

LE REEMPLOI DES PALES D'ÉOLIENNE



OPTIMISER LE CONFORT D'ÉTÉ DU BATIMENT



SOMMAIRE

| | |
|--|---------|
| Sommaire | Page 2 |
| Introduction contextuelle | Page 4 |
| Histoire des éoliennes | Page 6 |
| Les types d'éolienne | Page 8 |
| Fonctionnement et structure | Page 9 |
| Quelques données sur la filière éolienne en France | Page 11 |
| Démantèlement et recyclabilité d'une éolienne | Page 14 |
| Composition d'une pale | Page 17 |
| Quelques exemples de réutilisation des pales | Page 19 |
| Introduction aux façades | Page 21 |
| Implémentation différenciée des façades | Page 22 |
| Différents types de brise soleil | Page 23 |
| Améliorer le confort estival dans le bâtiment | Page 25 |
| Influences des différents parcours du soleil | Page 26 |
| Phasage après démantèlement | Page 28 |
| Proposition 1 : façade dynamique | Page 29 |
| Proposition 2 : façade dynamique | Page 30 |
| Proposition 3 : façade statique | Page 31 |
| Conclusion | Page 32 |
| Bibliographie | Page 34 |
| Sitographie | Page 34 |

INTRODUCTION CONTEXTUELLE

Face aux exploits technologiques et industriels du siècle, la planète se trouve dans le fort besoin d'assouvir la demande incessante en énergie, car un des moteurs importants du développement des sociétés. D'où l'incitation à la réflexion sans cesse de nouvelles techniques de production d'énergie.

En effet, la civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18^e siècle, puis du pétrole au milieu du 20^e siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent pour les énergies renouvelables afin d'anticiper sur le tarissement de la production des énergies fossiles qui s'avèrent également très polluantes et donc constitue une menace pour la survie de notre planète. Les énergies renouvelables se définissent de façon simplifiée comme étant un mode de production d'énergie à base des ressources illimitées (solaire, hydroélectricité, l'éolien, biomasse, géothermique).

En vue de la presque non pollution et de la forte rentabilité de l'énergie éolienne, de nombreux pays vont tomber sous le charme de cette dernière et vont donc opter pour une grande mise sur sa production à l'instar de l'Allemagne, l'Angleterre, l'Espagne et la France pour ce qui est de l'Europe. La France pionnière dans la production nucléaire à 70,6 % de son électricité nationale, va se donner pour mission de baisser ce chiffre à 50 % afin de compenser avec les énergies renouvelables qui en 2021 comptent pour 21.5 % de la production nationale.

Avec un potentiel favorable de vents, la France va faire un grand pari sur l'éolien en implantant depuis 1991, un nombre important de parcs éoliens dont en 2020 s'élevaient à 1380 parcs ; totalisant près de 8000 éoliennes avec une production annuelle de 18 310 MW au 31 Juin 2021 (Journal éolienne Offshore/onshore). Ce qui a positionné la France au quatrième rang européen et au neuvième rang mondial. Cependant, la filière semble avoir les difficultés à s'inscrire totalement dans un processus d'économie circulaire qui voudrait un cycle complet de la chaîne jusqu'à la fin de vie des ouvrages avec recyclage complet de ces derniers.

La durée de vie d'une éolienne est de 20 à 30 ans. Mais depuis quelques temps, d'anciens parcs sont démantelés avant d'atteindre cet âge du fait de la forte demande tant en rentabilité qu'en transition énergétique qui demande plus de production d'énergie verte. Cependant un constat criard est fait ; celui de la non recyclabilité complète de l'ouvrage. A date, une éolienne est recyclable à 90% et le reste non recyclable concerne les pales, qui de par leurs compositions en matériaux composites ne s'adonnent pas au jeu du principe de durabilité. Après démantèlement, les pales suivent très souvent les directions de la décharge ou

de l'enfouissement, du recyclages mécano-chimique (sachant que selon Vestas, la firme danoise de fabrication des éoliennes, 30% seulement sont recyclables), le renouvellement de nouveaux parcs et en fin la réutilisation. Cette réutilisation dont la France n'a pas encore opté pour des moyens efficaces de satisfaire.

Une étude de Vestas montre que 10% du total des déchets de composites renforcés de fibres en Europe proviennent des pales d'éoliennes. Cependant, accumulées aux existantes, des milliers de pales seront démantelées dans les années à venir. Face à ce challenge dont la France devra faire face, une question importante taraude notre esprit ; **quelle solution de design faut-il implémenter pour une réutilisation efficace et durable des pales d'éolienne tout en ayant le moins d'impact sur l'environnement ?**

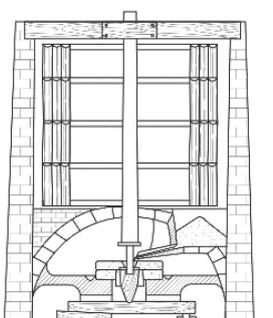
Nous nous fixons donc pour objectif de **proposer des façades dynamiques comme barrières protectrices aux bâtiments à base du matériau de pales d'éoliennes**. L'hypothèse émise est donc la suivante : **La proposition des façades dynamiques durables permettra de' améliorer le confort estival du bâtiment tout en réduisant les dépenses énergétiques et en minimisant l'emprunt carbone sur l'environnement.**

Notre travail va s'articuler dans un premier temps autour de l'histoire, de la description et du fonctionnement d'une éolienne ; la puissance de productions ; la structure et les matériaux constitutifs d'une pale, la représentation cartographiée des éoliennes de France et en fin quelques exemples d'applications de réutilisation des pales.

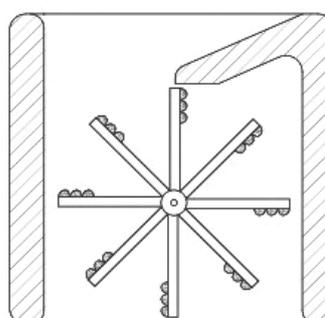
En second lieu nous nous appesantirons sur l'implémentation conceptuelle desdites façades.

HISTOIRE DES ÉOLIENNES

Depuis l'antiquité, l'énergie éolienne antique servait à faire avancer les bateaux par le mécanisme du pousse du voile par le vent. À cette même époque, l'énergie éolienne mécanique a été développée pour pomper l'eau ou pour moulin du grain. Les premières centrales éoliennes pratiques connues ont été construites à Sistan, une province orientale de la Perse (aujourd'hui l'Iran), à partir du 7ème siècle. Dénommé «Panemone», ces éoliennes étaient des moulins à vent à axe vertical, qui avaient de longs arbres d'entraînement verticaux avec des pales rec-



Panemone Iranien (Coupe)



Panemone Iranien (Plan)

Source: https://www.wikiwand.com/en/Panemone_windmill

Panemone Iranien

Source: Gharder Agheli

En 1888, Charles F. Brush, un scientifique américain, met au point la toute première turbine éolienne. Cette dernière était alors capable de générer 12 kW de puissance. Dotée d'un rotor avec 144 pales, elle était haute de 18 mètres.

Dès 1891, le danois Poul La Cour fait le constat que lorsqu'un rotor d'éolienne est muni de moins de pales, la puissance produite est supérieure. Grâce à son éolienne à 4 pales, il peut alors générer 25 kW d'électricité.

Des années 1890 aux années 1960, les ingénieurs danois, américains ou allemands n'ont cessé d'améliorer des turbines éoliennes. Alors qu'en 1888, celle de Charles F. Brush déve-

loppait 12 kW, en 1957, celle du danois Johannes Juul était capable de produire une puissance de 200 kW. Cette dernière prouesse est l'ancêtre des turbines utilisées de nos jours.

Le choc pétrolier de 1979 a conduit les pays à se tourner vers les différentes ressources d'énergies renouvelables disponibles, dont l'éolien. Le développement de la puissance et de la productivité est devenu un enjeu mondial. De 1980 à nos jours, la puissance des turbines éoliennes a été multipliée par 100. Désormais, elles génèrent entre 1500 à 4000 kW et sont en passe de produire jusqu'à 7500 kW grâce aux éoliennes de dernière génération, qui sont peu à peu installées.



Historique des éoliennes dans le monde

LES TYPES D'EOLIENNE

A- Eoliennes à axe horizontale

Les éoliennes à axe horizontal sont aujourd'hui les plus répandues. Elles sont constituées de trois éléments principaux:

- un mât **1**

qui peut être en béton ou en acier, permet de placer la nacelle et le rotor à une hauteur élevée, ce qui permet de réduire les effets dus à la rugosité du terrain et de bénéficier d'une vitesse de vent plus grande et plus régulière.

- une nacelle **2**

placée au dessus du mât, est orientable et héberge une partie des composants électrotechniques de la machine.

- un rotor **3**

Le rotor, composé généralement de trois pales, assure la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation, qui est ensuite transmise au générateur électrique ou à la pompe s'il s'agit d'une machine de pompage de l'eau.



Eolienne à axe horizontale

Source : © Maxppp -

B- Eoliennes à axe verticale

Elles ont une particularité à capter le vent dans toutes les directions. Ici, les deux technologies les plus connues sont les éoliennes Darrieus et Savonius, des noms de leurs inventeurs.

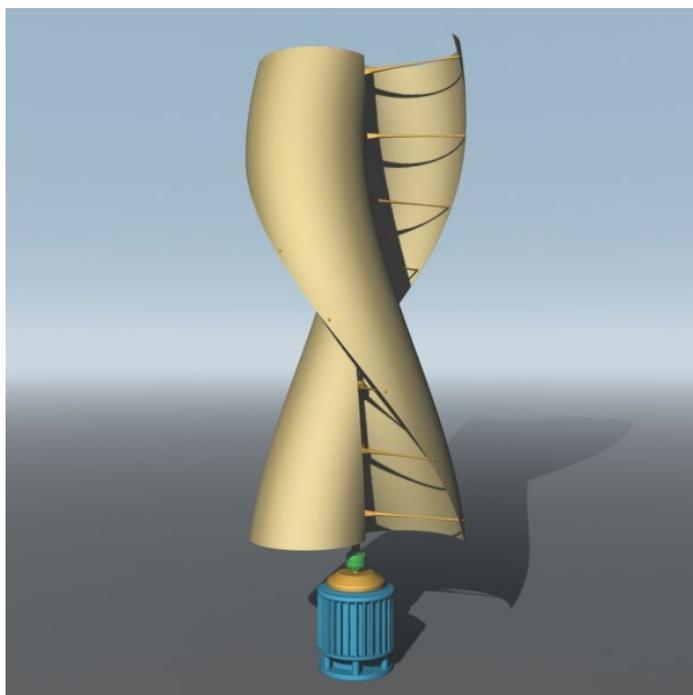
L'éolienne Savonius est constituée de deux demi-cylindres verticaux placés de telle sorte que leur coupe forme une sorte de S centré sur l'axe. Très silencieuse, cette éolienne s'intègre bien en milieu urbain.

L'éolienne Darrieus est actionnée par les forces de portances produites par un ensemble de profils d'aile en forme de batteur à œufs.



Eolienne Darrieus

Source : fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Darrieus_rotor001.jpg



Eolienne Savonius

Source : www.turbosquid.com/fr/3d-models

FONCTIONNEMENT ET STRUCTURE

Une éolienne est un dispositif qui permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

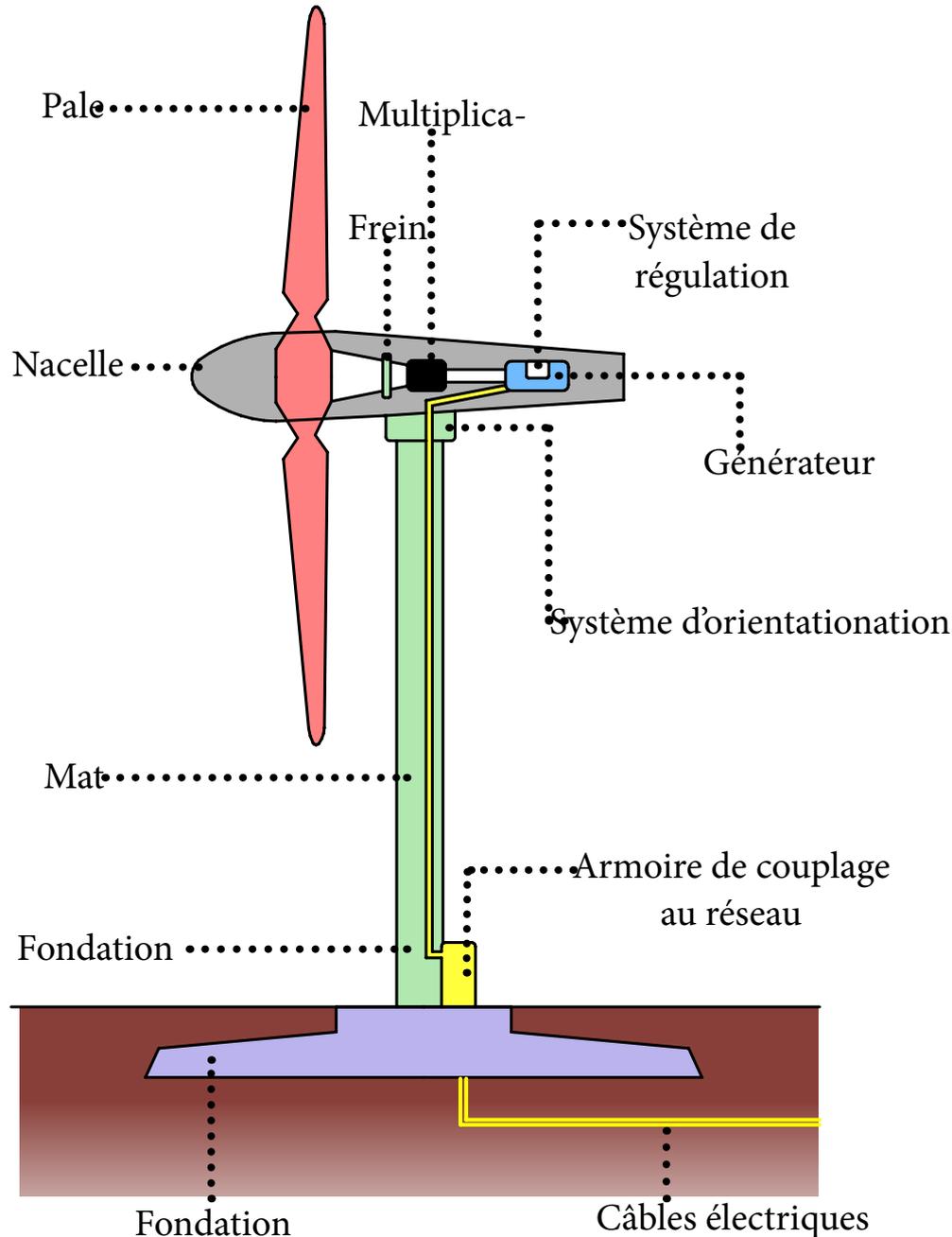
Cette conversion se fait en plusieurs étapes :

- Dans un premier temps, la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique sous l'effet du vent, mettant en mouvement le rotor qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

- Ensuite, un multiplicateur placé dans la nacelle va accélérer le mouvement de rotation du rotor. Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande.

-Et puis l'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. En tournant à grande vitesse, le générateur produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts

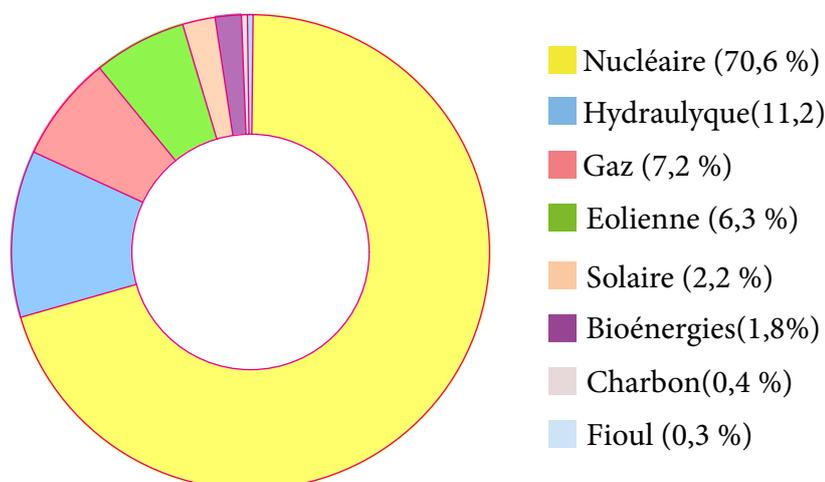
- En fin le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur : l'électricité produite ne peut pas être utilisée directement. Elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est élevée à 20 000 volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers des câbles jusqu'à un poste de transformation pour être injectée sur le réseau électrique.



Coupe d'une éolienne
Source : notre étude

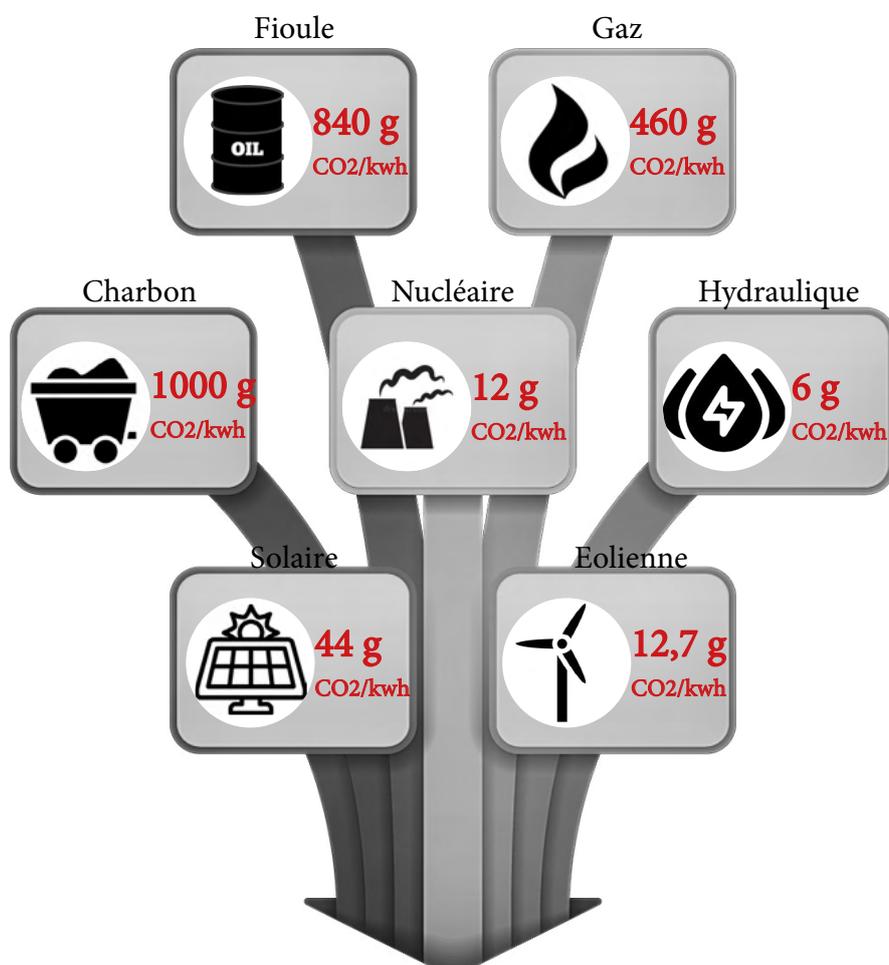
QUELQUES DONNÉES SUR LA FILIÈRE ÉOLIENNE EN FRANCE

a- Place des éoliennes dans le mix énergétique en France (2020)

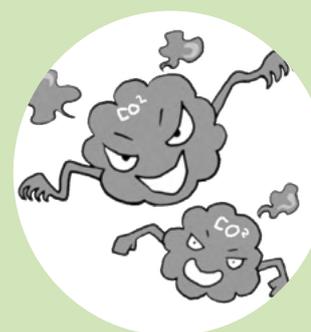


Source : EEE (France energie eolienne)/rapport sur l'observatoire de l'éolien

b- Bilan carbone (Emission de CO₂)

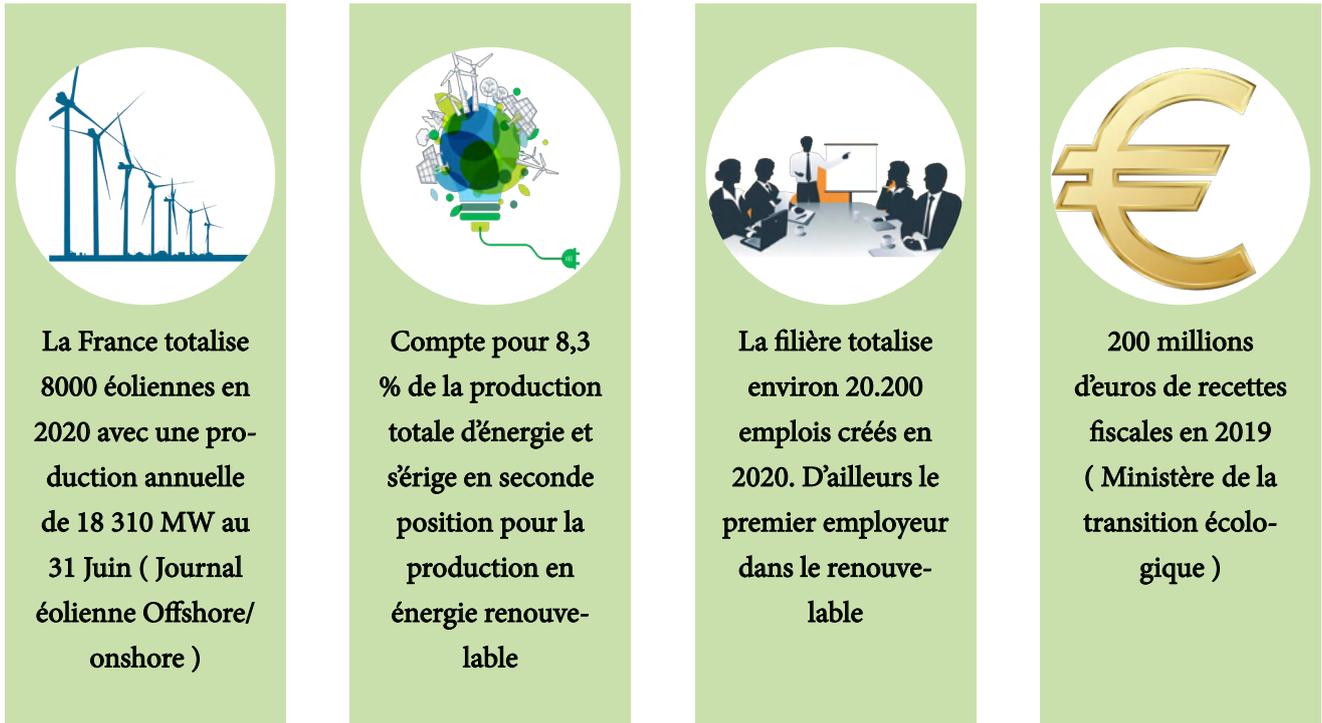


Source : FE (France energie eolienne)/rapport sur l'observatoire de l'éolien



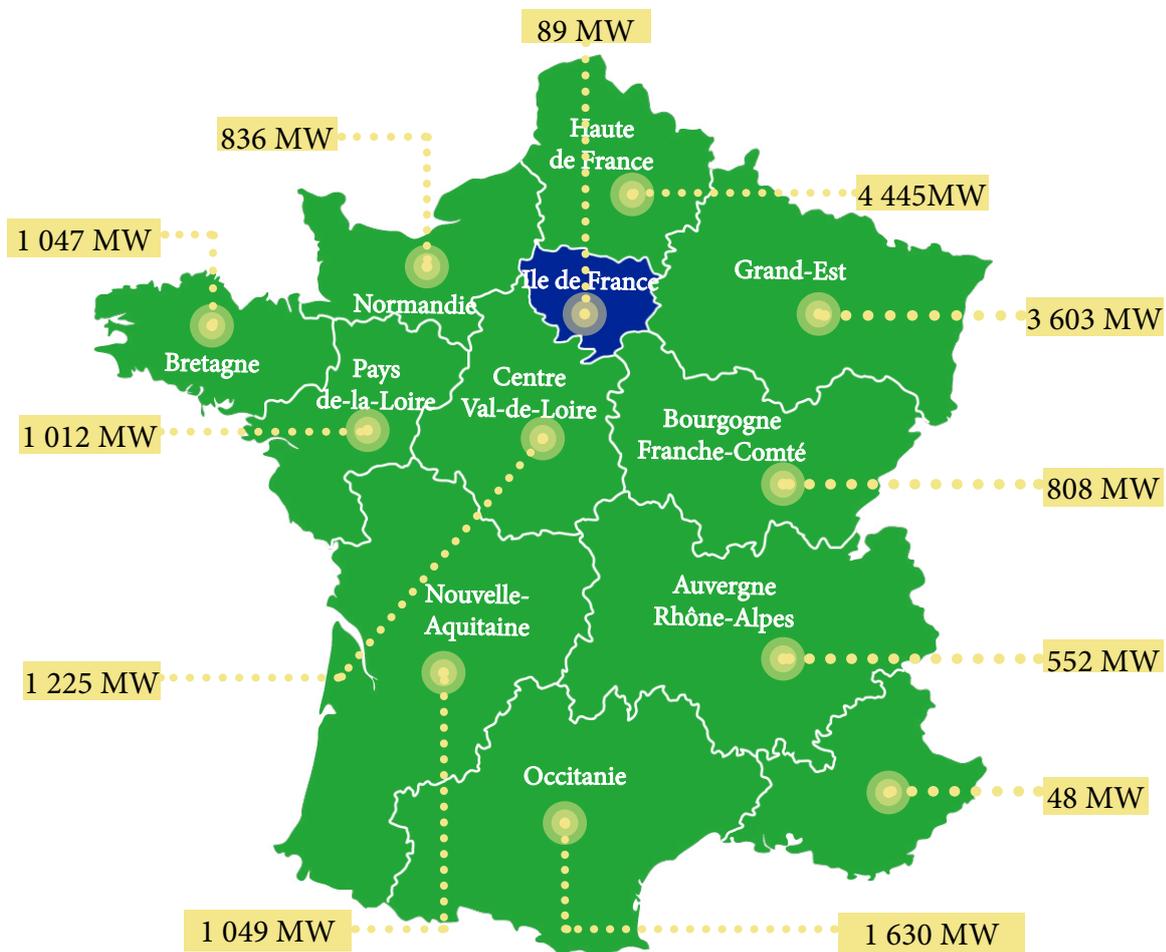
Les gaz à effet de serre sont les gaz qui ont la capacité d'absorber les radiations infrarouges provenant de la Terre, d'augmenter l'effet de serre et d'accroître le réchauffement de la température à la surface de la Terre.

c- Quelques chiffres importants



Source : EEE (France energie eolienne)/rapport sur l'observatoire de

d- Puissances par région des installations éoliennes (EDF 2019)

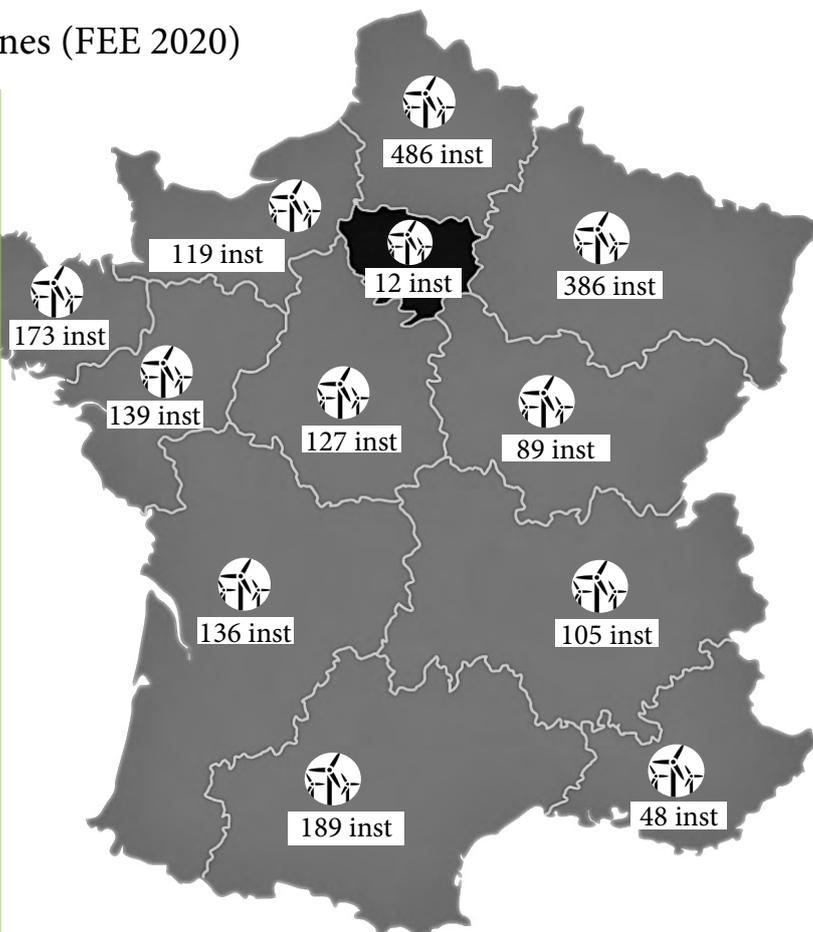


Source : EEE (France energie eolienne)/rapport sur l'observatoire de

e- Carte de repartition des eoliennes (FEE 2020)

On peut noter que l'importance des puissances des parcs éoliens n'est pas toujours fonction du nombre d'ouvrages implantés. La puissance dépend fortement de la dimension d'une installation ; sachant que la hauteur d'une éolienne terrestre est comprise entre 120 et 155 m.

La région française dont la puissance cumulée des parcs est la plus élevée est l'île de France suivi du Grand Est; cependant la carte de répartition nous montre combien est plus important le nombre d'installations dans le Grand Est. Cela s'explique très clairement par la carte de vent qui suit.



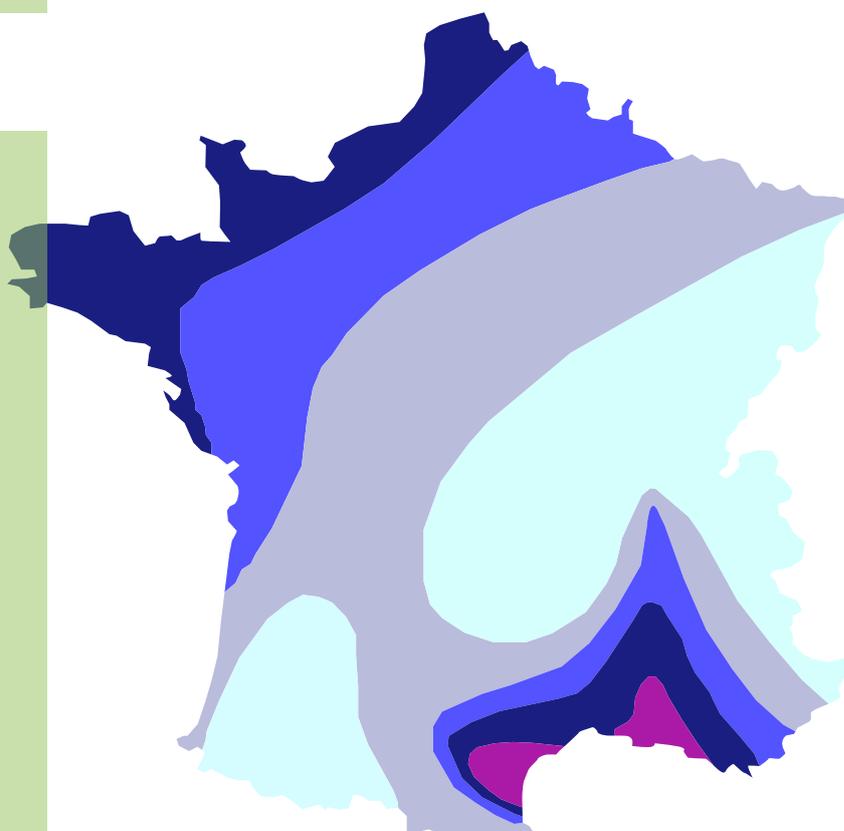
f- Carte des vents

Pour pouvoir démarrer, une éolienne nécessite une vitesse de vent minimale d'environ 15 km/h.

Cependant pour des questions de sécurité, l'éolienne s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le vent excède 90 km/h.

Une éolienne tourne pour un vent supérieur à 15km/h (4m/s) et inférieur 90km/h (25m/s). Pour une vitesse comprise entre 40-50km/h (12m/s), le rotor est à son meilleur rythme de production.

Les parcs éoliens sont installés avec un accents judicieusement porté sur les courses des vents selon qu'ils sont forts ou faibles dans certaines localités. La carte ci-près donne l'état des lieux des vents sur l'étendue du territoire français.



Nature et vitesse moyenne du vent ($m \cdot s^{-1}$)

| | | | |
|-------------|-----|---------------|-----|
| Peu de vent | 5 | Vent soutenu | 8.2 |
| Vent faible | 5.9 | Vent puissant | 8.7 |
| Vent Moyen | 7.3 | | |

DEMENTELEMMENT ET RECYCLABILITE

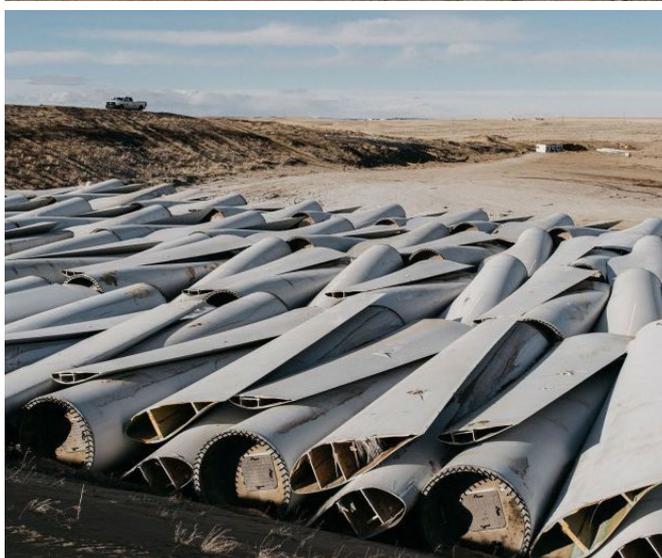
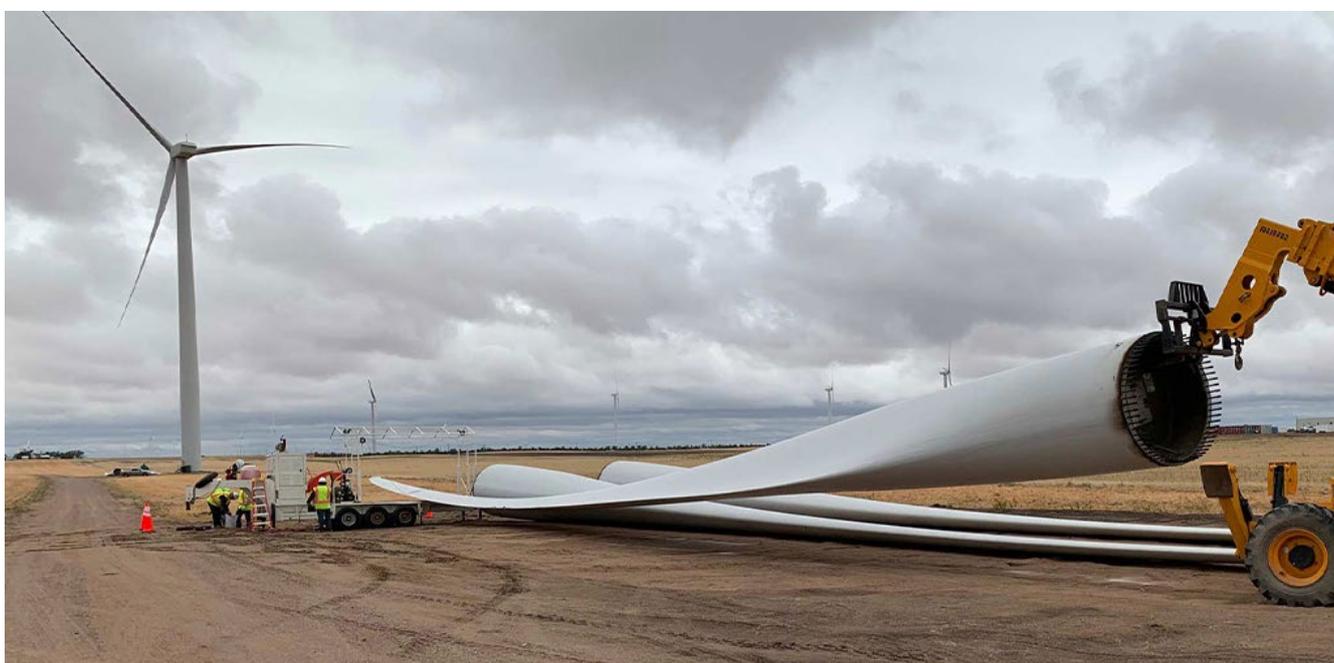
Notons qu'une éolienne vieille a moins de rentabilité qu'une installation neuve. D'où la raison de démanteler dès l'atteinte de son cycle de vie.

La durée de vie d'une éolienne est de 20 à 30 ans. Mais depuis quelques temps, d'anciens parcs sont démantelés avant d'atteindre cet âge du fait de la forte demande tant en rentabilité qu'en transition énergétique qui demande plus de production d'énergie verte.

Ce démantèlement ne saurait se faire sans avoir en présage la recyclabilité de l'ouvrage

bien que s'avère très complexe la réutilisation des pâles du fait de sa faisabilité en matériaux composites.

Néanmoins, des structures telles que Vestas se donnant pour ambition de fabriquer d'ici 2040 des éoliennes zéro déchet, ont trouvé pour l'instant des processus de recyclages des pales par voie mécanique, thermique et chimique. Il est donc question de les démonter pour extraire les matières de base telles que les fibres en vue de leur réutilisation.



Images du démantèlement d'éoliennes

Source : www.crash-aerien.news/forum

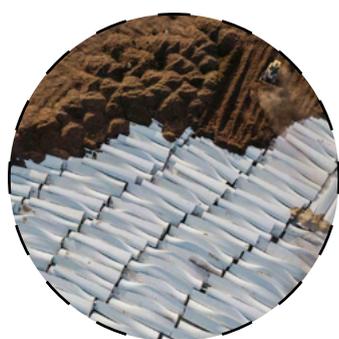
RECYLABILITE DES EOLIENNES

Il faut noter qu'une éolienne est à 90% recyclable. Le pourcentage non recyclable concerne les pâles du fait de leur composition.

Les pales vont donc prendre plusieurs directions après démantèlement à savoir la décharge ou l'enfouissement, l'incinération dans des cimenteries où elles servent de combustibles, la réutilisation dans le renouvellement de nouveaux parcs et le réemploi dans le design.

Toujours est-il que jusqu'à présent aucune solution ne respecte pleinement le principe de durabilité. D'ailleurs la solution la plus répandue est la décharge car moins coûteux économiquement, mais cependant très coûteux environnementalement.

De nombreux pays tels que Finlande, Pays-Bas, Allemagne et Autriche ont procédé à l'interdiction de décharge; ce qui a amené l'organisation WindEurope à réclamer une interdiction généralisée de l'enfouissement à l'horizon 2025 dans l'UE.

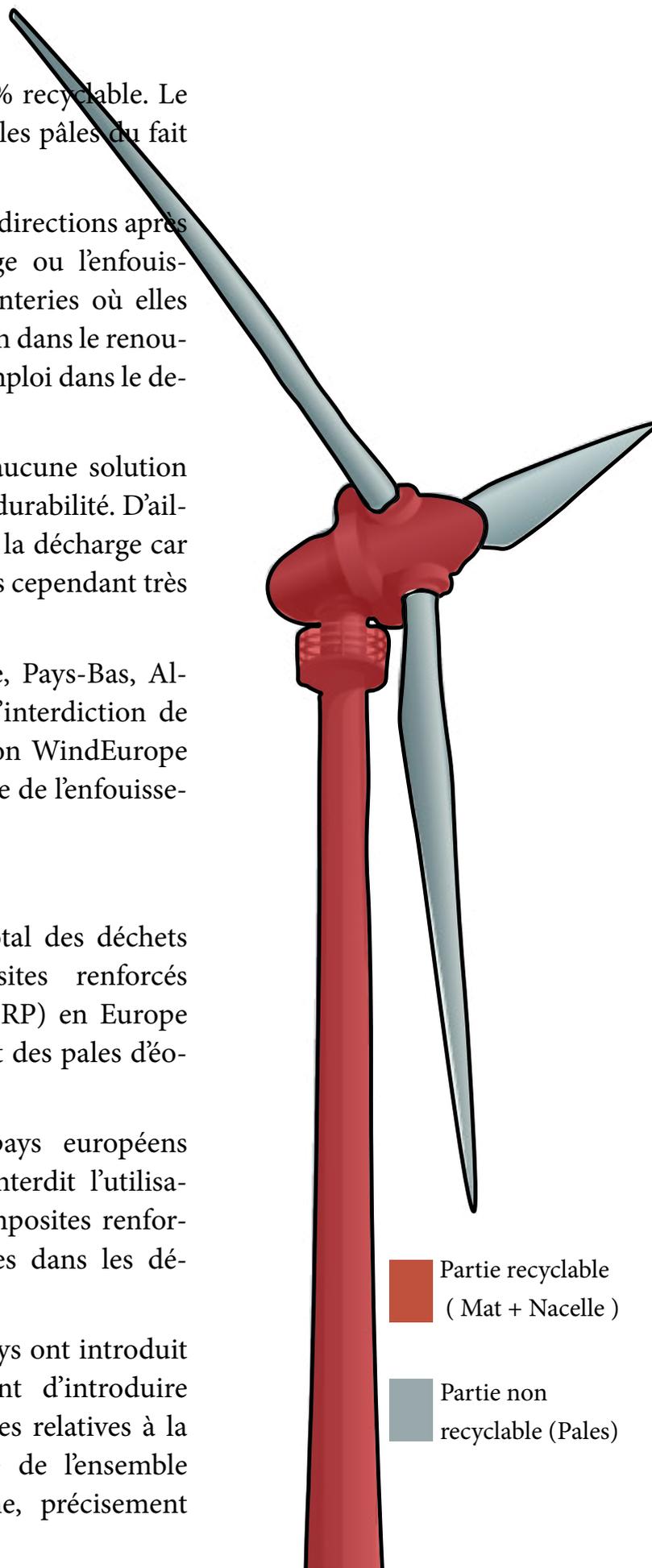


10 % du total des déchets de composites renforcés de fibres (FRP) en Europe proviennent des pales d'éoliennes.

Plusieurs pays européens ont donc interdit l'utilisation de composites renforcés de fibres dans les décharges.



Certains pays ont introduit ou prévoient d'introduire des exigences relatives à la recyclabilité de l'ensemble de l'éolienne, précisément les pales.



+ 22.000 Km



Mises bout à bout, les pales mondiales représentent la moitié du périmètre du globe terrestre.

+ 10.000.000 t

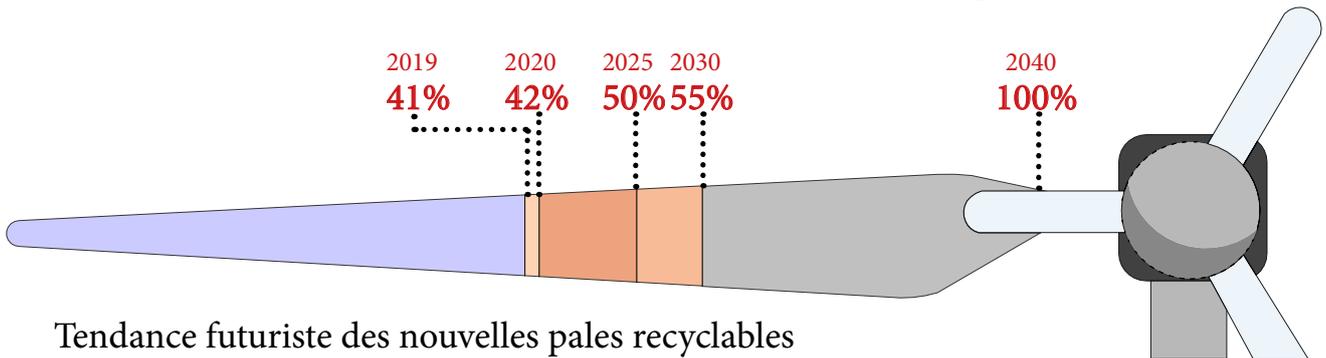


Le poids mondial des pales d'éoliennes représente 10.000.000 t soit 1.600.000 éléphants.

Source : Etude de la compagnie Vestas (rapport 2020)

Vu l'enjeu, la compagnie Vestas ambitionne fabriquer des pales 100% recyclables d'ici 2040 donc le schéma ci-contre illustre l'évolution. L'innovation ne consiste pas ici en un bouleversement

du processus de production des pales, mais de mettre sur pieds un nouveau type de résine permettant de séparer efficacement la résine des autres composants à la fin de la vie de la pale



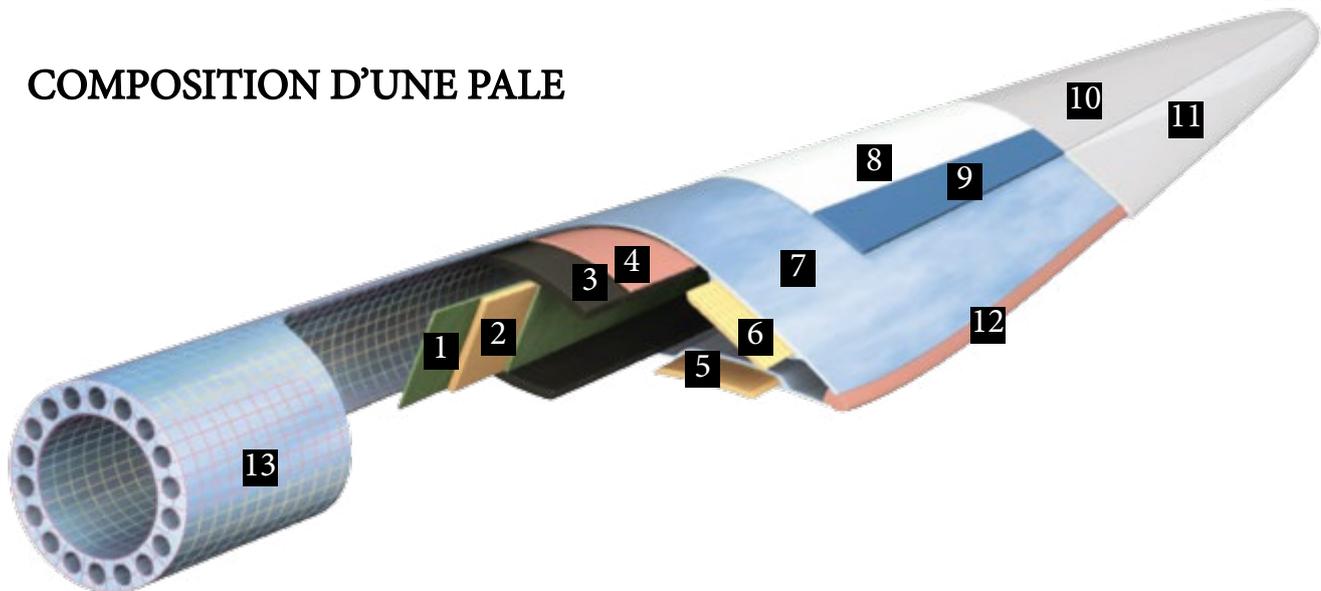
Tendance futuriste des nouvelles pales recyclables

Ces nouvelles pales pour le moment ne concernent que les éoliennes en mer.



Source :

COMPOSITION D'UNE PALE



- 1- Bande de cisaillement : infusion, pré-imprégné, sprint
- 2-cellule centrale
- 3- Spar : Verre, carbone
- 4- Spar : Verre, carbone
- 5- Noyau préimprégné
- 6- Noyau d'infusion
- 7- Coque : sprint, préimprégné, infusion
- 8-amorçage : gelcoat UV
- 9- Sprint IPT
- 10-Finition : peinture PU
- 11-Gelcoat epoxy
- 12- Adhésif structurel
- 13- Racine : sprint, infusion ,préimprégné

En effet, plusieurs types de matériaux qui entrent dans la fabrication d'une pale éolienne selon les variétés:

Le bois : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue, mais sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.

Le lamellé-collé : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue à la fatigue.

Les alliages d'aluminium : pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.

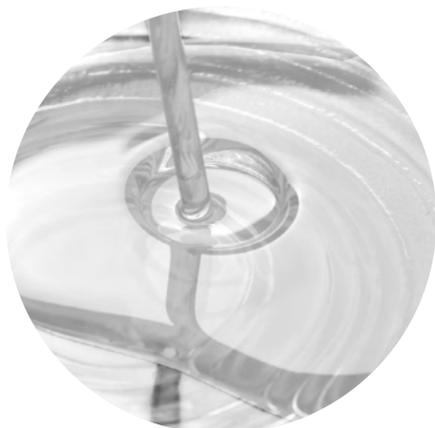
Les matériaux composites : Leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées.

Les matériaux composites couramment utilisés sont la fibre de verre et la fibre de carbone pour les nouvelles générations d'éolienne.



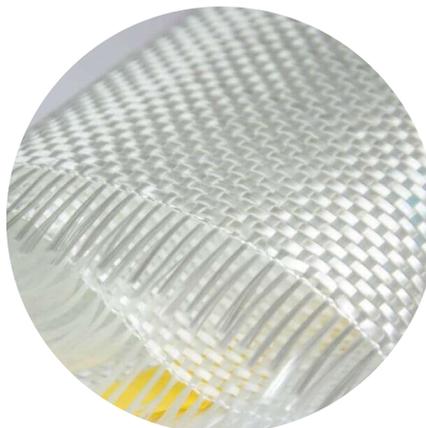
Moule de façonnage de la pale

Résine (Epoxy)



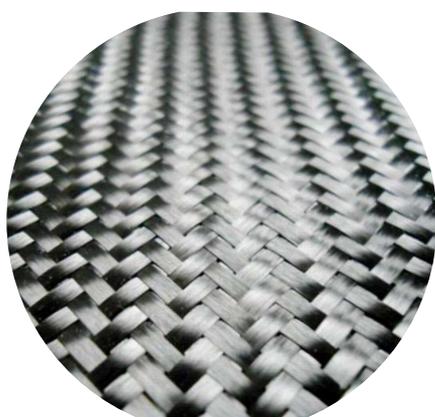
Le principal avantage de la résine époxy est sa capacité à changer de propriétés quand elle est sèche. Une fois durcie, la résine époxy est hermétique aux éléments qui l'entourent et sa résistance est élevée à la traction et à

Fibre de verre



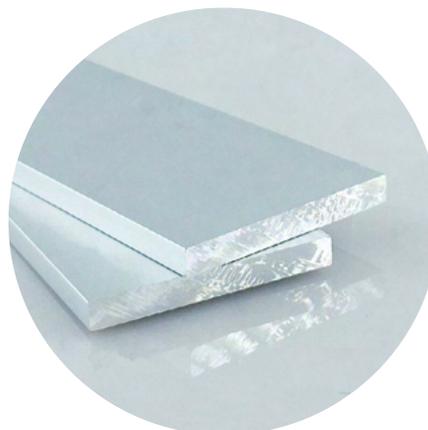
Résistance élevée à la traction et à la compression, flexibilité, forte rigidité, bonne conductivité électrique et thermique, bonne tenue en température

Fibre de Carbone



Résistance élevée à la traction et à la compression, flexibilité, forte rigidité, bonne conductivité électrique et thermique, bonne tenue en température

Métal

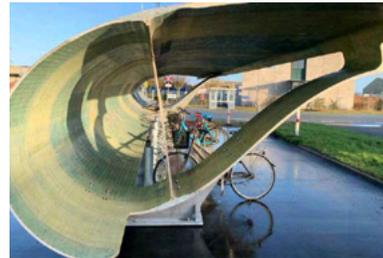


Très résistant à la corrosion et permet ainsi de réaliser des ouvrages dont l'entretien sera minimal. Il importe toutefois de sélectionner correctement les alliages ainsi que les méthodes d'assemblage pour assurer le maximum de sa durabilité. élevée à la traction et à la compression, sa flexibilité, sa bonne conductivité électrique et thermique, sa tenue en température et son inertie chimique (sauf à l'oxydation).

QUELQUES EXEMPLES DE REUTILISATION DES PALES

Au vu de l'enjeu, le recyclage des pales devient une nécessité écologique et économique. La réutilisation des pales est donc effective il y a quelques années principalement en guise de design public.

Le réemploi va permettre de d'aménager les espaces publics, les espaces de jeux pour enfant, créer des bancs publics, les ponts, les abris vélos, le revêtement du sol, etc.



APPROCHE PROPOSITIONNELLE

INTRODUCTION AUX FAÇADES

Aujourd'hui, maîtriser la consommation d'énergie et créer des bâtiments plus durables est désormais une priorité. La gestion efficace de la lumière du jour a un rôle important et la protection solaire dynamique peut aider à réduire les coûts énergétiques pour le refroidissement et le chauffage dans les bâtiments jusqu'à 70 %.

Les façades sont la partie la plus stratégique et la plus visible du bâtiment, ce qui conduit à une amélioration de l'aspect et des performances environnementales des bâtiments. Les façades jouent un rôle important dans la qualité d'un bâtiment. Il forme la barrière entre l'espace intérieur et le climat extérieur. Cela signifie que la façade est le support par lequel l'interaction a lieu entre les activités, à l'intérieur et à l'extérieur. L'image d'un bâtiment, et donc pour les utilisateurs, se reflète à travers la conception de la façade. Dans les pratiques récentes, les architectes et les ingénieurs conçoivent et installent stratégiquement des façades dynamiques non seulement pour leurs valeurs esthétiques, mais aussi pour améliorer l'énergie des bâtiments. La forte intégration de ces stratégies pour les façades dynamiques augmente leur durabilité et leur adéquation, avec les exigences actuelles des bâtiments, qui visent l'efficacité énergétique et le niveau de confort thermique. En attendant, des études récentes montrent que la majorité des gens passent jusqu'à 90 % de leur temps à l'intérieur, en particulier dans les climats chauds. Cette tendance a eu un impact important sur les exigences de l'environnement intérieur, transformant ainsi les bâtiments en dispositifs complexes qui assurent le bien-être des personnes qui les utilisent. Par conséquent, les utilisateurs commencent à rechercher de nouveaux produits pour la conception de façades conformes aux exigences énergétiques.

DÉFINITION DES FAÇADES

La façade fait partie du tissu urbain qui construit la ville. Il s'agit d'un élément crucial, surtout si l'on considère les bâtiments publics ou commerciaux ou même les bureaux sur les avenues et les rues importantes. L'impact visuel de toute structure pour un profane est principalement associé à la grandeur de la structure, à son esthétique, à son caractère unique et à son caractère captivant. Pour couronner le tout, les gens deviennent de plus en plus conscients de leur environnement et préfèrent des idées et des conceptions durables et respectueuses de l'environnement.

Avec l'utilisation de matériaux et de technologies dans un ensemble donné de limites et de conditions, les habillages de l'architecture contemporaine sont classés en « dynamiques » et « statiques ». L'enveloppe du bâtiment agit comme une peau, un intermédiaire entre l'intérieur et l'extérieur. Cette peau a évolué au fil du temps, avec l'aide des solutions techniques ; les façades dynamiques ont pour but d'accompagner le progrès d'une architecture durable. Les façades dynamiques agissent comme des filtres entre l'intérieur et l'extérieur, permettant aux utilisateurs de fournir une ombre, un ensoleillement, une ventilation appropriée et une union visuelle avec le monde en mouvement à l'extérieur.

Grâce à des stratégies de conception entièrement intégrées, la façade d'aujourd'hui peut

fournir des enveloppes réactives et performantes qui réagissent à la fois contextuellement et conceptuellement à leur environnement local, tout en déterminant simultanément les conditions intérieures ; C'est une vérité indéniable que la façade dans l'architecture d'aujourd'hui devient tout aussi complexe que la structure du bâtiment.

Il est à noter que l'environnement est le facteur clé qui impacte la conception des façades ; la quantité de stratification et le choix du matériau, tout dépend de ces forces externes. Afin de mieux appréhender l'idée globale de la façade dynamique, en voici plusieurs types :

1. Façade dynamique contrôlée par l'utilisateur
2. Façade dynamique de projection lumineuse
3. Façade dynamique de contrôle de la lumière
4. Façade dynamique sensible au vent
5. Façade dynamique verte saisonnière

IMPLÉMENTATION DIFFÉRENCIÉE DES FAÇADES

Une compréhension de la géométrie solaire nous montre que l'exposition de chaque façade au soleil est différente et varie selon l'orientation. Chaque orientation du bâtiment nécessite une approche différente de la conception de l'ombrage.

- **L'élévation Nord** ne nécessite essentiellement pas d'ombrage car, sauf pendant les mois d'été tôt le matin et tard le soir, aucune pénétration du soleil ne se produit. A cette heure de la journée, l'angle du soleil est si faible que les projections horizontales seraient inutiles comme dispositifs d'ombrage. Il est préférable de limiter autant que possible la fenestration sur l'élévation nord car il y aura très peu de gain de chaleur solaire et beaucoup de perte de chaleur directe de ce côté. Si une fenestration est requise pour l'éclairage naturel, il est alors important de sélectionner un ensemble de vitrage hautement efficace pour réduire le transfert d'énergie.

- **L'élévation Sud** permet le contrôle le plus facile de l'énergie solaire. Les dispositifs d'ombrage sont normalement conçus comme des projections horizontales au-dessus des fenêtres. La longueur de la projection est déterminée comme une fonction géométrique de la hauteur de la fenêtre et de l'angle d'élévation du soleil à midi solaire. De tels dispositifs d'ombrage peuvent être conçus pour éliminer complètement la pénétration du soleil en été et permettre une pénétration complète du soleil pendant l'hiver lorsque cela est souhaité pour un gain de chaleur passif.

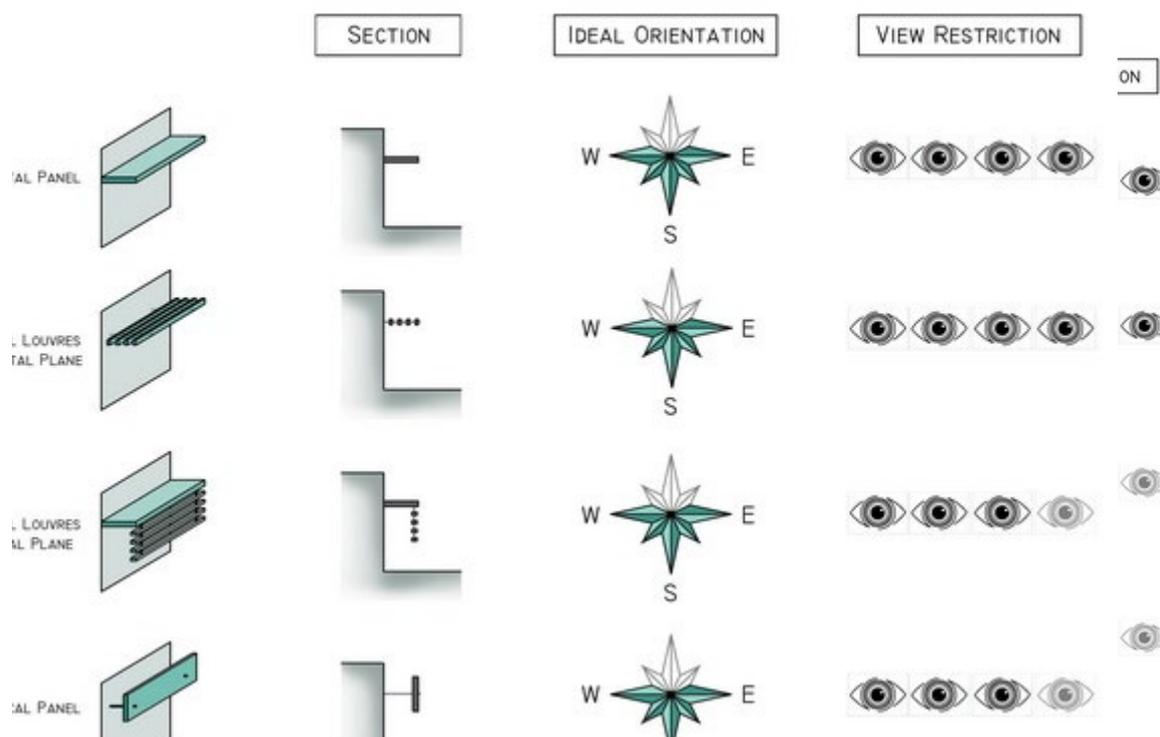
- **Les élévations Est et Ouest** sont toutes deux difficiles à ombrager architecturalement. Les angles du soleil le matin et l'après-midi sont suffisamment bas pour empêcher l'ombrage à l'aide de surplombs. Le soleil du matin est normalement plus frais et moins agressif que la chaleur et l'éblouissement du soleil de fin d'après-midi.

Les dispositifs d'ombrage pour éviter la chaleur doivent être conçus pour être efficaces au-delà de la géométrie du solstice d'été lorsque le soleil est le plus haut dans le ciel. Selon les conditions climatiques locales, le refroidissement peut être une priorité du milieu du printemps au début de l'automne. La longueur du dispositif d'ombrage orienté sud doit être dimensionnée pour cette saison prolongée.

Différents types de Brise soleil

Les types de base de dispositifs d'ombrage extérieur peuvent être identifiés comme HORIZONTAL ou VERTICAL. Lors de la conception de dispositifs d'ombrage pour éviter la chaleur, il est important de peser également la quantité de pénétration solaire souhaitée pendant les mois de chauffage. Lorsque les degrés-jours de chauffage dépassent largement les degrés-jours de refroidissement (dans les climats FROID), il est clair de ne pas compromettre le potentiel de gain solaire pendant les mois d'hiver. Lorsque les degrés-jours de refroidissement dépassent les degrés-jours de chauffage (climats CHAUDS), l'ombrage devrait être efficace pendant une période plus longue. Dans certains climats, cela peut justifier la quasi-élimination des fenêtres orientées au sud, avec déférence pour les fenêtres orientées vers le nord pour favoriser la lumière du jour.

Les ombrages horizontaux sont adaptés aux expositions sud. Les surplombs de toit peuvent également être facilement utilisés pour ombrager les expositions sud des bâtiments de faible hauteur.



Typologie de base des dispositifs d'ombrage horizontaux pour les expositions au sud

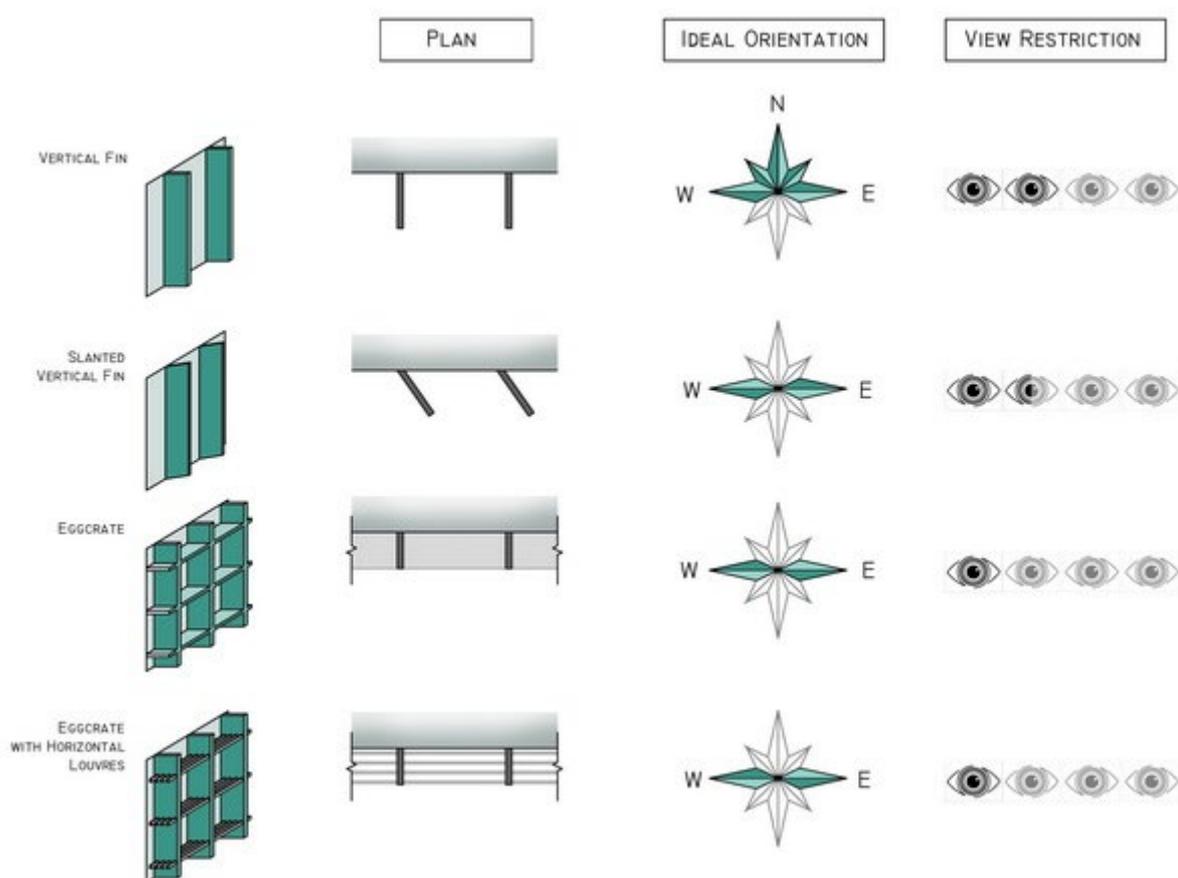
Source : article de la CND (carbon neutral Design)

Là où le soleil frappe la façade depuis le sud-est ou le sud-ouest, les dispositifs verticaux peuvent bloquer efficacement le soleil. Les caisses à œufs sont également souvent utilisées sur des élévations non orientées vers le sud.

La configuration générale du bâtiment peut également être modifiée pour modifier l'orientation des fenêtres pour éviter la chaleur.

Diverses configurations planimétriques de dispositifs d'ombrage non orientés sud

Pour des raisons à la fois d'évitement de la chaleur et d'économie, il est souvent préférable de « grouper » les dispositifs d'ombrage orientés vers le sud. Afin d'obtenir de l'ombrage en fin de matinée et en début d'après-midi lorsque le soleil n'est pas à son zénith, le dispositif d'ombrage doit être prolongé de part et d'autre de l'ouverture de la fenêtre.



Dispositifs d'ombrage pour les expositions non méridionales

Source : article de la CND (carbon neutral Design)

Améliorer le confort estival dans le bâtiment



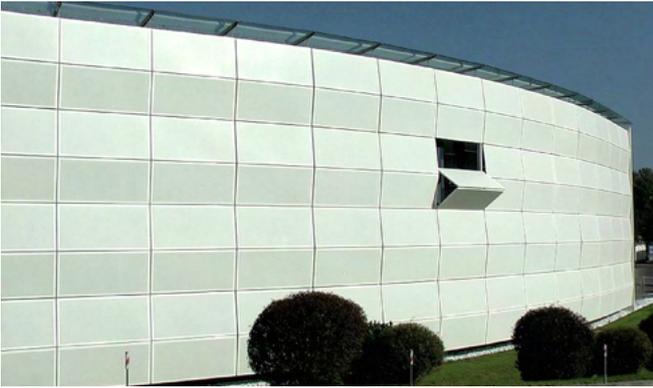
En France, les bâtiments c'est 45% de la consommation d'énergie totale et contribuent à 25% des émissions de gaz à effet de serre.

On note que durant les périodes estivales, de nombreux bâtiments sont exposés aux rayonnements brusques du soleil. Cela va engendrer l'activation du processus de rafraîchissement par la climatisation; qui va à son tour générer d'énormes dépenses énergétiques. Une autre conséquence de la climatisation sera la création des fluides dans l'air qui à la longue sont nocifs pour l'environnement.

Alors que le réchauffement climatique bat son plein, il est plus qu'important de trouver des solutions palliatives pour réduire les dépenses énergétiques du bâtiment; et par conséquent diminuer leur impact sur l'environnement.

Assurer un bon confort estival reposera donc sur la possibilité de limiter la pénétration de la chaleur dans le bâtiment. Sensible au problème, nous ambitionnons de proposer des façades dynamiques comme barrières protectrices du bâtiment qui permettront également un contrôle d'énergie.

Quelques exemples de protection contre l'ensoleillement



Kiefer Technic Showroom (Autriche)
Façade dynamique et automatique

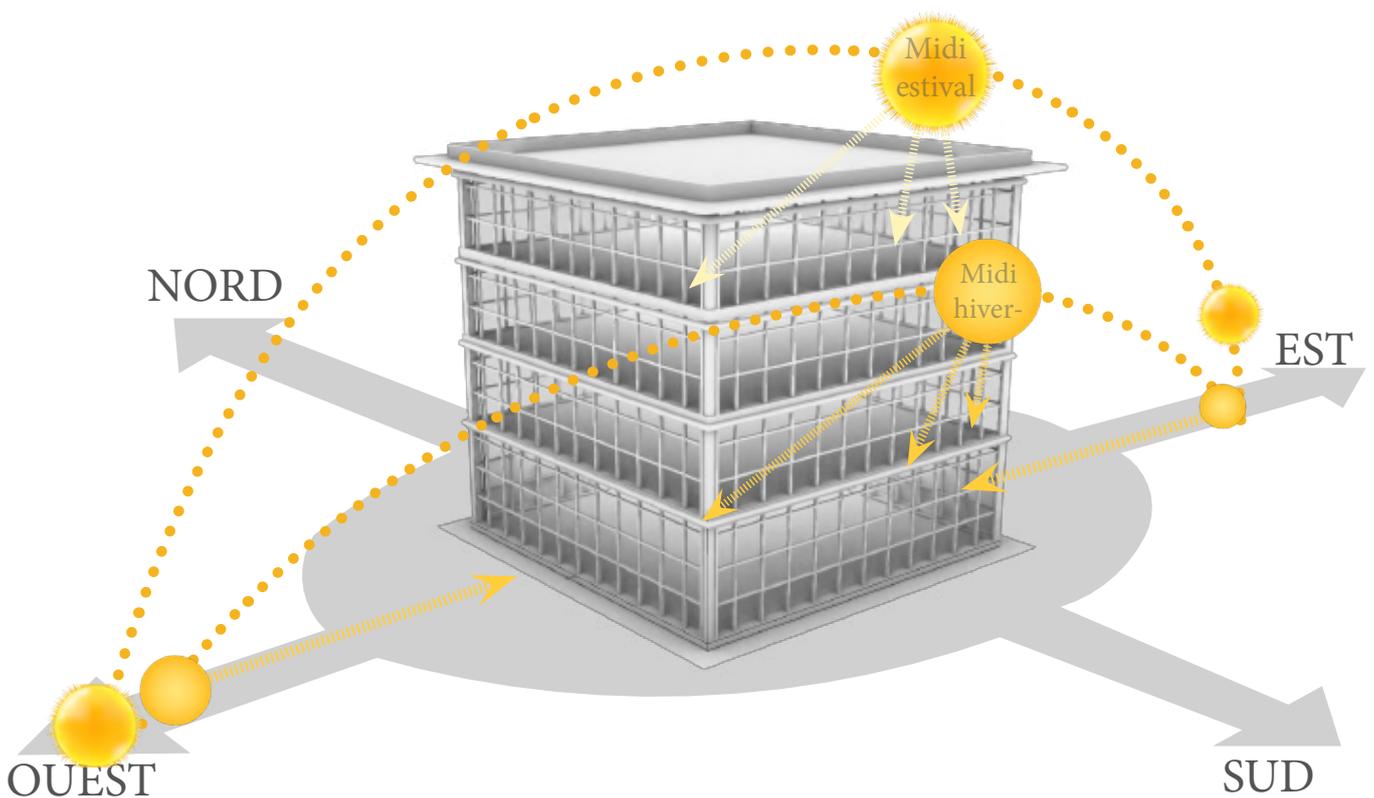


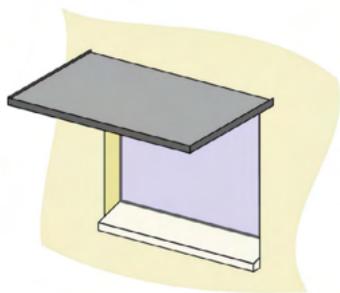
Système de persiennes mobiles automatiques en aluminium (par la firme allemande GLASSCON)

La grande question est donc de proposer un design qui permet:

- éviter les surchauffes estivales,
- limiter les déperditions hivernales,
- assurer une bonne ventilation,
- procurer une lumière suffisante pour limiter l'éclairage artificiel.

Influences des différents parcours du soleil

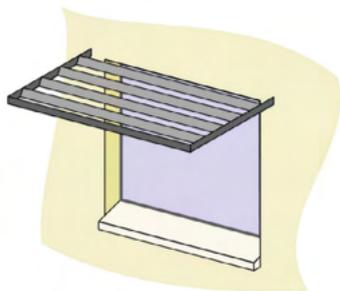




Les petites baies peuvent être protégées par de petites persiennes horizontales.

La limite est vite établie face à des grandes façades vitrées et dont il faudrait penser une conception optimale pour les protéger.

Nos propositions prennent en compte tous ces paramètres.



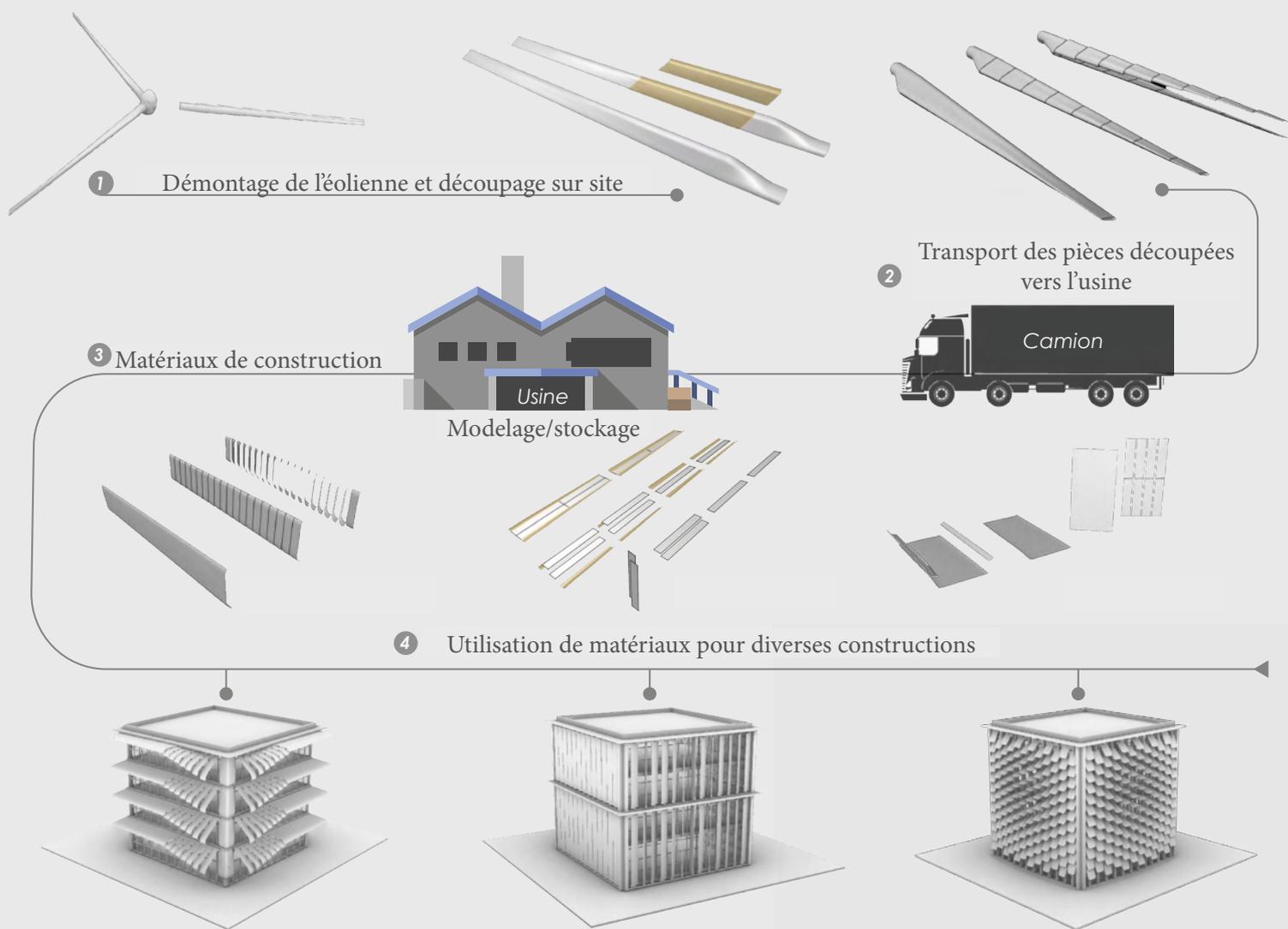
La façade Sud permet le contrôle le plus facile de l'énergie solaire. Les dispositifs d'ombrage sont normalement conçus comme des projections horizontales au-dessus des fenêtres.

La façade Nord ne nécessite essentiellement pas d'ombrage car les rayons du soleil sont quasi-absents.

Les façades Est et Ouest sont toutes deux difficiles à ombrager architecturalement. Les angles du soleil le matin et l'après-midi sont suffisamment bas pour empêcher l'ombrage à l'aide de surplombs. Et donc nécessitent les éléments verticaux pour protection.



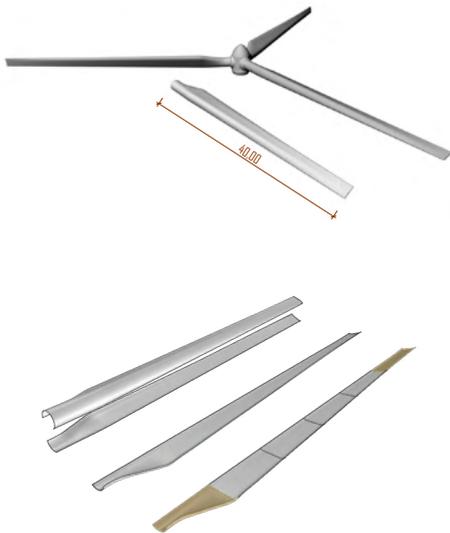
Phasage après démantèlement



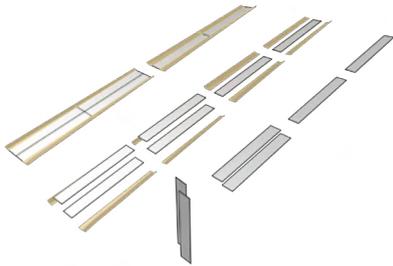
Après démantèlement, les pales vont être découpées sur le site pour éviter la complexité du transport. D'autant qu'on parle de réchauffement climatique, on a jugé nécessaire d'éviter l'entrée en matière de grands semi-remorques pour évacuer les pales du site en entières. Ainsi découpées sur le site en des dimensions facilement transportables, elles sont transportées par camion pour des usines de modelage et de stockage à des fins de matériaux de construction qui seront ensuite acheminés dans les chantiers de construction.

Proposition 1 : façade dynamique

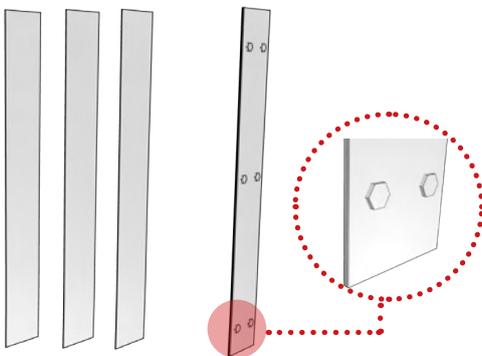
Démarche



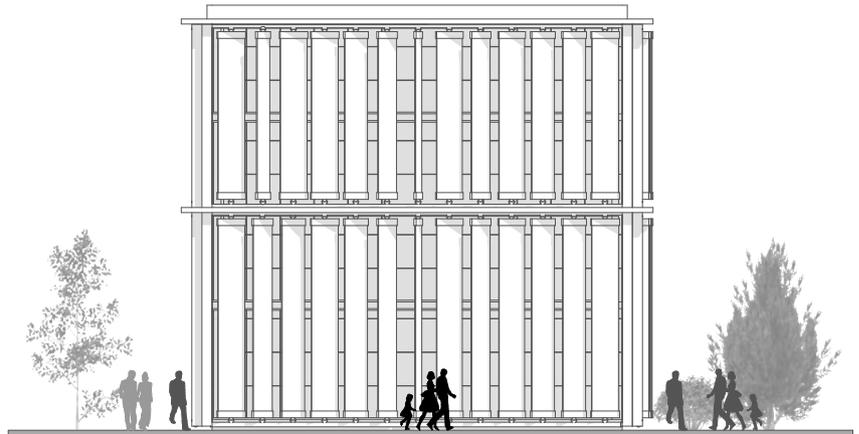
la pale est dans un premier temps divisée en deux puis sectionnée



La seconde moitié est ensuite séquençée en éléments rectangulaires



Assemblage de trois éléments par vissage pour une solidité optimale

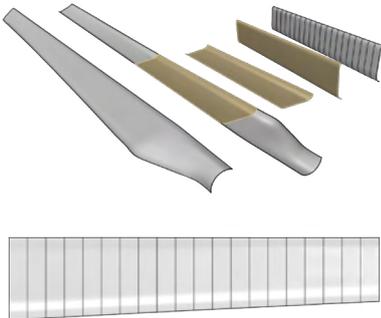


La façade est dynamique et s'oriente manuellement pour minimiser les impacts des rayons du soleil sur la bâtiment. Avec la rotation des éléments de façade sur eux même, les intempéries d'hivers sont également stoppés.



Proposition 2 : façade dynamique

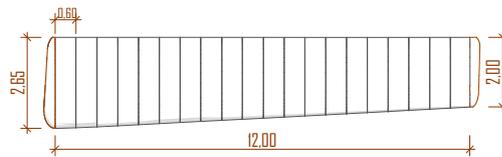
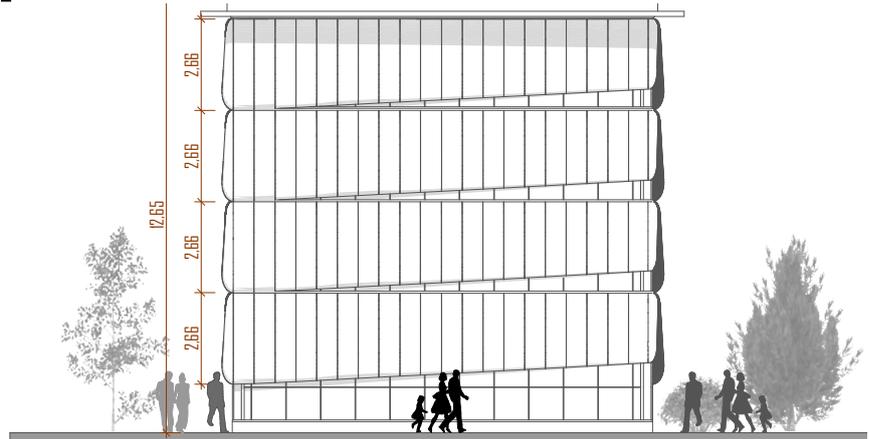
Démarche



L' idée est de conserver le rythme de la pale sur la façade.

Etant donné que pendant la période estivale, l'incidence des rayons solaire atteint les 88°, la protection horizontalement mouvementée empêche toute pénétration brutale du soleil.

Cette configuration évite également la pénétration des intempéries de tout ordre.

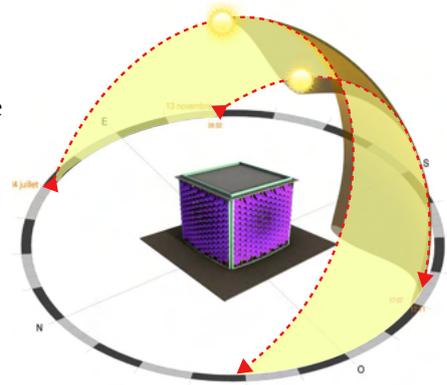


Proposition 3 : façade statique

Démarche

Cette proposition se présente comme une sorte de synthèse entre les deux façades précédentes tout en étant statique. Telle une disposition en écaille de pangolin, le principe est d'empêcher l'éblouissement du soleil quelque soit l'incidence de ce dernier. Un rayon solaire qui s'échappe est directement rattrapé sur une autre plaque.

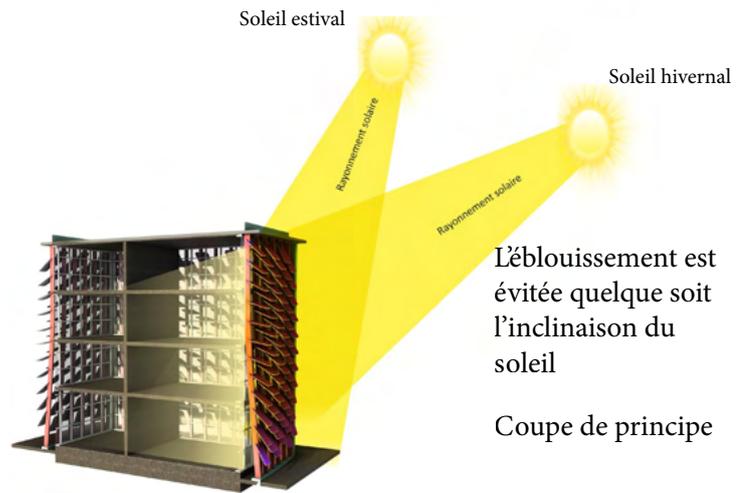
La disposition pourra permettre d'intégrer des feuilles photovoltaïques pour rendre le bâtiment autonome en énergie.



Extraction des éléments de structures des brises

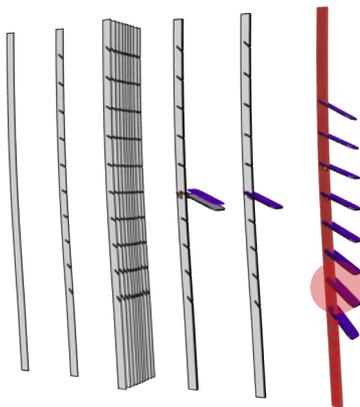
Soleil estival

Soleil hivernal

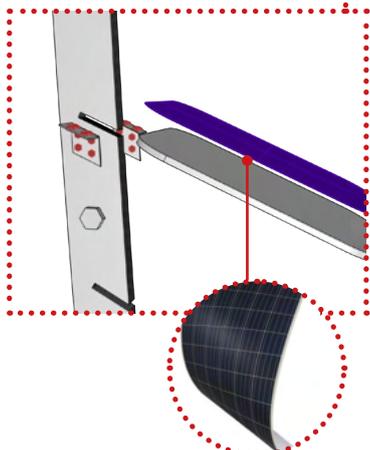
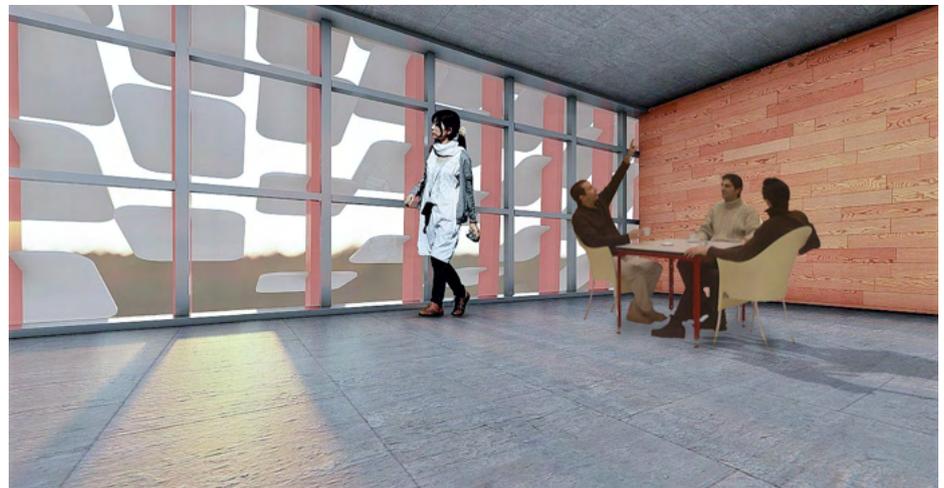


L'éblouissement est évitée quelque soit l'inclinaison du soleil

Coupe de principe



Assemblage par vissage



Feuille photovoltaïque



CONCLUSION

Une forte expansion de l'énergie éolienne est attendue dans les prochaines décennies. Dans le même temps, une part importante des éoliennes installées, la génération installée dans les années 2000, arrivera en fin de vie entre 2020 et 2030. De nombreuses pièces d'éoliennes peuvent être recyclées ; cependant, c'est rarement le cas pour les pales composites. Les pales d'éoliennes sont développées et conçues pour supporter des conditions de service difficiles et des charges mécaniques et environnementales extraordinaires pendant plusieurs décennies. Par conséquent, leur destruction après la mort et leur séparation en éléments réutilisables représentent un défi. Les matériaux composites, connus pour leurs propriétés de légèreté, sont souvent utilisés pour rendre les produits plus durables. Les conceptions légères réduisent la consommation de carburant dans les applications de transport et réduisent ainsi efficacement l'empreinte carbone. La légèreté permet également une utilisation efficace des matériaux et permet de grandes portées dans les applications de construction et architecturales. Les composites sont utilisés pour maximiser les performances de ces structures. Cependant, lorsque le cycle de vie complet est pris en compte, l'avantage environnemental de l'utilisation de matériaux composites devient moins évident. Les matériaux composites permettent une longue durée de vie des produits et nécessitent peu d'entretien.

Le recyclage des matériaux composites est un défi en raison de la manière dont divers matériaux sont structurellement combinés à une échelle submillimétrique. Les résines thermodurcissables et les fibres de verre, les polymères renforcés de fibres de verre, constituent la majorité des matériaux composites sur le marché actuel. Une grande partie des matériaux est mise en décharge, ce qui entraîne une perte de matériaux et de valeur ; et en tant que telle, la mise en décharge est au bas de la hiérarchie de la gestion des déchets. Pour éviter de telles pertes, la mise en décharge des composites a déjà été interdite dans un certain nombre de pays.

La réutilisation structurelle, également appelée recyclage structurel, est une solution alternative intéressante pour les matériaux composites. La réutilisation peut se faire en récoltant directement de grandes pièces ou en coupant des éléments de construction du produit.

Les lames sont des objets intéressants pour cette approche de réutilisation car elles conservent une haute qualité structurelle, même après 20 ans d'utilisation. De plus, les lames se composent de plusieurs matériaux et types de stratification, qui peuvent être réutilisés dans de nombreuses applications différentes. De grandes pièces structurelles ont été réutilisées par exemple pour des applications extérieures telles que du mobilier urbain et une aire de jeux.

Le cas de réutilisation dans notre étude était la façade dynamique. Nous étions très intéressés par la réutilisation des pales d'éoliennes qui produisaient de l'énergie pendant des années pour économiser l'énergie et l'architecture.

C'est un fait bien connu que les bâtiments dans l'UE représentent aujourd'hui environ 40 % de la consommation totale d'énergie. Et il en va de même pour la plupart des autres régions du monde. Les ingénieurs et architectes du monde entier recherchent de nouvelles solutions pour améliorer la performance énergétique des bâtiments. Ce n'est guère surprenant, car les nouvelles réglementations et exigences en matière de performance énergé-

tique placent la barre plus haute que jamais.

Le plus grand défi consiste à combiner le confort de vie et de travail avec l'efficacité énergétique : comment assurer une économie d'énergie maximale tout en assurant le meilleur confort visuel, le confort thermique et l'accès à la lumière naturelle ? C'est là qu'intervient la protection solaire dynamique : une solution dynamique qui permet de réduire considérablement la consommation d'énergie tout en offrant des conditions de vie et de travail idéales, qui à leur tour conduisent à plus de bien-être et à une productivité plus élevée et certainement ces lames et matériaux composites avec leur les propriétés et la légèreté seront une bonne suggestion pour ces vues dynamiques à l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

- Impacts environnementaux de l'éolien français, ADEME 2015 (agence de l'environnement et de la maîtrise d'ouvrage).
- Observatoire de l'éolien, FEE 2020 (France Energie Eolienne)
- Cycle de vie des éoliennes; Culture sciences de l'ingénieur, école normale Paris Saclay
- Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France, Ministère de la transition écologie et solidaire; Conseil général de l'environnement et du développement rural
- Sustainability Report_2020, Vestas

SITOGRAPHIE

- <http://villes-environnement.fr/bilan-carbone-eolienne.html>
- <https://www.ecologie.gouv.fr/eolien-terrestre>
- <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienne/realiser-projet-eolienne/parametres-implantation-eolienne/>
- <https://fee.asso.fr/pub/observatoire-de-leolien-2020/>
- <https://reseaudurable.com/bilan-carbone-production-electricite-france/>
- https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne_en_France
- <https://www.totalenergies.fr/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/l-energie-eolienne-en-france?>
- <http://chateau-guibert-les-pineaux-thorigny-eoliennes-non.over-blog.com/2021/01/>
- <https://www.lecho.be/innover/general/une-premiere-pale-d-eolienne-entierement-recyclable/1033430>
- <https://www.lowtechmagazine.com/2019/06/wooden-wind-turbines.html>
- <https://www.windpowerengineering.com/siemens-gamesa-ready-to-deploy-worlds-first-100-recyclable-wind-turbine-blades/>

E
NS/
AG

MASTER
DESIGN
RÉSILIENCE
HABITER

