout de même important de garder à l'esprit que cela peut impacter la santé des personnes présentes.

Dans un second temps, la note de 8 sur l'occurrence informe que c'est un phénomène très courant sur les chantiers et donc quelque chose de quasi inévitable. Des chantiers de cette ampleur ne se font jamais dans le silence.

Enfin la gravité est notée à 7 car tout simplement un impact humain n'est de base une gravité à prendre à la légère, d'où la notation de la matrice de gravité (aspect humain) commençant à 6. L'exposition sonore est quelque chose pouvant provoquer des dégâts tant à court terme qu'à long terme il est important de maîtriser ce genre de risque.

Finalement, la criticité s'évaluant par le produit des trois critères précédents nous donne une note de 224. Après cette première évaluation nous avons cherché à trouver une liste de solutions envisagées

Mise a disposition d'EPI Campagne de sensibilisation	Mise à dispositon de bouchons d'oreilles et casque anti-bruit	4	6	7	168
---	--	---	---	---	-----

Extrait de l'AMDEC Processus de montage – Exposition sonore

Les premières solutions qui nous sont venues en tête pour palier à ce problème d'exposition sonore incontournable sont la mise en place d'équipements de protection individuelle ainsi que des campagnes des sensibilisation pour faire prendre conscience aux personnes présentes sur place que l'atteinte de leurs systèmes auditifs peuvent être mis en jeu s'ils ne font pas attention.

A l'issue de cette réflexion nous prenons les décisions à réellement mettre en place, l'étape d'avant étant « théorique ». Nous avons donc décidé de mettre à disposition directement sur les chantiers techniques des bouchons d'oreilles et casque anti-bruit pour les personnes les plus exposées à l'environnement bruyant.

Finalement, après la mise en place ces solutions nous avons réévalué la criticité de ce mode de défaillance. Dans un premier temps la détectabilité reste la même étant donné qu'un chantier technique ne sera pas plus bruyant parce que nos ouvriers se protèges. Dans un second temps la gravité reste également la même car l'exposition sonore étant un réel danger humain nous ne voyons pas pourquoi l'impact de l'exposition sonore serait amoindrit. Et finalement, à propos de l'occurrence nous avons décidé d'affaiblir la notation de deux crans étant donné que, techniquement, le personnel exposé à l'environnement bruyant est amoindri s'ils protègent leur système auditif, du moins l'impact humain est réduit.

c) L'AMDEC Sécurité

L'AMDEC Sécurité s'est construit essentiellement dans un but de prévenir les défaillances humaines qui pouvaient arriver à n'importe quelle étape de la vie de notre projet du parc éolien. On retrouvera donc dans cet AMDEC des éléments issus lors des étapes d'assemblage mais également de la maintenance ou encore de la phase d'utilisation de notre produit.

Je tiens à vous envoyer vers la partie concernant l'AMDEC maintenance qui traite justement du mode le plus critique à savoir les postures contraignantes d'un agent de maintenance.

Il est donc logique de retrouver plusieurs fois et dans deux AMDECs différents le même mode de défaillance étant donné que les deux sont fortement liés.

d) L'AMDEC Utilisation

L'AMDEC Utilisation s'est construit dans l'idée d'écarter l'onglet « Opération de processus », considérant la phase d'utilisation autonome de notre produit comme une phase unique. Cependant, nous avons pu déterminer, notamment en réunissant certains articles et tableaux récapitulatifs sur internet, les incidents éoliens récurrents français.

TYPE D'ACCIDENT	DATE	NOM DU PARC	DEPARTEMENT	PUISSANCE (en MW)	MISE EN SERVICE	TECHNOLOGIE RECENTE	DESCRIPTION SOMMAIRE DE L'ACCIDENT ET DEGATS	CAUSE PROBABLE DE L'ACCIDENT	SOURCE(S) DE L'INFORMATION	COMMENTAIRE PAR RAPPORT A L'UTILISATION DANS L'ETUDE DE DANGERS
Effondrement	01/02/2002	Wormhout	Nord	0,4	1997	Non	Brûs d'hélice et mât pile	Tempête	Rapport du CGM Site Vent du Bocage	-
Maintenance	01/07/2002	Port la Nouvelle – Sigean	Aude	0,56	2000	Oui	Grave électrisation avec brûtures d'un technicien	Lors de mesures pour caractériser la partie haute d'un transformateur 690V/20kV en tension. Le mètre utilisé par la victime, déroulé sur 1,46m, s'est soudainement pile et est entré dans la zone du transformateur, créant un arc électrique.	Rapport du CGM	Ne concerne pas directement l'étude de dangers (accident sur le personnel de maintenance)
Effondrement	28/12/2002	Neviau - Grande Gamfue	Aude	0,85	2002	Non Gamesa G52 850	Effondrement d'une éolienne suite au dysfonctionnement du système de freinage	Tempête + dysfonctionnement du système de freinage	Base de données ARIA	-
<p>> N°42882 - 28/12/2002 - FRANCE - 11 - NEVIAN Dans un parc de 18 aérogénérateurs en construction, l'une des pales d'une éolienne se détache et entraîne l'effondrement du mât de 40 m. Aucun blessé n'est à déplorer, le technicien supervisant le fonctionnement du parc ne se trouvait pas à proximité. Selon l'exploitant qui n'avait pas encore pris possession de l'installation, une défaillance du système de freinage du rotor serait à l'origine du sinistre. Le vent soufflant à plus de 100 km/h ce jour-là, celui-ci aurait dû bloquer l'hélice.</p>										
Rupture de pale	25/02/2002	Salmès-Limousis	Aude	0,75	1998	Non	Brûs de pale en bois (avec inserts) sur une éolienne bipale	Tempête	Article de presse (La Dépêche du 26/03/2003)	Information peu précise
Rupture de pale	05/11/2003	Salmès-Limousis	Aude	0,75	1998	Non	Brûs de pales en bois (avec inserts) sur trois éoliennes. Morceaux de pales disséminés sur 100 m.	Dysfonctionnement du système de freinage	Rapport du CGM Article de presse (Midi Libre du 15/11/2003)	-
Effondrement	01/01/2004	Le Portel – Boulogne sur Mer	Pas de Calais	0,75	2002	Non Lagerwey	Cassure d'une pale, chute du mât et destruction totale. Une pale tombe sur la plage et les deux autres dérivent sur 8 km.	Tempête	Base de données ARIA	-

Extrait du rapport ECLIO France sur les accidents éoliens – Disponible sur www.somme.gouv.fr

Ce type de document nous a permis de récupérer des informations précieuses influençant nos choix de notation notamment par la récurrence des événements.

Présentons rapidement le mode de défaillance évalué comme étant le plus critique.

Emballlement du rotor	Dégâts importants causés sur le multiplicateur, la génératrice mais également sur tout les systèmes de transmission Risque d'échauffement et d'incendie au niveau de la nacelle Diminution significative de la durée de vie du rotor Vibrations dans le rotor	Défaillance du système de surveillance Défaillance du système d'observation des conditions de vent Réglage de Pitch non adapté aux conditions de vent Dysfonctionnement des systèmes de freinage Défaut d'alignement ou de flexion du rotor Force centrifuge dans le rotor Conditions météorologiques	3	6	8	144
-----------------------	--	---	---	---	---	-----

L'emballement du rotor est un phénomène qui est revenu assez fréquemment lors de nos recherches sur les incidents éoliens en phase d'utilisation. Sa fréquence d'apparition (occurrence) a d'ailleurs été notée en fonction du rapport incident d'emballement de rotor par rapport aux autres incidents d'où la note de 6/10. Dans un second temps, nous avons jugé de la détectabilité de 3/10 pour la simple et bonne raison que lorsque l'un de nos rotors s'emballera, nous serons dans la plupart des cas averti grâce aux nombreux capteurs que possède notre éolienne. Au niveau de la gravité nous avons décidé d'être généreux, dans un premier temps car nous préférons surévaluer un risque plutôt que de le sous-évaluer. Dans un second temps car nous sommes en présence de masses et de volumes importants et couplés avec de l'inertie. Cela peut rapidement devenir problématique si une pale venait à se décrocher ou un incendie au niveau du rotor.

La note finale de cette première évaluation est de 144, ce qui en fait de ce mode de défaillance le plus critique de notre AMDEC Utilisation. Pour prévenir ce risque nous avons définis plusieurs solutions et nous en avons retenu certaines.

Conception d'un système de freinage d'urgence Système de vérification du système d'observation des conditions de vents	Système de retour automatique et passif du système de pitch pour atteindre la position de freinage aérodynamique Système de vérification type température ; vibrations ; défaillance	2	5	8	80
---	---	---	---	---	----

Dans un premier temps le système de Pitch est un élément clé dans la prévention d'un emballement de rotor. Si un vent trop fort venait à compromettre le fonctionnement de l'éolienne alors les pâles tournent sur elles-mêmes pour se mettre en mode drapeau freinant ainsi l'éolienne. Ce dispositif est important et plus exactement indispensable pour assurer une bonne durée de vie à notre produit.

De plus nous avons décidé de mettre en place tout un panel de capteurs de vibrations ou encore de températures permettant de connaître en tous points et tout temps de la situation globale de l'éolienne. Ainsi, si un quelconque incident intervenait, nous serions avertis et pourrions agir.

Finalement, après mise en place de ces dispositifs de sécurité nous avons réévaluer la criticité de ce mode de défaillance. Dans un premier temps la détectabilité se voit abaissée à 2/10. En effet, la mise en place de capteurs permet de rendre les défaillances beaucoup plus visibles. Dans un second

temps l'occurrence se voit également abaissée d'un niveau pour ne pas paraître trop généreux, la mise en place du système de Pitch est une véritable solution technologique viable et qui a déjà prouvé son efficacité sur d'autres projets éoliens.

Finalement la gravité reste la même. Si un tel événement se produit cela pourrait être bénin en partant d'une simple usure des éléments mécaniques abaissant ainsi sa durée de vie mais pourrait rapidement devenir problématique si une pàle se décrocherait ou un incendie déclaré jusqu'à la destruction complète du rotor rendant l'éolienne hors service.

e) *L'AMDEC Maintenance*

Afin de construire correctement l'AMDEC Maintenance nous nous sommes mis dans la peau d'un agent de maintenance et nous nous sommes posé la question : Comment l'opération de maintenance pourrait être compromise. Nous allons voir que dans la plupart des cas si l'opération de maintenance n'est pas assurée pour une quelconque raison c'est dans le cas où la source du problème est humaine. C'est d'ailleurs dans cet aspect-là que le mode de défaillance le plus critique sont les postures contraignantes d'un agent de maintenance.

Posture contraignante d'un agent de maintenance	Arrêt de travail Arrêt immédiat de la tâche en cours Report de la tâche en cours Dégradation potentielle du fonctionnement de l'éolienne Blessure de l'agent de maintenance	Faible qualité de la sécurité au sein de l'éolienne Mauvaise formation sécurité & geste et postures Faible vigilance de la part de l'agent de maintenance Conditions de travail non adaptés	7	10	8	560
---	---	--	---	----	---	-----

Les causes probables des postures contraignantes au travail sont multiples. Tout simplement parce que nous savons que de soulever une charge, qu'elle soit lourde ou non, avec une posture conforme aux gestes et postures n'est pas forcément très naturel et instinctif.

La notation s'est déroulée avec le raisonnement suivant. Premièrement une note de 7/10 concernant la détectabilité. Tout simplement car nos responsables chargés d'assurer les bonnes postures au travail ne sont pas constamment sur le terrain avec nos employés chargés de la maintenance. Finalement, les gestes et postures à appliquer font appel au bon sens et à la volonté de chacun.

Dans un second temps la note de 10/10 pour l'occurrence n'est clairement pas sur évalué. Les mauvaises postures sont des phénomènes qui arrivent tous les jours et dans n'importe quelle corp de métier. En termes de fréquence, sur une seule opération de maintenance, il est possible de retrouver une dizaine voire une vingtaine de mauvaises postures pour un seul agent s'il ne fait pas attention.

Pour finir sur la notation de la gravité nous avons décidé de lui attribuer la note de 8/10. Admettons qu'un employé se blesse à cause de ses mauvaises postures sur une opération de maintenance et se trouve en incapacité totale de travailler. Tout d'abord il faudrait l'évacuer, le mettre en arrêt de travail, reporter évidemment la maintenance qui n'est pas terminée (engendrant possiblement des dégradations supplémentaires à l'éolienne), former potentiellement quelqu'un d'autre. Tout cela prend du temps mais coûte également beaucoup d'argent. La gravité n'est donc clairement pas sous-évaluée.

Formations Affiches sécurités Prime	Formation qualité sécurité Formation gestes & postures Prime de non accident Affichage des fiches préventives bien visibles autour des zones de maintenance	5	8	8	320
---	--	---	---	---	-----

Afin de prévenir ce mode de défaillance, automatiquement, tous nos employés chargés de la maintenance se verront entreprendre une formation qualité sécurité mais également une formation gestes et postures avant de prendre leurs fonctions.

Également, des affiches préventives seront mises en évidence tout autour des zones de maintenance dans notre éolienne. Nous savons que nos employés ne liront pas constamment ces affiches mais simplement l'aspect "tape-à-l'œil" leur permettra de se souvenir de leurs formations et potentiellement leur rappeler les enjeux d'une mauvaise posture au travail sur leur santé.

Nous avons également pensé à mettre en place un système de prime de non-accident. Après quelques recherches nous avons remarqué que cette solution est illégale, nous écartons donc cette démarche de notre processus qualité et sécurité.

Finalement après réévaluation du problème avec les solutions prises en compte dans notre société nous abaissons l'occurrence à de deux points pensant qu'un employé averti est un employé contentieux. Dans un second temps nous avons également abaissé la note au sujet de la détectabilité de deux points car nous pensons qu'avec une certaine régularité dans les formations choisies nous pourrions plus facilement repérer un employé sérieux ou non dans cet aspect-là.

f) *Matrices de criticité*

Pour chaque AMDEC a été réalisé une matrice de criticité permettant d'avoir un visuel sur les modes de défaillances les plus critiques. Ces modes critiques seront par la suite étudiés par l'entreprise afin de déterminer un certain nombre de d'actions préventives pour diminuer le risque.

Occurrence	10	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
	9	9	18	27	36	45	54	63	72	81	90
	8	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
	7	7	14	21	28	35	42	49	56	63	70
	6	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
	5	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
	4	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
	3	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
	2	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
	1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	Gravité										

Matrice de criticité (occurrence/gravité) de l'AMDEC utilisation

La matrice précédente reprend l'ensemble des modes de défaillances qui sont notés de 1 à 11 pour l'AMDEC utilisation. On peut directement voir grâce à cette matrice que dans le cas de l'occurrence par rapport à la gravité, le mode deux serait le plus critique. Ce mode correspond à un emballement du rotor.

Cette matrice doit s'accompagner d'une seconde matrice de criticité qui compare la détectabilité et la gravité.

Vous trouverez l'ensemble des matrices de criticité dans le dossier QSE fournit.

g) Fiche de procédure de maintenance

Afin de nous assurer que la maintenance se fait dans de bonnes conditions, que nos employés ne bâclent pas la tâche ou tout simplement qu'ils n'oublient pas certaines étapes dans l'opération de maintenance nous avons pris soin de rédiger des fiches de procédures. Ces dernières seront répertoriées dans la base de données de l'entreprise et seront obligatoire sur l'opération de maintenance.

Vous pouvez consulter la fiche de procédure associée au changement de l'huile dans le dossier QSE fournit.

L'employé devra donc suivre les étapes indiquées sur sa fiche de procédure et cocher chaque étape lorsqu'elle est validée. Il devra également dater et certifier de la conformité de son opération en signant sa fiche de procédure.

Cela nous permet d'avoir dans un premier temps une forme d'engagement de la part de l'opérateur que la maintenance a été faite conformément aux règles mais également nous permet d'avoir une certaine traçabilité sur qui à effectuer la maintenance, quand et quel type de maintenance.

h) Les actions prises internes et externes à l'entreprise pour garantir une démarche qualité sécurité

La démarche volontaire de notre entreprise visant à mettre en œuvre la qualité et la sécurité tant de nos produits que de notre manière de fonctionner et de travailler nous amène à mettre en place une démarche QSE. Cette démarche s'appuie sur plusieurs champs d'applications et nous allons ici consacrer une partie à vous faire parvenir les différentes solutions que nous allons mettre en place pour assurer des conditions de travail et un produit fini de qualité en toute sécurité.

Dans cette partie nous allons présenter une rapide synthèse sous forme de liste des solutions que nous avons choisies pour entreprendre notre démarche qualité. Ces solutions sont aujourd'hui préventives et donc pensées en amont du lancement réel du projet. Ainsi, cette liste présentera les différentes solutions applicables immédiatement dès le lancement du projet à sa phase d'exécution du projet.

- Chaque éolienne sera munie d'un système de frein aérodynamique autrement appelé le système de Pitch.
- Chaque éolienne présentera un aménagement de sa zone de travail et fera en sorte d'éviter sa proximité avec toute infrastructure industrielle et des habitations.
- Chaque éolienne sera munie d'un système de surveillance à l'aide de capteurs (vibrations, température, défaillance, déracinement, etc). Tous ces capteurs seront reliés à un tableau de

contrôle auquel un agent de surveillance sera assigné pour avertir d'une quelconque défaillance et agir en conséquence.

- Les concepteurs prendront soin en amont à une solution viable, optimisée, sécuritaire et assurera une durée de vie de 30ans.
- Les concepteurs vérifieront la faisabilité de leur produit sur des logiciels adaptés et certifiés.
- Une étude par éléments finis du produit sera indispensable. La documentation liée à cette étude permettra en partie de valider la conformité du produit.
- Le contrôle des huiles sera fait une fois par an.
- Le mât et les pâles seront équipés de témoins permettant un contrôle rapide non quantitatif de leur état de surface.
- Tous les intervenants internes ou externes présents sur un chantier technique ou pour une opération de maintenance quelconque devront être approuvés par des formations qualités, sécurités ainsi que gestes et postures.
- Un budget sera consacré à la mise en place d'affichage préventif pour limiter les risques et sensibiliser les acteurs du parc éolien.
- Les équipements de sécurité doivent être mis à disposition à tous les acteurs du projet éolien.
- Les équipements de sécurité, de contrôle et de maintenance devront être conformes et étalonnés. Un équipement quelconque qui dépasse sa durée de validité, d'étalonnage ou de conformité sera considéré inutilisable tant que l'expertise du matériel n'est pas effectuée et approuvée.
- La démarche qualité comprendra également un engagement des dirigeants dans sa manière manager ses équipes.
- Du matériel de secours et de premiers soins sera mis en place à chaque étage de l'éolienne.
- La zone de travail "proche" de l'éolienne sera aménagée et banalisée pour éviter tout type d'encombrement.
- Les EPI (équipement de protection individuel) sera mis à disposition à chaque acteur du parc éolien.
- Des Algeco seront installés dans l'objectif de stocker le matériel de maintenance de nos agents.
- Nos employés de maintenance travailleront par équipe de deux pour éviter le sentiment d'isolement et pour intervenir en cas de blessure du binôme.
- Une base de données comportant l'ensemble des fiches de procédures pour toutes les opérations de maintenance sera mise en place pour nos agents. Nos agents devront se munir de ces fiches lors de leurs interventions.
- Nos produits posséderont un numéro de série unique.
- Nos produits posséderont un document de conformité unique.
- Notre entreprise fera en sorte d'être certifié ISO 9001 pour son management de la qualité.
- Notre entreprise fera en sorte d'être certifié ISO 14001 pour son management environnemental.
- Notre entreprise respectera la norme la norme allemande sur les aérogénérateurs.
- Nos partenaires fabricants de pièces détachées fourniront avec leur produit finit un document de conformité permettant d'assurer le respect du cahier des charges signé par les deux parties.
- Des études statistiques en vue d'une démarche qualité d'amélioration sera menée en interne sur les modes de défaillances rencontrés lors de la mise en place des premières éoliennes sur le parc éolien sénégalais.
- Le service de contact après-vente (SAV) sera donc mis en place dès l'implantation des premières éoliennes permettant de communiquer avec le client.

- La mise en place d'un palan dans chaque éolienne sera pensée par les concepteurs pour faciliter la montée du matériel de maintenance par nos agents.
- Chaque éolienne se verra attribuée d'un dispositif de protection électrique et paratonnerre.
- Chaque éolienne sera équipée d'un extincteur à chaque étage et notamment dans les zones de maintenance.
- Les concepteurs feront en sorte d'intégrer dans leur travail la mise en place de détrompeurs notamment dans les zones de maintenance.
- Chaque éolienne sera équipée d'une station météo.

C. Estimation des coûts

Nous avons estimé les coûts générés pour la qualité, la sécurité, l'environnement, et la maintenance.

1. La qualité :

Pour contrôler la qualité de nos pièces produites, nous utilisons les pièces de contrôles GO-NO GO, ces pièces présente un moyen rapide, simple et efficace pour vérifier la montabilité des assemblages.

Nous avons fixé un budget de 20 000 EUR.

2. Sécurité :

Nous avons prévu de former nos techniciens de maintenance sur les gestes nécessaire à mettre en place à l'exercice de leurs missions en matière de santé, de sécurité et de conditions de travail. Pour ceci, nous faisons appel à un organisme de formation. Étant une entreprise de moins de 300 salariés, la formation durera 3 jours. Le coût pédagogique est de 361,08 EUR/jour par salarié.

Notre équipe est composé de 4 chefs d'équipe et 36 techniciens qui travaillent en binôme pour éviter l'isolement. La formation coûtera 43 329,6 EUR pour les 40 personnes et pour les 3 jours.

Les risques d'accident de travail existent toujours. Pour minimiser les dégâts provoqués, il est primordial de mettre en place des valises de secours du premier soin dans chaque étage de l'éolienne et dans toutes les éoliennes, cela nous coûtera 342 720 EUR

La présence d'un élévateur de matériels de maintenance est nécessaire pour soulever le matériel jusqu'à la surface de l'éolienne, et éviter que les techniciens prennent des charges lourdes. Donc nous mettons en place des palans pour 600 éoliennes d'un montant totale de 232 560 EUR

Les affiches de sensibilisation à la sécurité au travail est nécessaire dans tous les étages des éoliennes pour rappeler aux techniciens les consignes à suivre dans leur quotidien et leur protéger des différents dangers pour éviter les accidents de travail. Ces affiches vont nous coûter 664 EUR

Dans le cadre de la santé et la sécurité au travail, nous mettons à disposition aux techniciens des équipement de protection individuelle (EPI) pour les protéger contre tous les risques. Les coûts générés pour les 40 techniciens sont :

Harnais : 4428 EUR

Casque de protection : 215 EUR

Lunettes de sécurité : 600 EUR

Chaussures de sécurité :2055.2 EUR

3. Environnement :

Il est primordial de prendre en compte l'aspect environnemental. Pour cela, la plupart des pièces de l'éolienne sont fabriquées avec de l'acier recyclé, que nous allons par la suite recycler dans la fin de la vie de nos pièces. Le coût nécessaire pour recycler 1 tonne métrique de l'acier est de 115 EUR.

Pour protéger l'acier Corten du mât de l'éolienne, il est nécessaire d'arroser l'éolienne. L'objectif est de savoir la quantité de l'eau consommé pour l'arrosage de l'éolienne. Par d'information dans ce sujet, nous avons fait l'analogie avec une voiture :

A haute pression, l'eau consommée pour une voiture est de 0.05L/Kg. Donc pour une éolienne de 193390,10 Kg, la quantité de l'eau consommée est de 9669,5L

L'eau coute 0,352 EUR/L. donc le coût total pour 600 éoliennes est de 2 042 199 EUR

4. Maintenance :

La maintenance est assurée par une équipe de techniciens de 4 chefs d'équipe et 36 techniciens qui travaillent en sein de l'entreprise :

- Les chefs d'équipe sont payées à 1700 EUR/personne Net donc cela coûtera à l'entreprise : 13 600 EUR/mois pour les 4 chefs
- Les techniciens sont payés à 1500 EUR/personne Net cela coûtera à l'entreprise : 108 000/mois pour les 36 techniciens

Donc au total cela nous fait 121600 EUR/mois.

Nous avons prévu de mettre en place un local de stockage des outils de maintenance pour chaque 30 éoliennes, cela nous fait 20 entrepôts dans tout le parc éolien. Le tarif moyen de la construction d'un entrepôt est compris entre 350 et 450 EUR/m² hors taxes. Pour 20 entrepôts de 15 m² cela nous coûtera 135 000 EUR.

D. Analyse environnementale

Nous avons choisi de suivre la méthodes EMAS Easy afin d'être sûr de bien répondre à la norme ISO 14001 ainsi que la norme EMAS. Nous pourrons ainsi avoir une double certification pour notre système de management environnemental et nous assurer que notre projet est dans une démarche respectueuse de l'environnement. Nous suivrons donc les différentes étapes de la méthode EMAS Easy. Certaines de ces étapes ne sont pas détaillées dans le rapport mais sont présentes en annexe (annexe n°1, étapes 1 à 3) car elles concernent des informations générales sur l'entreprise ou le site.

La méthode EMAS Easy propose de réaliser des écocartes pour chaque domaine mais n'ayant pas de site réel, il sera difficile pour nous de réaliser ces écocartes sous le format demandé. Nous détaillerons cependant les risques pour l'environnement pour chaque domaine ainsi que les décisions prises pour limiter ces risques.

1. Consommation d'eau et eaux usées (Etape 4)

Processus de montage :

Le chantier peut avoir un impact direct sur les eaux superficielles ainsi que les eaux souterraines. En effet, la présence des engins de chantier peut augmenter de manière temporaire les matières en suspension dans le réseau hydrographique. Il y également un risque non négligeable de fuites d'huiles ou d'hydrocarbures de moteur d'engins ou des huiles provenant de l'éolienne qui peuvent polluer les eaux superficielles ou s'infiltrer dans les sols et impacter directement la nappe phréatique.

Concernant les terrassements, ils seront peu profonds et n'impacteront pas les eaux souterraines.

Processus d'utilisation :

Le seul risque possible lors de la phase d'utilisation concerne des fuites d'huiles provenant du mât.

Processus de maintenance :

Lors du processus de maintenance, nous sommes également confrontés au risque de déversement d'huile et d'hydrocarbure dû aux voitures ou au déversement d'huile lors de la maintenance. Ce risque est cependant fortement diminué au vu de la faible présence de véhicule sur le site.

Lors de la phase de maintenance, il sera nécessaire de réaliser un nettoyage saisonnier de l'éolienne qui impliquerait une consommation assez importante d'eau douce. En effet, la proximité de la mer implique un risque important de voir apparaître des dépôts de sels sur l'éolienne qui peuvent altérer son fonctionnement. Il est également possible d'avoir à nettoyer des dépôts de sable ou des matières organiques (provenant d'insectes et d'oiseaux). L'utilisation de l'acier Corten nécessite également un arrosage de l'éolienne une fois par mois en cas de sécheresse.

➤ *Actions préventives*

Afin de limiter les risques liés aux huiles et hydrocarbures, une attention particulière sera demandée aux personnes présentes sur le site. En cas de panne d'un véhicule, la réparation ne pourra se faire sur place.

Également, le nettoyage et le traitement de l'éolienne se fera uniquement si nécessaire afin d'éviter une consommation d'eau excessive.

Une maintenance régulière des engins de chantier amoindrit le risque de déversement des huiles. Il est également possible de suivre le taux de matières en suspension dans l'eau afin de s'assurer de ne pas dépasser une certaine limite. Cette mesure peut être faite à l'aide d'un filtre en fibre de verre d'une porosité minimum de 1,5 µm.

➤ *Actions curatives*

En cas de déversement d'huile sur le site, il est possible de d'utiliser la méthode de bioremédiation qui permet de décontaminer le milieu pollué. Il s'agit d'un ensemble de techniques naturelles qui font appel à des organismes (souvent des micro-organismes) et leur capacité naturelle à dégrader les polluants. La technique de bio stimulation semble être une technique appropriée dans notre cas. Elle consiste à ajouter des nutriments au sol afin de stimuler l'activité des populations microbiennes⁶. La

mise en place de cette technique particulière nécessite de laisser le sol à nu et de réaliser des tests préalables sur celui-ci afin de connaître précisément sa composition.

2. Le sol et le stockage (Etape 5)

Ce point ne concerne que le processus de montage de l'éolienne car les autres processus ne nécessitent pas de stockage et n'auront pas d'impact sur le sol.

Les aires de stockage étant éphémères, elles ne sont pas bétonnées mais disposeront de revêtement de sol afin d'éviter les infiltrations d'huile dans le sol. Elles devront également être cloisonnées et ventilées pour éviter un quelconque risque de réactions avec des produits tels que des produits inflammables ou explosifs. Une attention particulière sera portée sur les conditions de stockages des huiles et hydrocarbures qui ne devront pas infiltrer le sol en cas de déversement ou de fuite lors du stockage.

La mise en place du chantier demandera des travaux et notamment la création de route, de parking ainsi que du terrassement. Certaines zones seront temporaires (zone de chantier) mais d'autres seront définitives (routes d'accès, parking pour la maintenance...). L'ensemble de ces zones peuvent imperméabiliser le sol. Cela a pour conséquence une réduction de l'infiltration de l'eau et donc une réduction de la quantité d'eau atteignant la nappe phréatique, mais aussi des risques d'inondations.

Il faudra donc limiter au maximum l'emprise au sol de l'éolienne et plus particulièrement les zones définitives qui seront construites.

3. L'air, les odeurs, les poussières et le bruit (Etape 6)

Qualité de l'air, poussières :

Cet aspect concerne encore une fois uniquement le processus de montage de l'aérogénérateur car on considère que l'impact lors de l'utilisation est nul et celui lors de la maintenance est faible en comparaison.

Lors du montage de l'éolienne, les engins de chantier auront un impact sur la qualité de l'air à travers leurs émissions de gaz à effet de serre, mais peuvent également soulever de la poussière lors des périodes sèches. Ces deux aspects amènent une diminution de la qualité de l'air temporaire et locale. Il faut cependant prendre en compte que la livraison des éoliennes se fera sur une période de 7 ans, on aura donc une diminution de la qualité de l'air sur l'ensemble de cette période.

➤ *Actions préventives*

Il est important de limiter le nombre d'engins de chantier sur le site et en mouvement. Une attention particulière sera donc apportée sur le déplacement des engins de chantiers, ils seront réduits au strict nécessaire. La qualité de l'air sera également surveillée et plus particulièrement les particules fines afin d'éviter d'atteindre un seuil trop élevé.

Odeurs :

Certaines odeurs peuvent éventuellement provoquer une gêne pour les habitants alentours tels que de la peinture ou des gaz d'échappement des engins de chantiers. Cette gêne devrait cependant être limitée car les éoliennes seront situées à plus de 500 m de toute habitation.

Le bruit :

➤ *Processus d'utilisation :*

L'éolienne, comme tous les systèmes mécaniques, génère des bruits qui pourraient impacter la population alentour. On observe notamment des basses fréquences qui peuvent avoir un impact sur la santé humaine (maladies vibro-acoustiques).

Fréquence	8 Hz	10 Hz	12,5 Hz	16 Hz	20 Hz
Niveau d'infrasons mesuré à 250 m de distance d'une éolienne de 1MW et à une vitesse de vent de 15m/s	72 dB	71 dB	69 dB	68 dB	65 dB
Seuil d'audibilité	103 dB	95 dB	87 dB	79 dB	71 dB

Figure 1 : Niveau d'infrasons mesuré à une distance de 250 mètres d'une éolienne de 1MW

Le document précédent montre le niveau d'infrason mesuré à 250 m de distance d'une éolienne de 1MW pour différentes fréquences. On peut remarquer que ces valeurs restent inférieures au seuil d'audibilité et ne génèrent donc aucun risque sanitaire. Il peut cependant subsister une gêne pour le voisinage.

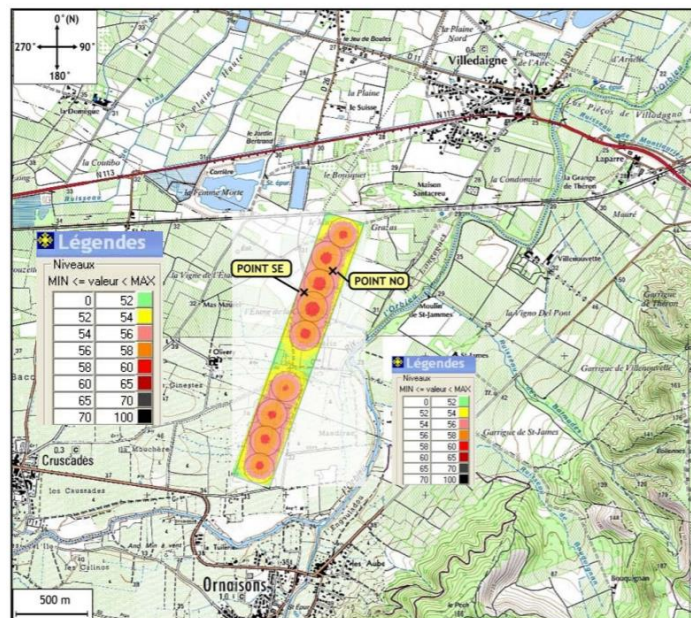


Figure 2 : Etendue des infrasons mesurés sur le site pour le projet de parc éolien dans les communes de Villedaigne, Crusades et Ornoisons³

La carte précédente permet de visualiser l'intensité du bruit dû aux éoliennes. On peut remarquer que ce bruit ne dépasse pas les 60 dB et ne s'étend pas à plus de 250 mètres de l'éolienne.

La distance de 500 mètres des habitations devrait suffire à réduire l'impact du bruit.

➤ *Processus de montage et de maintenance :*

³ [https://insatoulousefr-my.sharepoint.com/personal/lferrand_etud_insa-toulouse_fr/Documents/Projet%20PJ81/Point%20QSE3/Etude_d_impacts_CVO_21-06-2013_Partie3_cle5a98d2%20\(1\).pdf?CT=1617366036854&OR=ItemsView](https://insatoulousefr-my.sharepoint.com/personal/lferrand_etud_insa-toulouse_fr/Documents/Projet%20PJ81/Point%20QSE3/Etude_d_impacts_CVO_21-06-2013_Partie3_cle5a98d2%20(1).pdf?CT=1617366036854&OR=ItemsView)

Aux bruits de l'éolienne s'ajoute les bruits de chantier lors de du montage et parfois de la maintenance.

Ces bruits sont surtout gênants pour les agents présents sur place qui doivent se protéger à l'aide d'EPI (casque anti-bruit par exemple).

4. L'énergie (Etape 7)

➤ *Processus de montage :*

Comme nous avons pu l'expliquer précédemment, il est difficile de chiffrer la consommation directe en électricité lors du montage de l'éolienne. On peut cependant convertir les consommations d'énergie en kWh. Malheureusement, la méthode EMAS Easy ne nous donne pas la conversion pour du diesel en kWh. En cherchant nous-même l'information, on obtient un litre de diesel qui vaut environ 10,74 kWh.

On obtient alors une consommation de 2 322 823 kWh.

Étape 2 : Visualisez la quantité équivalente de ressources nécessaires pour générer cette énergie.

Ressources nécessaires pour générer 1000 kWh

• Charbon brun	1.300 kg
• Déchets basse qualité calorifique	3.500 kg
• Panneaux solaires	12.500 m ²
• Uranium (Energie nucléaire)	0,022 gr
• Gaz naturel	270 m ³
• Eau (Barrage Hauteur 10 m)	43.200 m ³

Figure 2 : Données concernant la conversion de l'énergie en ressources issues de la méthode EMAS Easy⁴

Il nous faut maintenant comparer cette valeur à la quantité de ressource nécessaire pour la créer. Cette étape permet de se rendre compte de l'importance de cette consommation en terme de matières premières. Il nous faudrait donc pour générer cette énergie :

- 3 020 T de charbon brun
- Ou 8 130 T de déchets basse qualité calorifique,
- Ou 29 km² de panneaux solaires,
- Ou 51,1 gr d'uranium,
- Ou 627 162 m³ de gaz naturel

⁴ https://insatoulousefr-my.sharepoint.com/personal/lferrand_etud_insa-toulouse_fr/Documents/Projet%20PJ81/Point%20QSE3/gp_eudor_WEB_KH7406136FRC_002.pdf.fr.pdf?CT=1617460673400&OR=ItemsView

- Ou 100E6 m3 d'eau

On peut également comparer cette énergie consommée à la production d'énergie de l'éolienne (2GWh par an pendant 30 ans). Le montage de l'éolienne étant réalisé une seule fois, cette consommation représenterait 3,87% de la production de l'éolienne. On peut considérer que cette partie est donc négligeable devant la production d'énergie de l'éolienne. Cela ne change cependant en rien l'impact des gaz à effet de serre produits par les véhicules et qui impactent la qualité de l'air.

➤ *Processus d'utilisation :*

Il est également difficile de déterminer à ce stade la consommation de l'éolienne en énergie électrique lors de son utilisation. On sait cependant qu'elle risque de consommer de l'énergie électrique pour assurer la ventilation de la nacelle, le fonctionnement des divers moteurs électriques et hydrauliques ainsi que certains capteurs. Pour éviter une consommation excessive lors de la phase d'utilisation de l'éolienne, il faudra être vigilant sur les lieux de déperditions de chaleurs ainsi que les installations particulièrement énergivores.

On prendra soin également de bien isoler la nacelle et le mât afin de limiter la ventilation.

Cette partie est très importante à prendre en compte lors de la conception de l'éolienne. Il ne nous est cependant pas demandé dans le cahier des charges de nous occuper de la partie électrique, nous ne chiffrerons donc pas cette partie.

➤ *Processus de maintenance :*

Nous allons suivre la même démarche que pour le processus de montage. On obtient une consommation de 1933,2 KWh.

Ce qui revient à utiliser :

- 2470 kg de charbon brun,
- Ou 6650 kg de déchets basse qualité calorifique,
- Ou 23750 m² de panneaux solaires,
- Ou 0,042 gr d'uranium,
- Ou 513 m3 de gaz naturel
- Ou 82080 m3 d'eau

Cette consommation annuelle est équivalente à 0,1% de la consommation annuelle de l'éolienne.

On remarque finalement que comme on aurait pu s'y attendre, le processus de montage est celui qui consomme le plus en termes d'énergie. Il faut tout de même prendre en compte que nous n'avons pas calculé la partie consommation électrique qui pourrait être importante dans le processus d'utilisation. Cette consommation restera tout de même minime face à la production électrique de l'éolienne.

5. La production et le recyclage des déchets (Etape 8)

L'ensemble des déchets sur site devront être amenés dans un centre de traitement adapté et ne devront surtout pas rester sur site.

Les déchets verts seront amenés dans un centre de compostage et les déchets domestiques devront être jetés dans les poubelles prévues à cet effet et seront collectés par le service de ramassage des déchets du secteur.

Il sera bien entendu possible que certains déchets légers soient entraînés aux abords du chantier. Il faudra ainsi organiser des opérations de nettoyage du site.

Concernant les déchets dangereux, ils ne devront pas être stockés sur site et devront être évacués au fur et à mesure dans un centre adaptés.

Les dernières étapes de la méthode EMAS Easy ne seront pas traitées car elles concernent l'organisation et l'intégration de la méthode dans l'entreprise. Ces points ne demandant plus une réelle réflexion sur l'impact environnemental et sociétal du projet, nous n'irons pas plus loin dans la réflexion.

E. Analyse de cycle de vie détaillée et éco-conception

Dans le but de réaliser une éco-conception de notre éolienne, nous avons fait une Analyse de Cycle de Vie (ACV) détaillée à l'aide du logiciel ArtoACV. Cette ACV permet d'avoir une idée de l'impact de la fabrication de notre éolienne sur l'environnement. Nous avons pu par la suite décider de pistes d'éco-conception ayant pour but de réduire notre impact sur l'environnement.

Lors de la réalisation d'une ACV, il est indispensable de connaître un certain nombre d'informations sur le produit tel que les matériaux ou les trajets de distribution par exemple. Nous présenterons ces hypothèses dans la partie suivante.

1. Hypothèses de l'ACV

Le résultat d'une Analyse de Cycle de Vie dépend grandement des pièces entrées (masses, matériaux, procédés de fabrication) dans la partie nomenclature du logiciel. Il est important de noter que les procédés de fabrication et les matériaux entrés dans les logiciels ne sont pas forcément les procédés de fabrication finaux car nous sommes limités aux procédés disponibles dans la base de données des logiciels.

Les hypothèses réalisées ont donc été au niveau des matériaux et des procédés (en essayant de rester le plus proches de la réalité que possible), mais aussi de la distribution et du recyclage.

Concernant le trajet de notre éolienne, nous nous sommes basés sur les informations dont nous disposons (par exemple la fonderie en Pologne) en faisant également certaines hypothèses nécessaires.

Les matières premières indispensables à la conception de nos éoliennes (principalement l'acier) seront extraites dans la mine de Kiruna en Suède et transportés par la suite dans notre fonderie en Pologne. Ce transport se fera par camion de 27 tonnes sur une distance de 2626 km. En sortie d'usine, les pièces de l'éolienne (excepté les pales et le béton pour les fondations) seront transportées par camion de la Pologne au port de Saint-Nazaire en France sur une distance de 1887 km.

Concernant les pales, elles seront transportées par camion également de l'usine ATV (près de Marseille) au port de Saint-Nazaire (distance de 1082 km).

Depuis le port, les éoliennes seront transportées par porte-conteneurs jusqu'au port de Dakar. On pense pouvoir transporter deux éoliennes sur un porte-conteneurs pour une distance de 2525 km par éolienne.

Concernant les fondations, le béton et l'armature en acier seront fournis localement à Dakar, on prévoit donc un trajet de 200km pour arriver au site. Les fondations seront réalisées par une entreprise de BTP locale comme Eiffage Sénégal par exemple. L'entreprise Fabrimetal Sénégal permettrait également de se fournir en armature pour béton.

Il a également fallu faire une hypothèse vis-à-vis de la fin de vie du produit. Dans le cas d'ArtoACV, le logiciel permet de faire une approximation en pourcentage. Nous avons donc fait une hypothèse d'un recyclage de 20% ce qui correspond à peu près à la quantité d'acier présent. Dans le cas de Ecodesign Studio, le logiciel permet de mettre le recyclage en mode automatique. Celui-ci prend alors en compte des valeurs moyennes de transport et d'impact du recyclage.

2. Résultats avant éco-conception

Les résultats donnés par ArtoACV (voir figures suivantes), montrent clairement que la fabrication (procédés) est la phase du cycle de vie de l'éolienne la plus impactante. On peut par ailleurs voir que son impact correspond à 72% de l'impact global de l'éolienne. Les matériaux représentent également une part importante (20%).

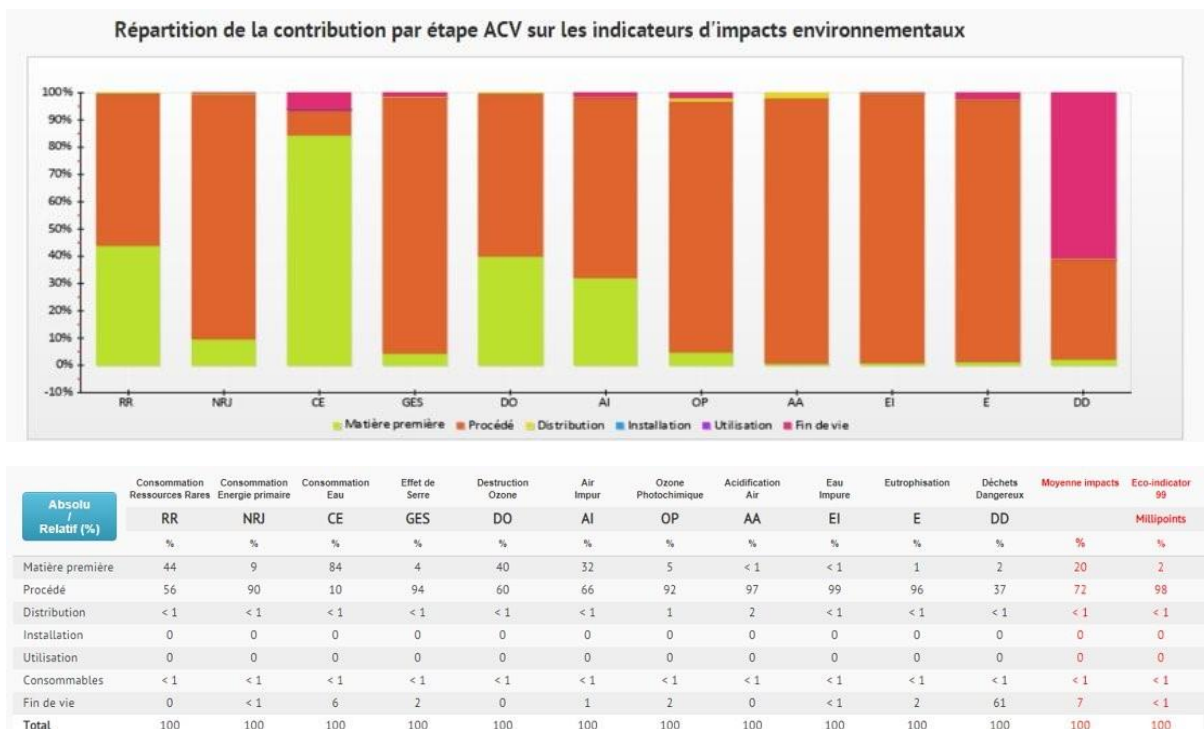


Figure 3 : Bilan environnementale avec le logiciel ArtoACV



Figure 5 : Etiquettes et coût environnemental de l'éolienne avant éco

Les étiquettes données par le logiciel (voir figure ci-dessus) chiffrent l'impact environnemental de l'éolienne. On peut remarquer que la consommation électrique qui correspond au facteur d'impact "consommation en énergie primaire" représente la majorité du coût environnemental.

Finalement, les résultats précédents permettent de déterminer que les procédés de fabrication seront déterminant dans l'impact de notre éolienne. Malheureusement, il est difficile de modifier ces procédés afin de les rendre moins impactant. Nous nous concentrerons donc sur matériaux et éventuellement le transport.

3. Pistes d'éco-conception

A l'aide du logiciel ArtoACV, nous avons déterminé un certain nombre de pistes d'éco-conception réalisables dans le cas de notre éolienne.

Nous pouvons tout d'abord utiliser de l'acier recyclé pour la fabrication de notre éolienne. L'acier étant entièrement recyclable, nous pourrions également réduire notre impact au niveau de la fin de vie en recyclant l'acier des éoliennes.

Nous avons également fait le choix de réduire certaines masses telles que celle du moyeu par exemple qui n'était pas forcément optimisé.

Concernant la réduction du transport de notre éolienne, nous avons pensé à extraire l'acier CORTEN directement au Sénégal. On fabriquerait ainsi le mât de l'éolienne localement dans une fonderie comme celle de Fabrimetal située à Dakar. On transforme donc le transport par bateau pour le mât en transport par camion de quelques centaines de kilomètres. Les portes containers pourront également transporter plus d'éolienne et donc réduire considérablement l'impact environnemental.

Il faudrait également étudier les procédés de fabrication afin d'identifier les plus impactant et réduire au mieux cet impact au choisissant des procédés moins énergivores par exemple.

Enfin, il pourrait être intéressant de recycler également nos pales et notre nacelle qui sont réalisés en matériaux composites. Il est aujourd'hui encore difficile de recycler ce type de matériau mais le producteur Vestas aurait développé une nouvelle solution technologique permettant de

recycler les pales d'éoliennes⁵. Cette solution serait très intéressante et permettrait de recycler la quasi-totalité de nos éoliennes (sans compter le béton armé).

4. Résultats après éco-conception

Après avoir entré certaines de nos pistes d'éco-conception dans le logiciel (réduction des masses, des transports, et recyclage de l'acier), nous avons pu comparer notre projet de base à notre projet éco-conçu. On remarque sur le diagramme que pour la plupart des facteurs d'impacts, nous sommes en dessous des valeurs de départ. On réduit donc notre impact environnemental sur ces facteurs d'impact. Cependant, on observe ce qu'on appelle un transfert d'impact au niveau des ressources rares qui ont augmentées. Cela signifie que nous nous sommes amélioré quelque part, par exemple la consommation en eau, mais qu'en contrepartie on consommerait plus de ressources rares.

Ce transfert d'impact ne modifie cependant pas le bilan qui reste meilleur dans le cas de l'éolienne éco-conçue. On constate en effet une réduction de presque 130000€ du coût environnemental.

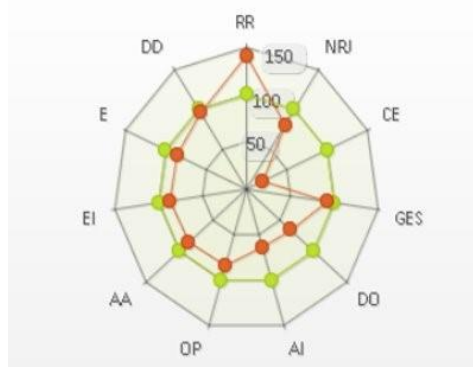


Figure 4 : Comparaison des facteurs d'impact avant et après éco-conception

	A	B	B-A
	ACV1 éolienne détaillée	ACV1 éolienne détaillée écoconçue	Rapport produit B/ produit A
Coût carbone	99 168 €	91 683 €	-7 485 €
Coût Conso Eau	5 229 €	1 071 €	-4 158 €
Coût énergétique	611 580 €	494 022 €	-117 558 €
Coût traitement déchets	6 249 €	5 985 €	-264 €
Total	722 226 €	592 761 €	-129 465 €
Surcoût environnemental minimum de 129 465 €			

Figure 5 : Comparaison des coûts environnementaux

On a donc un coût environnemental après éco-conception de 592 761€. En considérant qu'une éolienne de 1MW produit en moyenne 2GWh/an, on peut déterminer à partir de quand le coût environnemental de fabrication sera supplanté par la production d'énergie de l'éolienne.

On prendra pour cela le coût du kWh en France qui est de 0,18€ (chiffre donné par le logiciel ArtoACV). Sachant que l'éolienne à une durée de vie de 30 ans, on a donc une production de 60GWh en moyenne sur toute la vie de l'éolienne. On traduit cette valeur en prix ce qui nous donne 10,8 millions d'euros d'énergie produite sur 30 ans et donc 360 000€ par an et par éolienne. Dans le cas

⁵ https://www.windpowermonthly.com/article/1716110/vestas-develops-gamechanger-wind-blade-recycling-method?fbclid=IwAR3dtfBIMSnX-IDB353ghOOgom9VnI4SD1h8PSkk_JmoOIBud0ZwodAwgWE

non éco-conçu, notre éolienne sera rentable sur le plan environnemental au bout de 2 ans alors que dans le cas éco-conçu, elle sera rentable au bout de 1 an et 8 mois.

VII. Rapport de Gestion de Projet

Afin de mener à bien la gestion du projet il a fallu mettre en place les outils qui serviront à la bonne tenue du projet et écarter tous les éléments et risques qui pourrait le desservir. Cette gestion a dû se faire tout au long du projet afin d'identifier les causes, communiquer efficacement entre les différents membres du groupe, construire une structure de projet ensemble afin d'aller jusqu'au bout. Nous décrirons dans ce rapport comment nous y sommes arrivés et quelles leçons nous tirons de cette expérience.

A. Premiers temps de la gestion de projet / phase de démarrage

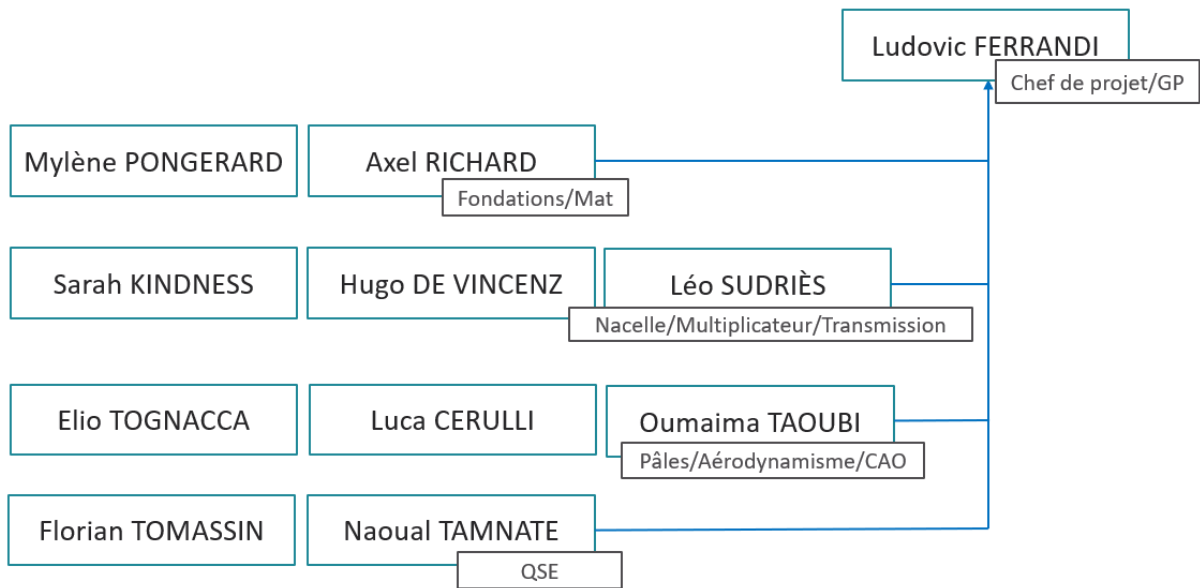
À la suite des cours de Gestion de Projet effectués en amont du début du projet, nous avons pris conscience de l'importance d'une bonne organisation afin de mener à bien les nombreuses tâches inhérentes au projet. L'une des premières choses que nous avons faites est d'organiser notre structure hiérarchique et élire un chef de projet. Nous avons choisi une organisation matricielle pour les 11 membres du groupe afin d'assurer une meilleure communication entre tous les groupes de travail avec le chef de projet informé sur tous les points.

Afin d'identifier le travail requis pour notre projet, nous avons effectué un brainstorming pour établir un WBS. A l'issue de ce brainstorming nous avons identifié différentes voies à travailler et traiter afin de structurer et découper le projet en lots.

Dimensionnement	CAO	QSE	Fondation	Gestion de Projet	Vie de l'éolienne
-Acier Corten -Estimation des masses -Etude des matériaux -Choix catalogues	-Maintenance -Montabilité -Accessibilité -Transportabilité	-Condition de vie -Normes -Transport	-Environnement -Fondations -Transformateur	-Planning -OBS -Réunions	-Surveillance -Maintenance -Algorithme

Tableau 1 : Brainstorming

Nous avons donc identifié les lots à traiter en premiers temps pour la première phase de prédimensionnement, afin de pouvoir se lancer dans notre travail. Cependant, il est vite apparu que notre effectif serait réduit et notre organisation s'est vu perturber. Voici donc la hiérarchie que nous avons adopté :



Graphique 1 : Hiérarchie adopté

Malheureusement après cette organisation nous avons appris l'impossibilité pour Naoual TAMNATE de continuer le projet pour des raisons personnelles. Nous avons du coup découper le projet de la sorte :

Pales	Transmission /Nacelle	Mat	Multiplicateur	QSE	CAO
Calculs	Liaison avec les pales	RDM	Dimensionnement	Réalisation des AMDEC	Squelettes indépendants
Choix Catalogue	Arbre	Transports	Liaisons	Matrice de criticité	Différents éléments de l'éolienne
Liaison pivot pitch	Liaison Nacelle	Liaisons aux différents éléments	Fixation à la nacelle	Point environnement	
	RDM				

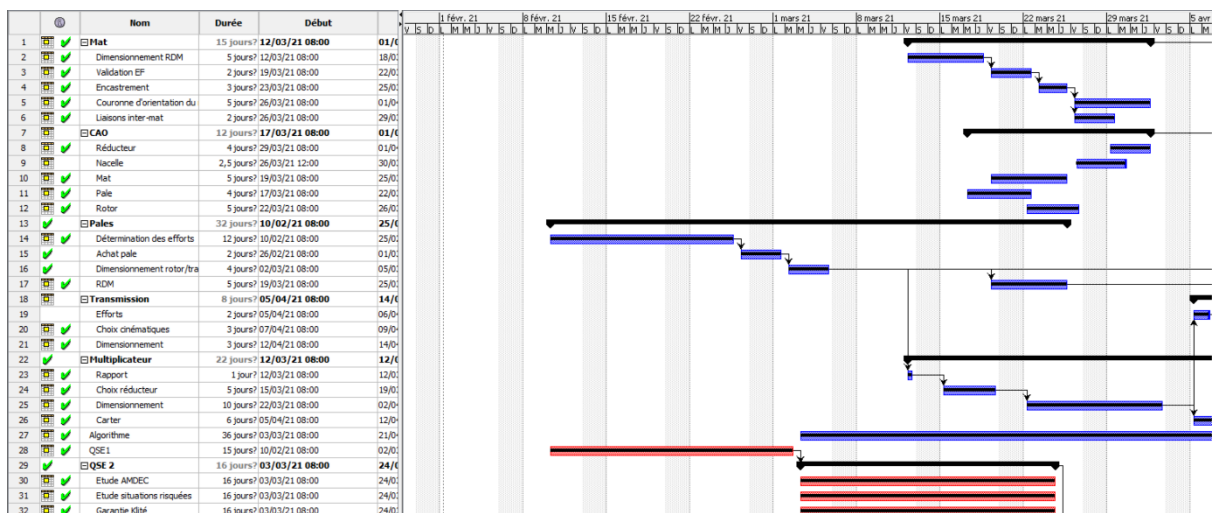
Tableau 2 : Séparation des lots

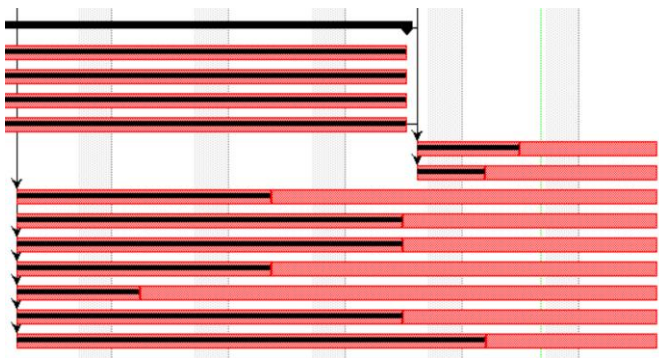
Nous avons ensuite affecté les rôles et responsabilités à chacun à travers une matrice RACI

	Pale	Transmission	Nacelle	Multiplicateur	Mat	GP	QSE	CAO
Luca CERULLI	A/R	C				I	I	A/R
Hugo De VINCEZ			R	I	I	I	I	
Ludovic FERRRANDI	I	I	I	R	I	A/R	I	R
Sarah KINDNESS		I		A/R	I	I	I	
Mylène PONGERARD						I	A/R	
Axel RICHARD	I	A/R		I		I	I	
Léo SUDRIES			R	I	A/R	I	I	
Oumaima TAOUBI	I	R		I		I	I	
Florian THOMASSIN						I	I	
Elio TOGNACCA	R		A				R	

Tableau 3 : Matrice RACI

En même temps nous avons établi un diagramme de Gantt afin de situer dans le temps toutes nos tâches à effectuer au fur et à mesure de l'avancement et de pouvoir constater notre avancé. Ce diagramme de Gantt à évoluer au cours du projet, nous l'avons tout d'abord effectué sur un Excel collaboratif afin que tout le monde puisse renseigner son avancé et consulter sa prochaine tâche à effectuer. En milieu de projet nous avons changé le support de notre Gantt et de le réaliser sous ProjectLibre (Voir Annexe). Il se présente sous la forme suivante :





Les traits bleus ne font pas partis du chemin critiques qui sont représenté par les bandes rouges. Dans chacune de ses bandes se trouvent une ligne noire qui représente l'avancement en pourcentage. Plus la ligne est longue, plus la tâche est avancée. Ceci permet de constater l'avancement du projet. Le désavantage de ce choix est qu'il n'est pas consultable par tous à tous moments.

B. Gestion des Risques

Le but était d'identifier les problèmes pouvant apparaître tout le long du projet et mettre en place des actions adaptées pour contourner celle-ci et si ce risque apparaît afin de réduire son risque de probabilité ainsi que mettre en place l'action curative qui a été réfléchi pour pouvoir y remédier. Chaque risque identifié a été évalué avec une probabilité d'apparition et une gravité allant de 1 à 5 (5 étant la probabilité ou la gravité la plus forte). Tout au long du projet, un risque est apparu qui concerne l'absence de personne au sein du groupe. Nous avons alors le tableau des risques suivant :

Id	Titre/Description	Cause du risque	Proba (1 à 5)	Conséquence	Gravité (1 à 5)	Actions préventives	Actions curatives	Etat du risque
1	Problème de collaboration avec 3DX	Manque de connaissances sur le logiciel	5	Pertes de temps	5	Communiquer sur l'utilisation du logiciel (document avertissant les personnes modifiant les pièces)	Prise de contact avec personnel compétent	Ouvert
2	Délais à court terme (tâches individuelles)	Manque de compétences/organisation	4	Pertes de temps/risque de ne pas respecter les délais à long terme	5	Réunion hebdo - réseau de communication- réseau de stockage documentaire	Ne pas hésiter à demander de l'aide/communiquer sur les problèmes et les difficultés rencontrés	Ouvert
3	Travail en effectif réduit	Absence non prévu de collègue	5	Perte de temps et trouble à l'organisation du projet	4	Deadline des tâches généreuse	Ne pas prendre en compte le travail devant être fait par ces personnes, sera considéré comme du bonus si le travail a pu être réalisé	Ouvert
4	Délais à long terme (au niveau de l'équipe)	Manque d'organisation/de temps	3	Non respect du cahier des charges/perte du contrat	5	Avoir une bonne organisation dès le début du projet/Respecter les délais à court terme/Faire une réunion hebdomadaire	Heures supplémentaires / Restructuration des équipes de travail / Communication	Ouvert
5	Charge de travail importante	Mauvaise répartition des tâches	5	Pertes de temps/Emprise sur le reste de l'emploi du temps	3	Communication - Réajustement des équipes de travail	Informé le groupe si il y a surcharge de travail	Ouvert
6	Coûts trop élevés	Manque de temps/d'optimisation	5	Risque de perte du contrat	1	Prendre en compte les coûts tout au long du projet/Excel sur les coûts	Renégociation avec le client - Compromis	Ouvert
7	Non faisabilité	Manque de rigueur de la part du groupe	1	Risque de perte du contrat	4	Mettre en place des relectures (par le responsable puis par le chef de projet)/Travailler en binôme	Restructuration des équipes de travail - Documentation - Revenir en arrière	Ouvert
8	Mauvaise gestion des documents du projet	Manque de rigueur de la part du groupe	3	Perte de documents/Faire les choses plusieurs fois	2	Bien nommé chaque documents/Bien organiser les fichiers sur le drive ou sur 3DEXpérience/Communiquer	Charger une personne de la restructuration de la base de donnée	Ouvert

Tableau des risques

L'ensemble des risques sont restés ouverts tout au long sauf pour le risque 1, qui a la fin du projet, une seule personne était concernée par le logiciel 3DEXpérience et donc le risque a été fermé. La communication sur l'utilisation du logiciel (Risque 1) aura été fructueuse car nous n'avons pas rencontré ce risque malgré une probabilité élevée. Les risques déjà identifiés ont été placés dans la matrice de criticité ci-dessous :

Probabilité d'apparition du risque	5	Coût élevés		Charge travail ++	Manque d'effectif	Problèmes 3DX
	4					Délais Court terme
	3		Manque de rigueur			Délais long terme
	2					
	1		Grève des transports		Non faisabilité	
		1	2	3	4	5
		Impact/gravité des conséquences du risque				

Matrice de criticité

C. Communication

Afin de concerner chaque personne du groupe et d'avoir une vision globale de l'avancement général, nous avons mis en place une réunion hebdomadaire de 30 minutes fixée en fin de séance chaque vendredi (en plus des heures prévues par l'emploi du temps). Nous disposons en effet de 2 séances en présentiel le mercredi et le vendredi. Lors de cette réunion plusieurs aspects du projet étaient abordés :

Bilan du travail effectué au cours des 2 séances précédentes (mercredi précédent et vendredi même)

- Point sur l'avancement des tâches et leur positionnement par rapport au GANTT (avance, dans les temps, retard)
- Prévion du travail à effectuer le week-end (notamment CAO et présentation pour les différents points GP, QSE et techniques) et lors des 2 prochaines séances.
- Un exemplaire type de la feuille de réunions que nous avons mené se trouve en ANNEXE.

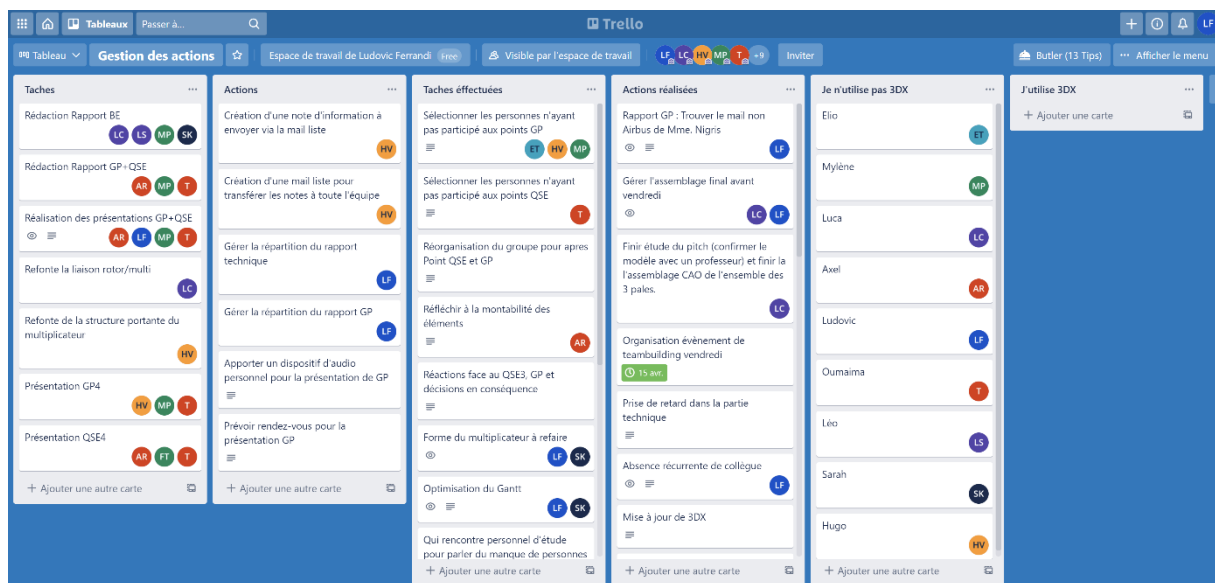
D. Assurer la continuité du projet et vérifier l'avancement

Afin d'assurer la bonne tenue de chaque séance, le chef de projet demandait à chaque début de séance si tout le monde avait bien des tâches à effectuer ou si une modification était nécessaire. Par exemple, si un point bloquant apparaissait pour quelqu'un, seul sur une tâche, une personne se détachait afin de l'aider à résoudre le problème le plus rapidement possible. Grace à cela, le chef de projet était en mesure de réagir rapidement face à un retard ou une difficulté au sein du groupe. C'était aussi l'occasion de construire les sujets à mettre à l'ordre du jours de la réunion du vendredi.

L'outil Trello a également été d'une grande aide pour avoir un suivi tout au long du projet des tâches et des actions. L'intérêt de cet outil est la notification de toute nouvelle modification à tous les membres du groupe, par le biais d'un mail (exemple de mail envoyé à l'ensemble du groupe en ANNEXE).

La possibilité d'associer une ou plusieurs personnes à une tâche était également pratique pour savoir en un coup d'œil par quoi était occupé une personne en particulier.

Voici le détail de notre Trello :



E. Gestion du manque de personnel

Dès les débuts du projet il a été mis en évidence que nous allions manquer d'effectif au cours du projet. Nous avons alors pris contact avec les deux personnes concernées afin de s'adapter au mieux à leur difficultés. Malheureusement dès les premiers jours, nous avons été obligés de nous séparer d'un membre pour des causes personnels. Pour la deuxième personne nous avons décidé, pour faciliter son travail, d'alléger sa charge afin qu'il puisse avoir un travail minimum et qu'il puisse nous suivre dans cette aventure. Malheureusement encore, cette personne n'a pu assurer une présence suffisante en cours et n'a pu continuer son travail.

Les équipes pédagogiques ont été prévenues une première fois et nous avons continué à prendre des nouvelles de cette personne qui était en mesure de nous répondre positivement et a pu retrouver une forme de motivation et a reparticipé au projet. Cependant, son absence a vite refait surface et avec les professeurs nous avons pris la décision de ne plus compter sur cette personne et notre effectif est définitivement à 9.

Notre communication a toutefois été efficace car le manque de personnel n'a pas impacté le déroulé du projet malgré un travail non fait. L'important est que nous n'avons pas pris de retard sur le travail réparti à chaque membre du groupe car nous avons su rapidement lui affecter des tâches sans dépendance ou avec une longue date de fin.

F. Analyse de fin de projet

Pour évaluer notre projet, nous avons identifié et analysé les éléments qui ont participé à la réussite du projet ainsi que les difficultés qui ont freiné l'avancement du projet. Le tableau ci-dessous résume le bilan général :

Point fort	Point faible
<ul style="list-style-type: none">-Bon suivi du projet : le diagramme de Gantt nous a permis de planifier, organiser et visualiser l'avancement du projet.-Bonne communication : tout au long du projet, nous avons eu une communication efficace entre les membres du groupe.-Tâches bien définis avec deadline : Répartition de tâches optimisé, nous avons bien défini les objectifs du projet, les compétences à mettre en œuvre.-Equipe responsable et motivée tout au long du projet : travail conséquent des membres de l'équipe.-Risques cernés et pris en compte : Nous avons mis en place des actions préventives pour éviter tout risques.	<ul style="list-style-type: none">-Manque d'expérience : étant étudiants de 4ème année, nous avons rencontré des difficultés pour résoudre quelques problèmes techniques durant le projet.-Réorganisation due aux absences : Nous avons eu des absences au milieu du projet, ce qui nous a mené à modifier l'organigramme et donc perdre le temps.-Mauvaise compréhension des attentes au niveau des rendus pour les revues de projet. Il aurait fallu mieux s'assurer des attentes en questionnant directement les professeurs.

VIII. ANNEXES

ANNEXE 1 : Etapes EMAS Easy

ANNEXE 2 : Organisation de réunion

ANNEXE 3 : Exemple de mail interne

ANNEXE 4 : Vérification des documents GP

ANNEXE 5 : Méthode des 5M pour les modes de défaillances les plus critiques

ANNEXE 1 : Etapes EMAS Easy

Cette annexe contient les trois premières étapes de la démarche EMAS Easy que nous avons suivie.

Etape 1 : L'entreprise et son environnement (l'implantation urbanistique)

Société : Tournez Jeunesse

Personne de contact : Monsieur FERRANDI Ludovic

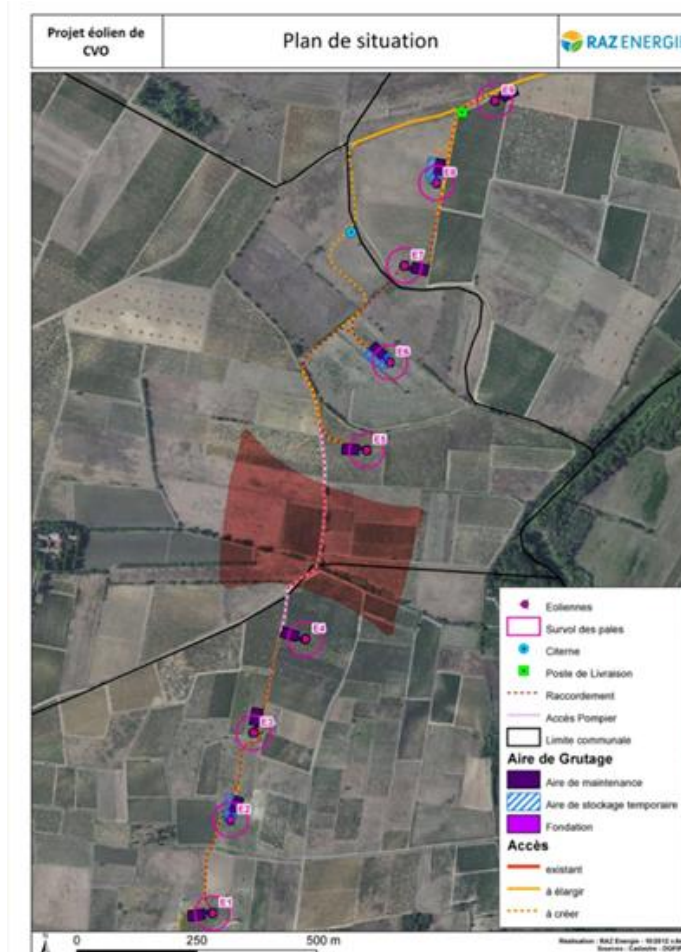
Adresse : 13 Rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse

Statut juridique : Société par Actions simplifiée (SAS) au capital de 10 000 euros

Secteur : Industrie/Aéronautique

Ne pouvant pas analyser notre propre site, nous nous sommes basés sur un site déjà existant donnant une idée de ce à quoi va ressembler notre parc éolien en fonctionnement.

Exemple de site de parc éolien dans les communes de Villedaigne, Cruscades et Ornaisons (France) :



Site du projet éolien dans les communes de Villedaigne, Cruscades et Ornaisons⁶

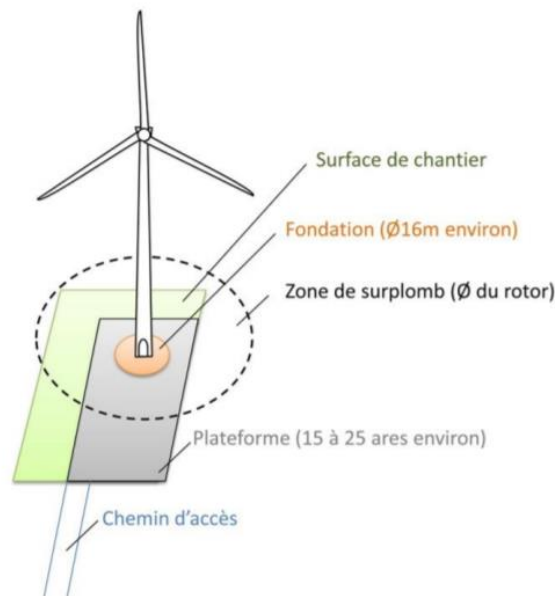
⁶ http://www.aude.gouv.fr/IMG/pdf/Etude_d_impacts_CVO_21-06-2013_Partie3_cle5a98d2.pdf

La zone rouge représente l'aménagement d'un couloir de vol pour diminuer l'effet barrière. On limite ainsi l'impact sur la faune (principalement les oiseaux en migration ou vivant au niveau des côtes). Distance d'environ 200m des éoliennes entre elles et 500m des habitations.

On peut remarquer que, en plus de leur implantation au sol dû aux fondations, les éoliennes nécessitent des espaces tels que des aires de maintenance et des aires de stockages temporaires.

Dans notre cas, nous prendrons en compte les spécificités du milieu dans lequel seront implantées les éoliennes.

On peut également schématiser l'implantation de chaque éolienne au sol de la manière suivante :



Implantation d'une éolienne (surface au sol)⁷

Informations relatives à l'entreprise et au site :

- Présence de l'océan à quelques mètres des éoliennes (minimum 500 m)
- Présence de nappes phréatiques importantes à moyennes (entre 50 et 1000 m³/j)
- Sol sableux ou argileux⁸
- Zone côtière donc présence d'oiseaux migrateurs
- La première année, montage de 30 éoliennes puis 70 la deuxième année et enfin 100/an pendant 5 ans
- Emprise au sol d'une éolienne d'environ 45000 m² en chantier
- Parking d'environ 25000 m² pour la maintenance

Etape 2 : Bilan de matière et utilisation des ressources

Cette étape permet de visualiser les entrées et les sorties du site d'exploitation pour chaque processus (montage, utilisation, maintenance).

⁷ [file:///C:/Users/hp/Downloads/56-ENGIE%20GREEN%20RADENAC-5.1-ETUDE%20DE%20DANGERS%20\(2\).pdf](file:///C:/Users/hp/Downloads/56-ENGIE%20GREEN%20RADENAC-5.1-ETUDE%20DE%20DANGERS%20(2).pdf)

⁸ <http://agritrop.cirad.fr/589270/>

Ces tableaux nous permettent faire un premier chiffrage de certains impacts écologiques que peut avoir le projet.

On réalisera nos calculs pour une seule éolienne et sur une année que ce soit pour le montage, l'utilisation et la maintenance.

Processus de montage :

Entrées	Consommation	Sorties	Production
<u>Energie :</u> Electricité Diesel et essence des véhicules Fioul	Non connue 1 112 L 231 088 L	<u>Emissions dans l'atmosphère :</u> CO2 SOx NOx	 727,7 T 75,78 kg 14,87 kg
<u>Emballages :</u> Carton Plastique	Non connue Non connue	<u>Déchets :</u> Déchets chimiques Déchets électriques et électroniques Déchets verts	 39,6 kg ¹ 3 kg Non connue

Pour calculer la consommation en essence ou diesel, il nous a fallu faire quelques hypothèses tels que le nombre d'engins de chantiers présent sur le site, le nombre de bateaux et camions nécessaires au transport.

Concernant le transport, on considère que le trajet de livraison de l'éolienne se fait par bateau de Saint-Nazaire à Dakar puis par camion de Dakar au parc éolien.

Un poids lourd consomme environ 33 litres aux cent (diesel) tandis qu'un bateau consomme 104kg de fioul par km.

On considère que les portes containers parcourent une distance de 5050km (Saint-Nazaire/Dakar) et qu'ils peuvent transporter deux éoliennes.

Les camions quant à eux devront parcourir une distance de 200km. Il nous faut environ 9 camions pour transporter une éolienne.

Les engins présents sur le site sont :

- pour le terrassement : bulldozers, tractopelles, niveleuses, compacteurs
- pour les fondations : des camions toupies à béton
- pour l'acheminement du matériel : camions pour les équipements de chantier, convois exceptionnels pour les grues et les éoliennes, camion grue pour le poste de livraison
- pour les tranchées de raccordement électrique : trancheuses
- pour le montage des éoliennes : grues

On estime à 8 le nombre d'engins de chantiers sur le site. On considère qu'ils font 200 km pour l'aller-retour sur site et les déplacements sur le chantier.

Les émissions dans l'atmosphère sont calculées à partir des chiffres donnés par la méthode EMAS Easy:

Emissions (gr par km)	Véhicules légers, essence	Véhicules légers, diesel	Véhicules lourds, diesel
CO2 (Dioxyde de carbone)	250	133	837
NOx (Oxyde d'azote)	2.53	0.55	19.2
SO2 (Dioxyde de soufre)	0.026	0.168	1.052

Données des émissions de gaz en fonction du type de véhicule utilisé

The following data was used to calculate the impact in t*km:

Transportation type	Fuel consumption (per vehicle*km)	Deadweight tons (thousand t)	Loading ratio	Empty return rate	Average utilisation = loading ratio x (1 - empty return rate)	Fuel consumption (per kg*km) = fuel cons. / (deadweight x utilisation)
Inland motorboat	7,3 L	0,6 - 1	80%	31%	55%	13 L
Inland towboat	14,4 L	2,3	80%	31%	55%	11 L
Ocean ferry	115 kg	1,2-10	27%	0%	27%	42 kg
Ocean container	104 kg	27,5	61%	0%	61%	6,2 kg
Ocean bulk	49 kg	100-200	90%	51%	44%	0,56 kg

Données de consommation de fioul dans le cas de bateaux (ADEME)

La masse volumique du fioul étant de 0,880 kg/L, on a une consommation de 91,52 L/km.

Les déchets chimiques comprennent : bombes de peinture, kit anti-pollution usagés, matériaux souillés d'hydrocarbure ou d'huile.

Les déchets électriques et électroniques comprennent : restes de câbles, déchets de matériels électroniques.

Un certain nombre de valeurs ne sont pas connues et sont impossibles à déterminer sans l'expérience du chantier. Ces valeurs sont alors notées comme non connues.

Processus d'utilisation :

Entrées	Consommation	Sorties	Production
Energie renouvelable	Illimité	<u>Energie :</u> Electricité	2 GWh

Lors du processus d'utilisation, la seule entrée est celle de l'énergie renouvelable qui permet de faire tourner l'éolienne. Celle-ci produit environ 2GWh d'électricité par an.

Processus de maintenance :

Il existe deux types de maintenance, la maintenance préventive (prévue selon une procédure) et la maintenance curative (imprévue et qui fait suite à une alarme ou une panne).

Entrées	Consommation	Sorties	Production
---------	--------------	---------	------------

⁹ file:///C:/Users/hp/Downloads/Transport_20160603.pdf

<u>Energie :</u> Electricité Diesel et essence des véhicules	Non connue 180L	<u>Emissions dans l'atmosphère :</u> CO2 SOx NOx	399kg 1,65 kg 0,5 kg
<u>Eau :</u>	5m ³ +2m ³ ⁵	<u>Eau usée :</u>	7m ³
<u>Emballages :</u> Carton Plastique	Non connue Non connue	<u>Déchets :</u> Déchets chimiques Déchets électriques et électroniques	Non connue Non connue

Pour la maintenance préventive, il faut prévoir :

- Au moins une maintenance par an pour les éléments de l'éolienne (nettoyage, graissage et vérification des éléments)
- Deux maintenances saisonnières (nettoyage d'insectes ou d'oiseaux, enlèvement du sel, enlèvement de poussières après tempêtes de sable)
- Des maintenances après chaque évènement climatique violent (vent fort, tempête...)

La maintenance curative étant totalement aléatoire, il est difficile de l'estimer. On peut cependant penser que les maintenances citées plus haut seront suffisantes pour éviter les maintenances curatives. Le risque zéro n'existant pas, on considèrera une maintenance curative tous les 2 ans, ce qui est négligeable au vu de toutes les autres maintenances pouvant être réalisée en un an.

En considérant également qu'une maintenance peut parfois s'étaler sur plusieurs jours et donc nécessiter plusieurs allers-retours.

Avec les informations précédentes, on estime à une quinzaine le nombre d'allers-retours réalisés par an pour la maintenance d'une éolienne. On estime enfin que les employés de maintenance utilisent le véhicule de l'entreprise et se situent à 100km maximum du parc éolien. Ces informations nous permettent de déterminer la consommation en diesel ou essence et ainsi calculer les émissions dans l'atmosphère liés à ces trajets.

On considère que la société utilise une voiture diesel qui consomme 6L au 100.

Il ne nous est pas possible de réaliser l'étape trois de la méthode EMAS Easy car elle demande l'implication du personnel de l'entreprise.

ANNEXE n°2 : Organisation de réunion – Exemple de la première réunion menée

Organisation de réunion	Time-keeper:	Secrétaire:	Animateur:	12/02 à 17H45
	Hugo	Sarah	Ludo	

A l'ordre du jour :

	Intitulé et descriptif	Intervenant	Temps de parole
1	Présentation GP	Léo	8
2	Point planning - Repartition travail semaine à venir	Ludovic	5
3	Utilisation Trello pour les réunions ? Fonctionnement	Mylène	5
4	Passage sur One drive plutot que GG drive pour puissance excel?	Ludovic	5
5	Acier Corten	Sarah	5
6	Pour la prochaine fois ?	Ludovic	2
Temps Total			30

/ 30min

Notes d'après réunion :

1	Dimensionnement : but = déterminer une section nécessaire pour obtenir la puissance voulue et ensuite dimensionner la pale.. Coef de portance et traînée pour avoir le moment moteur élémentaire et Rx Rz
2	Finir le Gantt pour le prochain cours
3	Trello permet un suivi, on l'adopte la semaine prochaine
4	One drive utilisé que pour les Excels, on garde le reste sur google drive
5	Faire pour et contre afin de prendre une decision
6	Pour la prochaine fois : on finit prédimensionnement, avancer sur la RDM , regarder norme allemande, autonomie

Signature personne responsable :

ANNEXE n° 3 : Exemple de mail envoyé à l'ensemble du groupe pour éviter l'apparition d'un risque identifié en amont



Le 07/05/2021

Note d'information à l'ensemble du groupe de PJ81

Bonjour chers camarades,

Comme vous le savez, nous entrons dans une période de travail intense, tant quant au projet PJ81 mais aussi de la période de partiel qui approche. Comme vous le savez nous avons déjà restructuré les équipes de travail en tant qu'action préventive.

C'est pourquoi à l'issu de notre réunion hebdomadaire nous avons décidé de mettre en place les actions curatives suivantes :

- Communication accrue :
 - o Augmentation de la fréquence de réunion (2 fois par semaines à la place d'une)
 - o Attention toute particulière à limiter l'usage par plusieurs utilisateurs de 3DX

Je vous remercie et vous souhaite une bonne continuation,

Cordialement,

Ludovic Ferrandi

A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'Ludovic Ferrandi', written over the printed name.

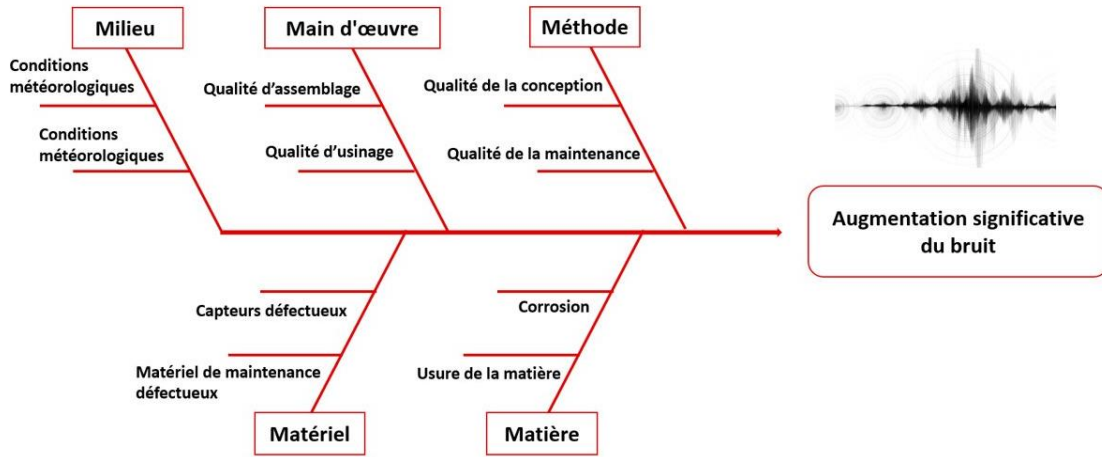
N° Groupe	Groupe 2
Nom Groupe	CERULLI - DE VINCENZ - FERRANDI - KINDNESS – PONGERARD – RICHARD - SUDRIES – TAOUBI - TOGNACCA

GESTION DE PROJET	Question	Réponse Oui/Non	Justification (comment, ...)
Documentation	Les documents ont-ils une page de garde explicite ?	OUI	Page de garde INSA
Documentation	Les documents ont-ils un sommaire ?	OUI	En deuxième page
Documentation	Les documents sont-ils structurés avec des chapitres et sous chapitres numérotés ?	OUI	Voir directement le sommaire ou la trame du rapport
Documentation	Les documents ont-ils des repères de lecture sur chaque page ?	OUI	
Documentation	Les documents ont-ils un historique des révisions ?	NON	
Documentation	L'objectif de chaque document est-il décrit ?	OUI	Au niveau des introduction (compris dans l'introduction ou dissocié)
Documentation	Les documents ont-ils été vérifiés en terme d'orthographe ?	OUI	Vérification humaine + Logiciel
Documentation	Dans le rapport, le contexte du projet est-il décrit?	OUI	Introduction du BE
Documentation	Dans le rapport, l'objectif du projet est-il décrit?	OUI	Introduction du BE
Scope	Le cahier des charges a-t-il été spécifié de manière à avoir une description complète et non ambiguë des besoins et contraintes ?	OUI	Introduction du BE + Gestion de projet
Structuration	Le travail à réaliser dans ce projet est-il identifié et découpé en lots ? Le WBS est-il décrit?	OUI	Travail après brainstorming
Organisation	Les acteurs sont-ils identifiés?	OUI	Organigramme
Organisation	L'OBS est-il décrit?	OUI	Les rôles ont été attribuer a chacun
Organisation	Les différents rôles sont-ils identifiés ?	OUI	Organigramme et matrice RACI
Organisation	Les rôles sont-ils alloués à chaque personne?	OUI	Matrice RACI
Organisation	La contribution des différents rôles aux tâches ou Work Packages est-elle définie ? La matrice RACI a t-elle été construite ?	OUI	Matrice RACI construite, rôle attribué
Planning	Avez-vous établi un Gantt de référence votre projet?	OUI	Voir en ANNEXE
Planning	Est-ce que le planning couvre tous les livrables attendus ?	OUI	Tout livrable détaillé
Planning	Avez-vous pris en compte les dépendances entre activités ?	OUI	Fleche entre les taches
Planning	Avez-vous pris en compte la disponibilité des ressources matérielles et humaines?	NON	
Planning	Avez-vous estimé la charge et la durée pour chaque tâche ?	OUI	Visible sur le Gantt

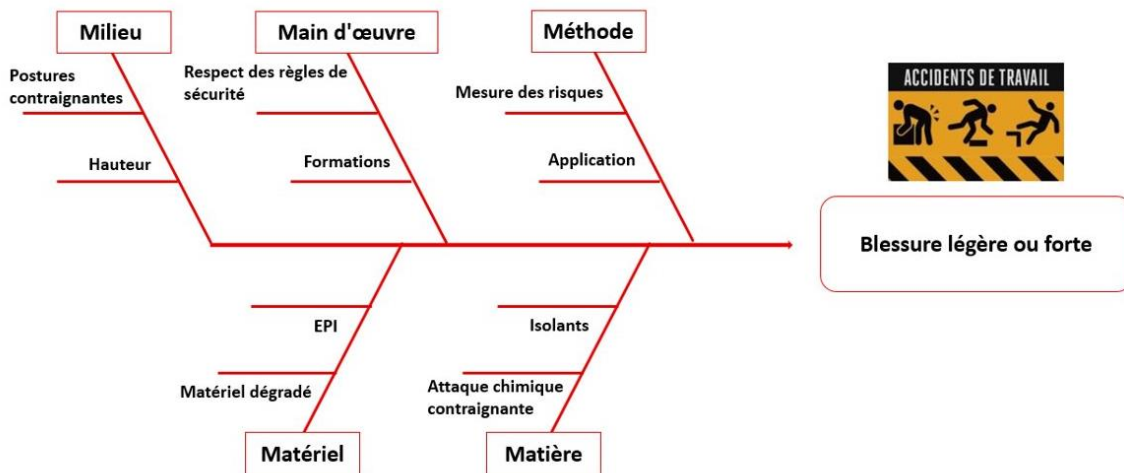
Planning	Avez-vous effectué un suivi et une mise à jour de votre Gantt ? A quelle fréquence ?	OUI	En tout temps par le chef de projet
Planning	Avez-vous analysé les différences entre le planning initial et final ?	OUI	Planning initial modifié en temps réel, peu de modification ont eu lieu
Risques	Avez-vous identifié les risques initiaux du projet ?	OUI	Gestion des risques
Risques	Avez-vous effectué un suivi et une mise à jour des risques ?	OUI	Risque ouvert et/ou fermé tout au long du projet
Communication	Avez-vous identifié les méthodes et outils de communication au sein de l'équipe projet ?	OUI	Réunions, messagerie instantanée, google drive, one drive, discord
Communication	Avez-vous identifié les méthodes et outils de communication avec les acteurs externes à l'équipe projet ?	OUI	Mails aux enseignants, prise d'information face à face
Communication	Avez-vous mis en place différents types de réunions ?	OUI	Communication
Actions	Avez-vous identifié plusieurs types d'actions ?	OUI	Identifié dans le trello
Actions	Avez-vous effectué un suivi des actions ?	OUI	Grace au trello et réunions
Indicateurs de suivi	Avez-vous mis en place des indicateurs de suivi du projet ?	OUI	Chef de projet qui s'assure de l'avancer des tâches à chaque début de séance.
Qualité	Avez-vous mis en place des moyens pour assurer la correcte application des règles et processus applicables dans le cadre du projet ?	OUI	Seul le chef de projet s'assurera de vérifier l'application des règles
Qualité	Avez-vous mis en place les moyens d'analyser les causes racines des problèmes constatés au cours du projet et de les résoudre ?	OUI	Identification en début de projet uniquement après brainstorming et interrogation méthode 5 why
Ressources humaines	Avez-vous identifié les compétences à acquérir/approfondir pour réussir le projet et les moyens de les acquérir ?	OUI	Répartition des compétences en domaine de travail, roulement entre les personnes pour acquérir les compétences
Ressources humaines	Avez-vous mis en place des moyens permettant de gérer aux mieux les ressources humaines ?	OUI	Personnes manquantes gérer , travail non fait par ses personnes non rattrapable
Coût	Avez-vous estimé puis calculé le coût du projet ?	OUI	Partie chiffrage du projet
Retour d'expérience	Avez-vous identifié les difficultés rencontrées dans ce projet et la manière de surmonter chacune d'entre elles ?	OUI	Analyse
Retour d'expérience	Avez-vous identifié des leçons-learnit du projet (Bonnes pratiques, axes d'amélioration) ?	OUI	Analyse

Annexe 5 : Méthode des 5M pour les modes de défaillances les plus critiques

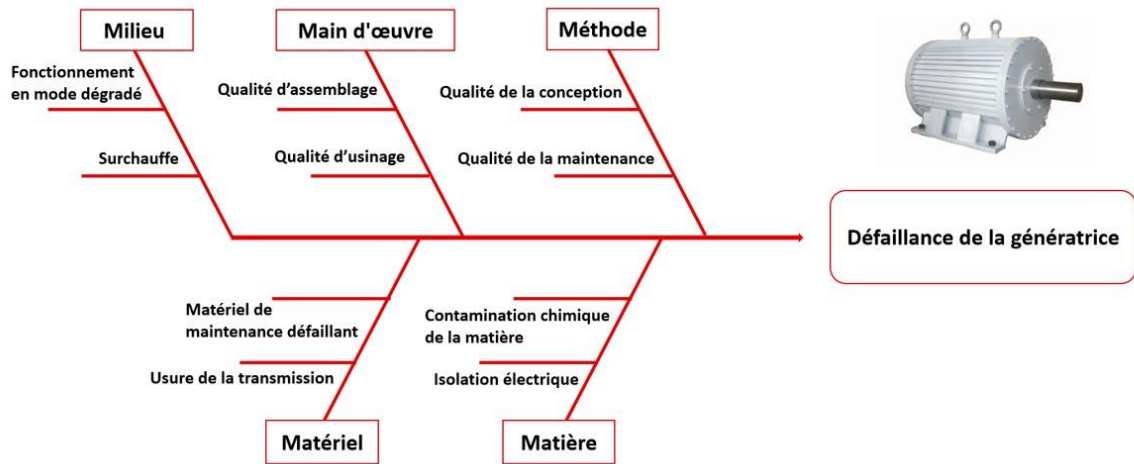
Augmentation significative du bruit



Blessure légère ou forte

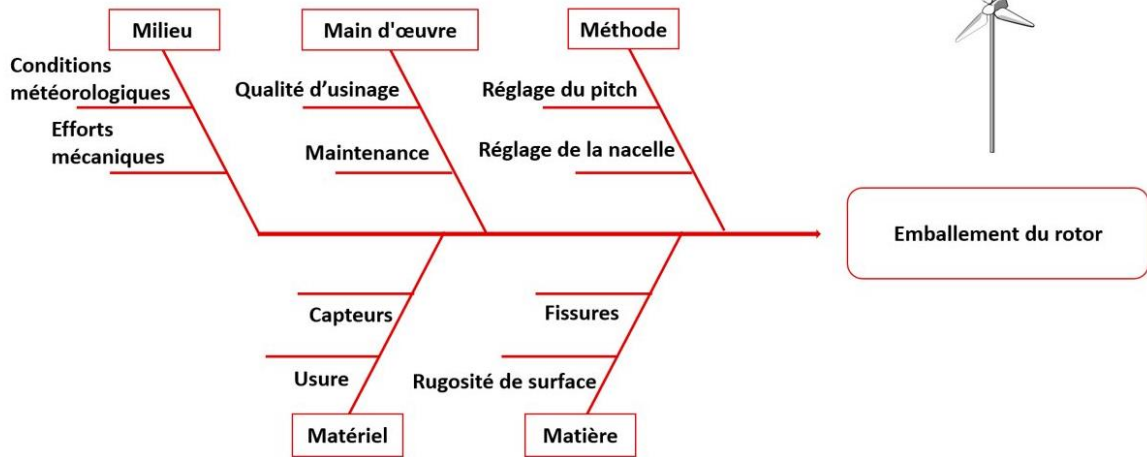


Défaillance de la génératrice



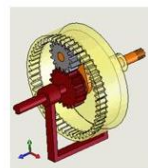
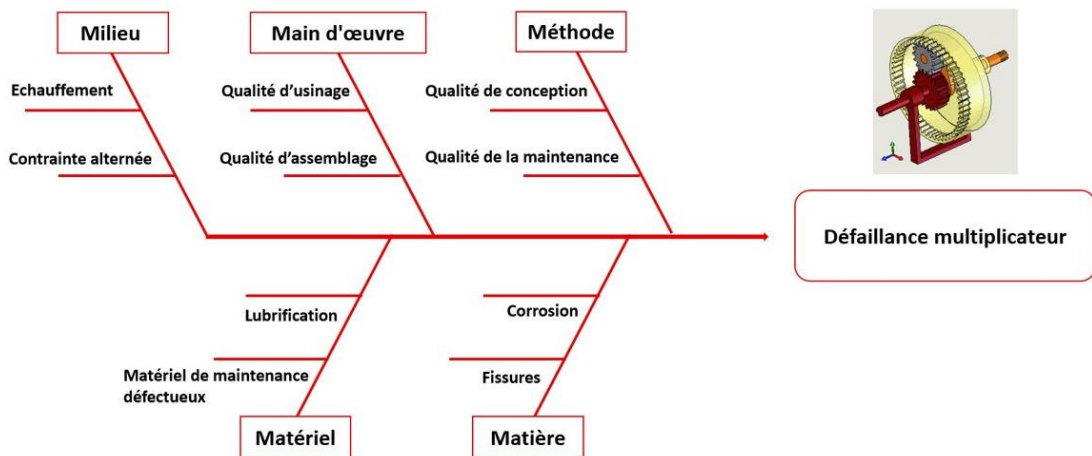
Défaillance de la génératrice

Défaillance du multiplicateur



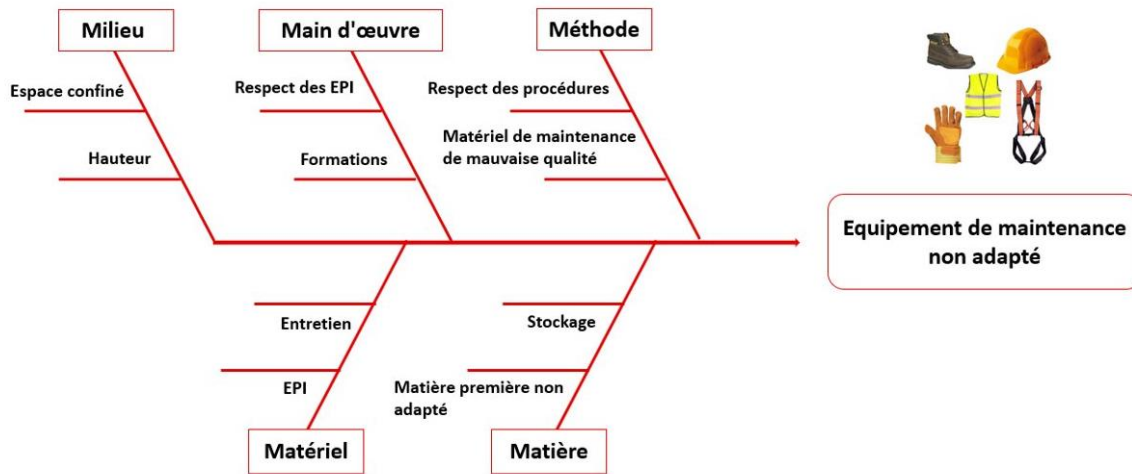
Emballlement du rotor

Emballlement du rotor

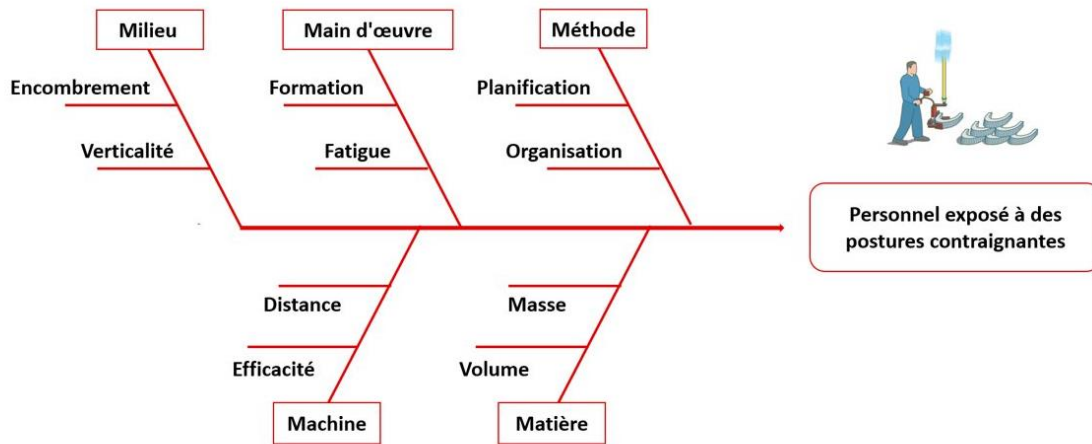


Défaillance multiplicateur

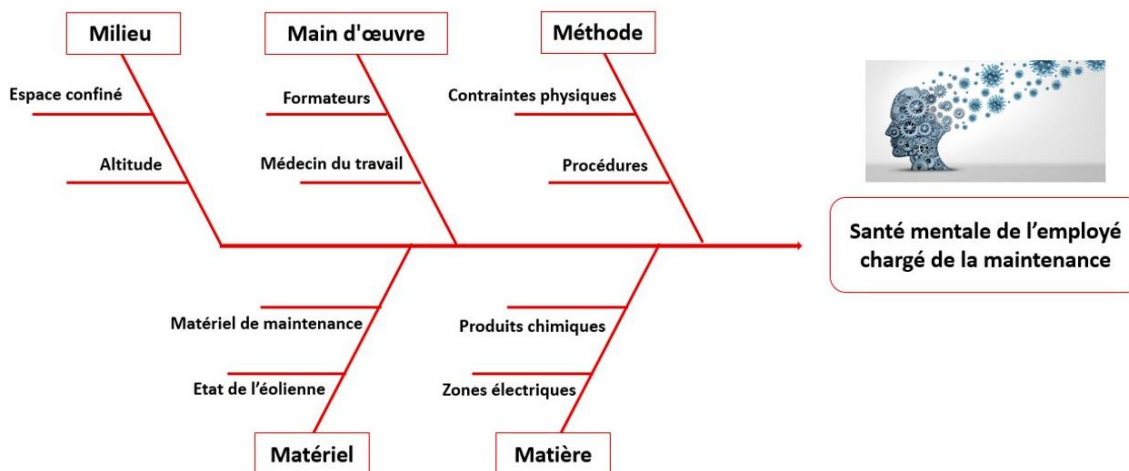
Equipement de maintenance non adaptée



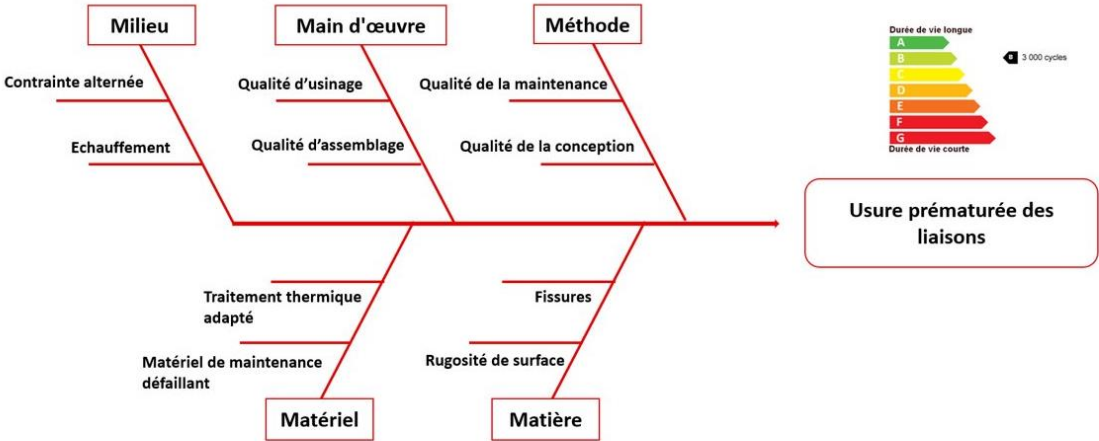
Personnel exposé à des postures contraignantes



Santé mentale de l'employé chargé de la maintenance



Usure prématurée des liaisons



INSA Toulouse

135, avenue de Ranguel
31077 Toulouse Cedex 4 - France
www.insa-toulouse.fr



MINISTÈRE
DE L'ÉDUCATION NATIONALE,
DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE