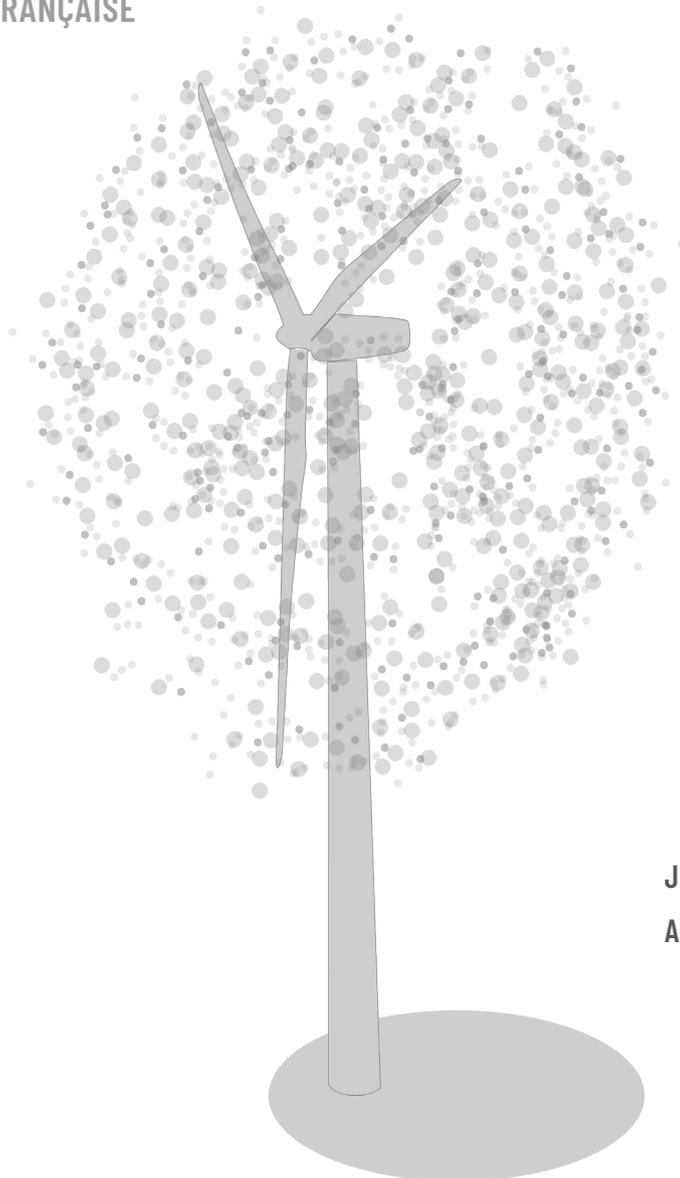


LE RÉEMPLOI DES PALES D'ÉOLIENNE

CRÉATION D'UNE FILIÈRE FRANÇAISE



JEAN ROUYER
ALBANE DUGROSPREZ



SOMMAIRE

1. Introduction P.4
2. La place de l'éolien en France P.5
3. Fonctionnement et ressource de l'éolienne P.6
4. Une matière complexe P.7
5. Le démantèlement de l'éolienne P.8
6. Une fin de vie fatidique P.9
7. Prolonger le cycle de vie P.10
8. La réhabilitation comme lieu du réemploi P.11
9. L'écosystème éolien-architecture P.12
10. De la déconstruction vers le réemploi P.13
11. Propriétés structurelles du matériau composite P.14
12. Fonctionnement et ressource de l'éolienne P.15
13. Technique et assemblages P.16
14. Un balcon générique P.17
15. Un balcon filant P.18
16. Une extension de l'espace intérieur P.19
17. Ressources P.20

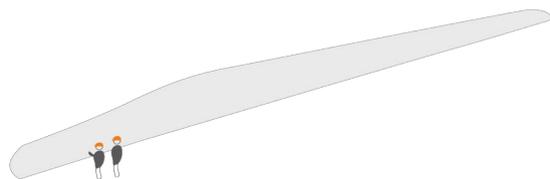
INTRODUCTION

A l'heure du développement des énergies renouvelables, de nouveaux défis environnementaux voient le jour. Différents intervenants de cette filière tentent d'améliorer les bénéfices de leurs exploitations d'énergies tout en s'interrogeant sur leurs éventuels impacts, dans une perspective de durabilité.

C'est le cas de notre partenaire, *GEG (Gaz et Électricité de Grenoble)*. Détenteur de plusieurs parcs éoliens français, *GEG* se doit aujourd'hui de produire et distribuer de l'énergie propre, mais aussi de garantir une traçabilité et une recyclabilité des matériaux nécessaires à sa production.

Les nombreux démantèlements de parcs éoliens à venir soulèvent la question de la valorisation des composantes de l'éolienne, notamment des composites issues de l'industrie éolienne. Ainsi, dans le cadre d'un travail étudiant, *GEG* nous confie le sujet du réemploi des pales éoliennes et nous invite à réfléchir à la création d'une filière.

Au cours de cette recherche, nous tenterons de montrer l'enjeu que représente aujourd'hui le réemploi des pales éoliennes françaises. Nous commencerons par découvrir son emploi actuel, la quantité de matière concernée et les qualités intrinsèques que conservent le matériau pour ensuite envisager son réemploi dans le domaine de la réhabilitation.

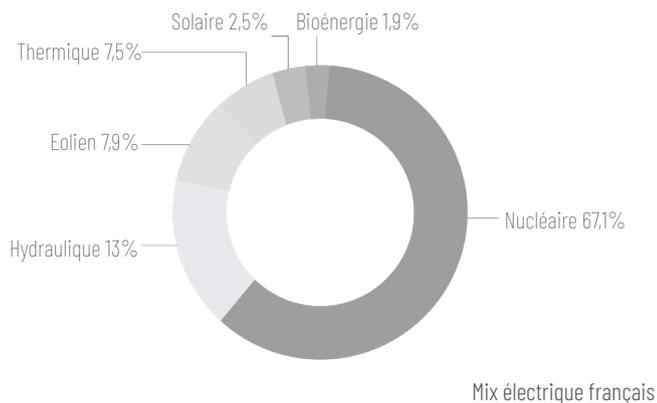


LA PLACE DE L'ÉOLIEN EN FRANCE

L'énergie éolienne, bien que représentant moins de 8% de l'électricité produite, a une place importante en France. En tant que 4ème pays européen exploitant l'éolien, la France produit annuellement 26 777 GWh d'électricité grâce à la simple force du vent. De nombreux parcs éoliens occupent le territoire français de manière à capter les vents les plus puissants et réguliers pour les convertir ensuite en courant électrique. 60 % de celui-ci est produit dans la région Grand-Est, les Hauts-de-France et l'Occitanie.

S'y étant intéressée tardivement, la France n'a pas sur son territoire toutes les industries nécessaires à la fabrication des composants d'une éolienne. Certaines parties sont donc importées d'Europe et d'Asie vers le site de construction.

On sait que la durée de vie actuelle d'une éolienne est d'environ de 25 à 30 ans. Cela signifie que d'ici 25 ans, la totalité des 8 677 éoliennes *on shore* en service sera démantelée pour être remplacée et complétée par de nouvelles éoliennes, entre autres plus performantes. Avant 2040, environ 6 900 de nos éoliennes actuelles devront être recyclées, ce qui représente un travail considérable.



parcs éoliens flux de matière autoroutes

carte des flux de matière de la filière éolienne approvisionnant les parcs éoliens français



Taux de démantèlement prévisionnel des parcs éoliens français

FONCTIONNEMENT ET RESSOURCE DE L'ÉOLIENNE

La production d'énergie éolienne totale en 2020 représentait 39,7 TWh, soit 39 700 000 MWh. Si l'on rapporte cette production aux 8677 éoliennes On-Shore en service aujourd'hui sur le territoire français, une éolienne française produit en moyenne 4 575 MWh/an. Cette valeur n'étant pas très accessible, nous avons calculé une équivalence plus représentative: une éolienne qui produit en moyenne 4 575 MWh par an alimente également 286 foyers par an ne consommant que de l'électricité.

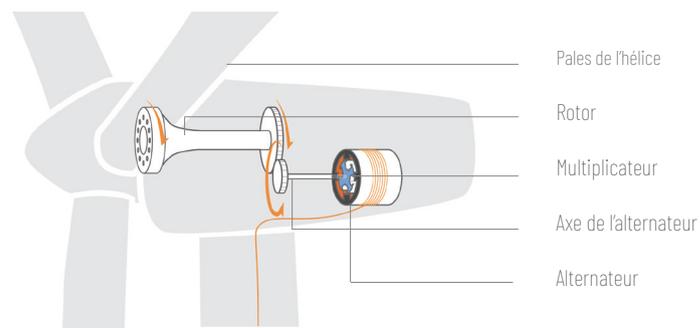
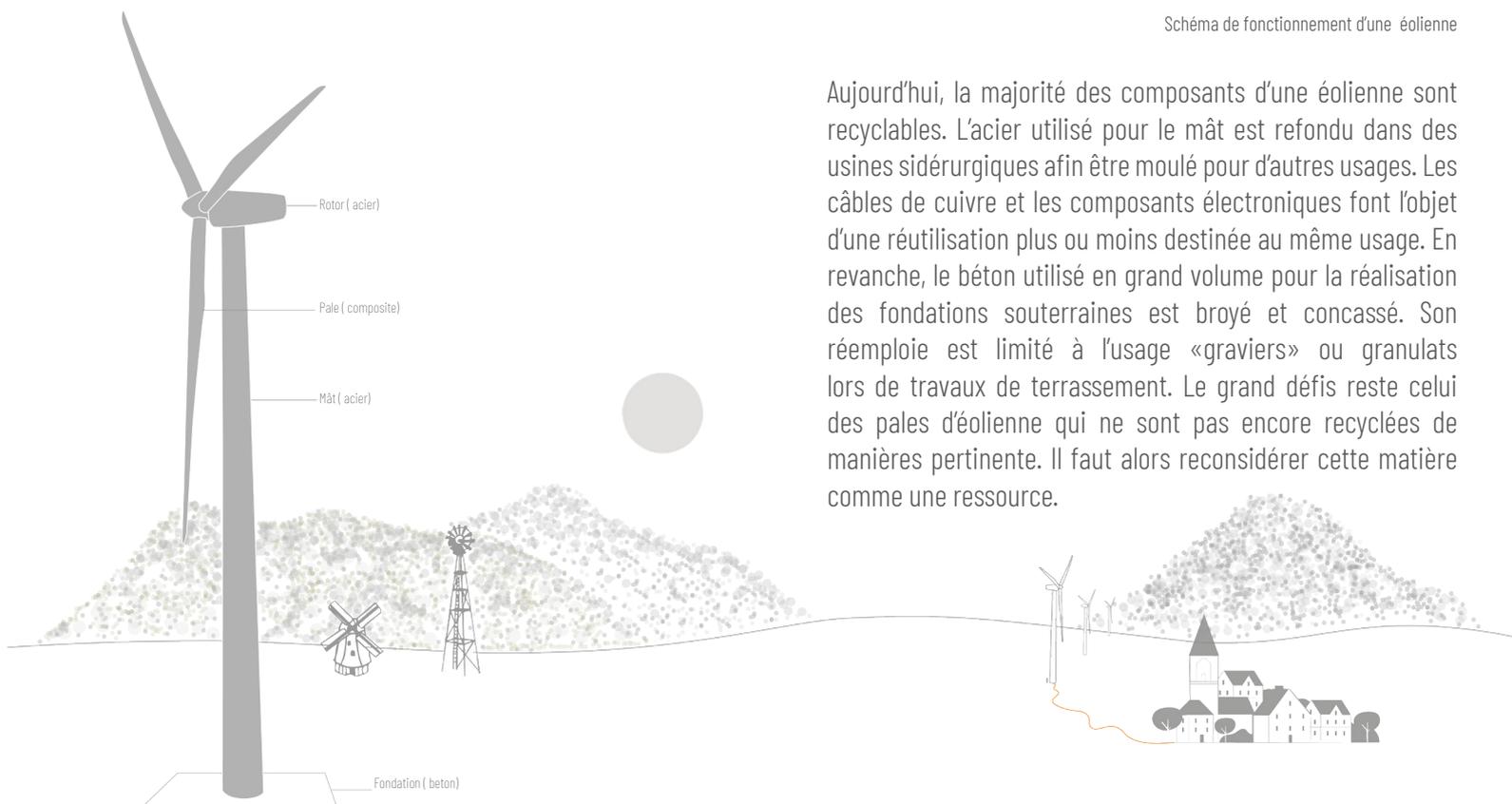


Schéma de fonctionnement d'une éolienne



Aujourd'hui, la majorité des composants d'une éolienne sont recyclables. L'acier utilisé pour le mât est fondu dans des usines sidérurgiques afin d'être moulé pour d'autres usages. Les câbles de cuivre et les composants électroniques font l'objet d'une réutilisation plus ou moins destinée au même usage. En revanche, le béton utilisé en grand volume pour la réalisation des fondations souterraines est broyé et concassé. Son réemploi est limité à l'usage «graviers» ou granulats lors de travaux de terrassement. Le grand défi reste celui des pales d'éolienne qui ne sont pas encore recyclées de manière pertinente. Il faut alors reconsidérer cette matière comme une ressource.

UNE MATIÈRE COMPLEXE

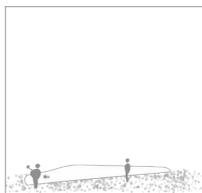
Il existe de nombreux modèles de pâles éoliennes qui varient suivant leurs constructeurs. Bien que de nouveaux matériaux soient envisagés pour concevoir la nouvelle génération d'éoliennes, les pâles actuelles ne sont aujourd'hui pas recyclables du fait qu'elles soient réalisées en un matériau composite. En effet, il est difficile de séparer la résine époxy des fibres de verre. Les différents matériaux assemblés entre eux et pris dans la résine ne sont de fait plus dissociables les uns des autres.

Dès 2025, l'ADEME s'attend à un volume annuel de démantèlement pouvant atteindre 1 GW (dans l'hypothèse d'une durée de vie moyenne de 20 ans), soit 3 000 à 15 000 tonnes de matériaux composites par an.

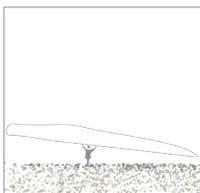
Or, même si ce matériau a été formé dans un but bien précis, la pale possède toujours des qualités intrinsèques à considérer. Résistance, Légèreté, flottaison, et étanchéité sont autant de propriétés intéressantes à prendre en compte pour envisager son réemploi tout comme son échelle et ses qualités formelles.



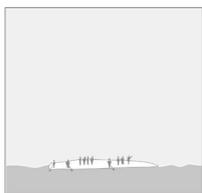
Étanche



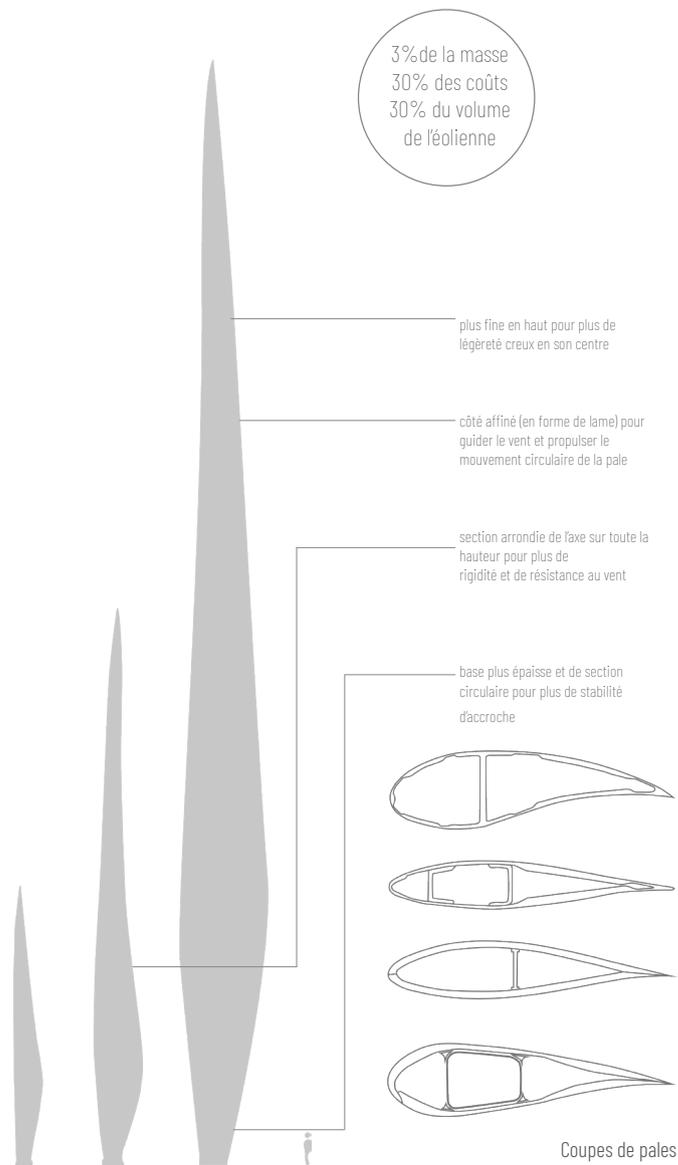
Résistant



Léger



Flottant



LE DÉMANTÈLEMENT DE L'ÉOLIENNE

Une fois la durée de vie du parc éolien écoulee, l'exploitant du parc éolien est tenu par la réglementation de procéder à son démantèlement complet et à la remise en état du site. De plus le traitement et le recyclage des éoliennes est maintenant encadré par la Loi (Code de l'Environnement, art. R.515-106). Aujourd'hui, selon l'ADEME, environ 90% d'une éolienne est recyclable. Pour autant, nous pouvons nous demander si les différentes composantes prises en charge par des filières sont revalorisées de la meilleure façon.

Le démantèlement d'une éolienne est un processus coûteux qui investit un certain nombre de technologies, ainsi qu'une organisation particulière concernant la répartition et le transport des matériaux qui la compose vers leurs lieux de recyclage distincts. Entant que lieu de production, de transformation et de déploiement matériel et humain intense, le démantèlement serait pour nous designers un espace à reconsidérer. En optimisant cette procédure, le démantèlement pourrait devenir le lieu même de la revalorisation des composants de l'éolienne et d'implantation temporaire de la filière.

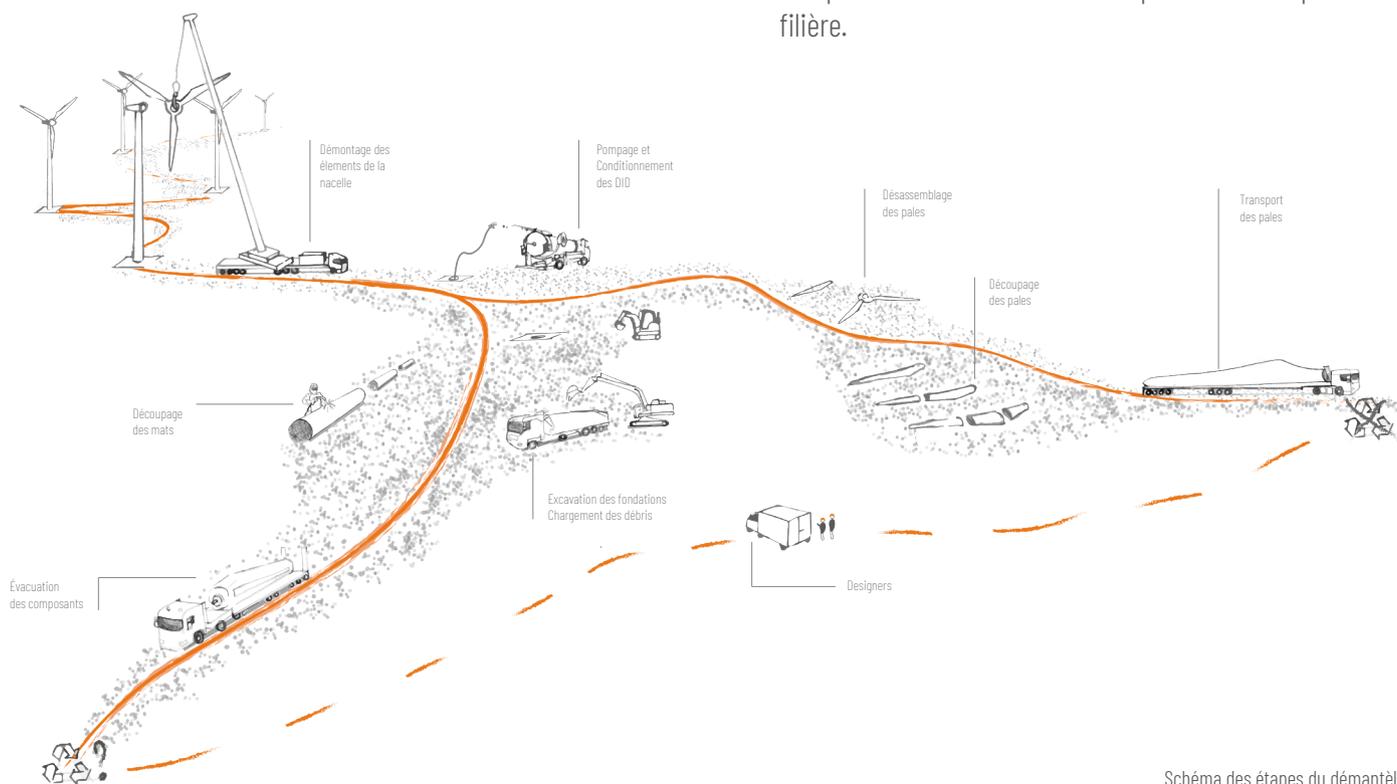


Schéma des étapes du démantèlement

UNE FIN DE VIE FATIDIQUE

Comme nous l'avons vu précédemment, il existe encore peu de solutions convenables concernant la fin de vie des matériaux composites, tel que celui des pales d'éoliennes. Aujourd'hui, il existe deux façons de mettre un terme au cycle de vie de ce matériau : chercher à démanteler le composite, soit à séparer les matériaux qui le compose, ou bien se débarrasser du matériau dans son intégralité. Pour la première solution il existe deux manières, la thermolyse et la solvolysse, qui cherchent à faire fondre la résine (respectivement par chaleur et par solvant) pour ensuite récupérer les fibres de verre et les fibres de carbone. Mais l'inconvénient de ces deux procédés - outre le fait qu'ils utilisent beaucoup d'énergie, de nouveaux composés chimiques et qu'ils permettent pas de se servir à nouveau de la résine (qui demeure ainsi à proprement parler un "déchet") - est que les fibres récupérées ont grandement perdues de leurs résistances et propriétés mécaniques.

DÉCOMPOSITION



Thermolyse

Faire fondre la résine par chaleur pour récupérer les fibres de verre et les fibres de carbone

> inconvénient utilise beaucoup d'énergie



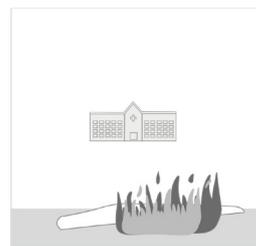
Solvolysse

Faire fondre la résine par solvant pour récupérer les fibres de verre et les fibres de carbone

> inconvénient utilise de nouveaux composés chimiques

Elles ne pourront alors pas être recyclées pour de bonnes performances. On privilégie donc aujourd'hui la réponse qui vise à mettre un terme au cycle de tout le composant. La première solution est de les enterrer. C'est la solution la plus "facile" car la moins cher, mais qui fort heureusement est interdite aujourd'hui en Europe. En France les procédés les plus utilisés sont l'incinération et le broyage. Ces pales sont alors «valorisées» de façon thermique ou broyées pour servir à la fabrication de ciment.

SE DÉBARRASSER DU MATÉRIAU

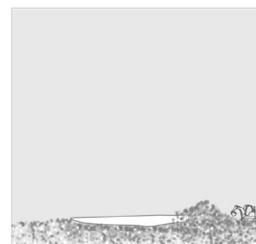


Incinération

Utiliser comme combustible pour alimenter un réseau de chauffage public, puis utiliser les cendres de fibre de verre et de carbone dans la fabrication de Bétons Haute Performance

> Le composite broyé a un pouvoir calorifique inférieur de 15 000 à 25000 KJ/kg, = pouvoir de combustion que le charbon

> c'est un produit non homogène qui n'est pas compatible avec les installations de combustion classique => nécessite un investissement pour adapter l'installation



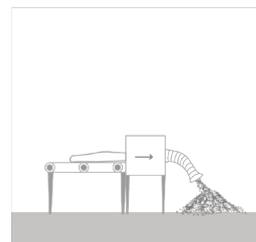
Enfouissement

La solution la plus "facile", mais aujourd'hui interdite en Europe.

Les composites peuvent être mis en décharge : le coût de mise en décharge varie entre 100 à 160€ par tonne (déchets composites sont considérés comme DIB (déchet Industriel banal))

> le prix des DIB va bientôt augmenter.

> pas une solution dans la mesure où la pale est stockée, encombre.



Broyage

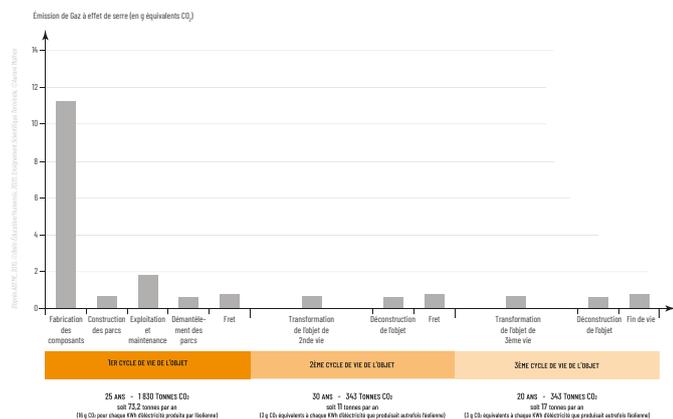
Il existe des entreprises comme Global Fiberglass Solutions Inc. qui broient ces matériaux composites pour structurer leurs bétons et créer des éléments préfabriqués pour la construction et le bâtiment

> le béton est un matériaux très énergivore (qui nécessite de chauffer à très haute température)

> le béton utilise du sable, ressources devenu de plus en plus rare aujourd'hui

> le béton ne se recycle pas correctement aujourd'hui

PROLONGER LE CYCLE DE VIE



Graphique projetant les différents cycles de vies de l'éolienne

Envisager le prolongement de la vie d'une éolienne, c'est l'intégrer dans un principe de circularité. Il nous faut alors réévaluer les dépenses énergétiques que nécessitent la production d'une éolienne, de sa fabrication à son démantèlement.

Ce premier graphique nous montre que l'étape la plus polluante dans le cycle de vie d'une éolienne (comme pour tout autre objet ou produit) est celle de la fabrication et la mise en œuvre des composants. Si nous prolongeons le cycle avec une seconde vie pour le même matériau, nous n'avons pas à produire à nouveau cette même pollution ou cette consommation d'énergie; on transforme simplement la matière, on ne la recrée pas. Ainsi, fabriquer un objet avec une pale d'éolienne que l'on réemploie est moins polluant dans la mesure où l'on ne produira pas le pic de pollution lié à la fabrication ou mise en œuvre d'un nouveau matériau, et que l'on exploite une ressource déjà présente.

Aujourd'hui dans le cycle de vie d'une éolienne, certains matériaux comme l'acier, le cuivre ou certains composants électroniques sont recyclés "entièrement" (donc dessinent des cycles complets), tandis que d'autres comme le béton ou les pales sont transformés dans un premier temps puis deviennent tôt ou tard des "déchets" que l'on ne sait plus exploiter à bon escient (et forment donc des cercles non finis, interrompus). L'objectif même de notre projet est de prolonger le cycle de vie d'une pale en la réemployant pour donner au matériau une 2^{de}, voire même une 3^{ème} vie.

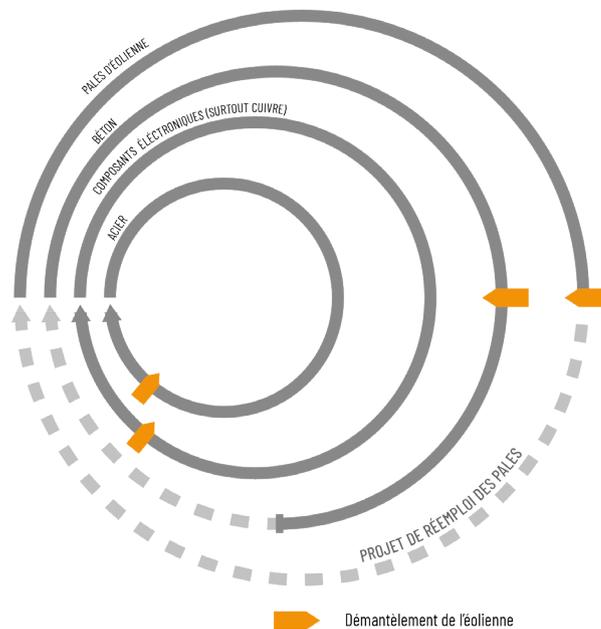


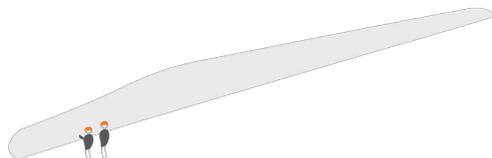
Schéma représentant les différents cycles de vie des composants de l'éolienne

LA RÉHABILITATION COMME LIEU DU RÉEMPLOI

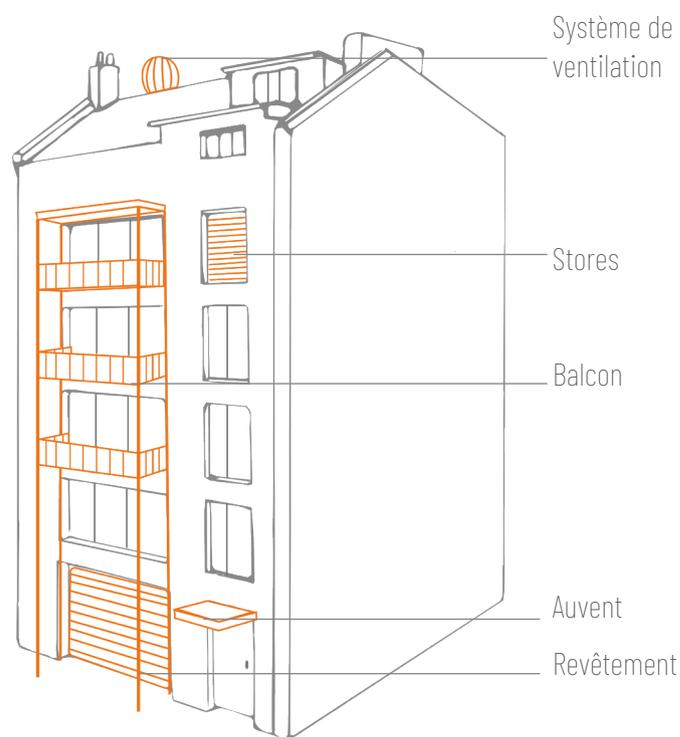
Adapter le secteur de la construction au changement climatique et à la préservation des ressources c'est d'abord s'intéresser à la rénovation du parc immobilier existant. Dans un souci d'impact énergétique global, nous avons décidé de nous intéresser aux constructions à réhabiliter plutôt qu'aux constructions neuves.

En considérant les pales d'éoliennes comme une ressource matérielle locale, la création de cette filière sera pensée dans une perspective de gestion optimale des ressources matérielles. Notre envie est de mobiliser les ressources locales, qu'elles soient naturelles, énergétiques ou humaines. Pour cela il nous faut nous intéresser aux caractéristiques intrinsèques du matériau composite et à ses assemblages qui favoriseraient son réemploi.

Comment inciter les producteurs d'éléments de construction et par extension l'ensemble des acteurs de la construction à l'intégration d'éléments en matériaux composites issus du réemploi des pales d'éoliennes ? Comment les inciter à intégrer les principes de circularité ?



« il y a 35 millions de logements en France donc en calculant rapidement 75% du parc immobilier de 2050 existe déjà (au rythme de 300 000 logement/an) » Olivier Bavarel



L'ÉCOSYSTÈME ÉOLIEN - ARCHITECTURE

En s'inspirant de l'étude REPAR menée par le collectif Bellastock pour l'Ademe, nous avons réfléchi au développement et à l'organisation d'une filière de réemploi des pales éoliennes destinées au secteur du bâtiment et plus spécifiquement à la réhabilitation des logements. En effet la réhabilitation concerne aujourd'hui principalement le logement qui représente à lui seul 70% du territoire bâti nationale. Compte-tenu des engagements environnementaux et du rythme de son renouvellement, les logements concentreront durant les prochaines décennies, l'essentiel des interventions de rénovation.

Cette proposition de filière envisage une vraie interaction entre le secteur éolien et le secteur de la construction. Le contexte aujourd'hui visé serait celui de la maîtrise d'ouvrage porteuse du concept du réemploi, qui ne serait pas confronté à un grand risque commercial. De plus, on sait que d'ici 2022 les constructeurs français seront amenés à appliquer les principes de circularités et à lutter contre le gaspillage en valorisant 70% des déchets du secteur du bâtiment et des travaux publics. Fort de ce préalable, la filière de réemploi éolien pourrait se rapprocher de la filière de réemploi des matériaux de construction afin de faire valoir l'intérêt d'intégrer leurs matériaux composites dans leurs catalogues. N'ayant pas la même capacité de séduction initiale que les matériaux traditionnels, l'intégration de cette matière façonnée dépendra avant tout d'un travail de conception qui révélera ses qualités techniques et esthétiques.

Le réemploi de cette matière nécessite une organisation et la mise en place d'une procédure réfléchie avec son contexte. Le réemploi de cette matière nécessite une organisation et la



mise en place d'une procédure réfléchie avec son contexte. Elle pose en premier lieu la question de la répartition de la matière à l'échelle territoriale.

Afin de ne pas augmenter l'empreinte carbone de la pale éolienne, il paraît judicieux de réemployer localement ce matériau. Mais envisager un réemploi In Situ, c'est prétendre l'existence d'une demande locale permettant son application. Or la présence d'éolienne sur un territoire donné n'est pas corrélée aux besoins matériels du secteur du bâtiment visé. Offres et demandes de matériaux ne se correspondent pas de manière évidente ni en quantité ni temporellement.

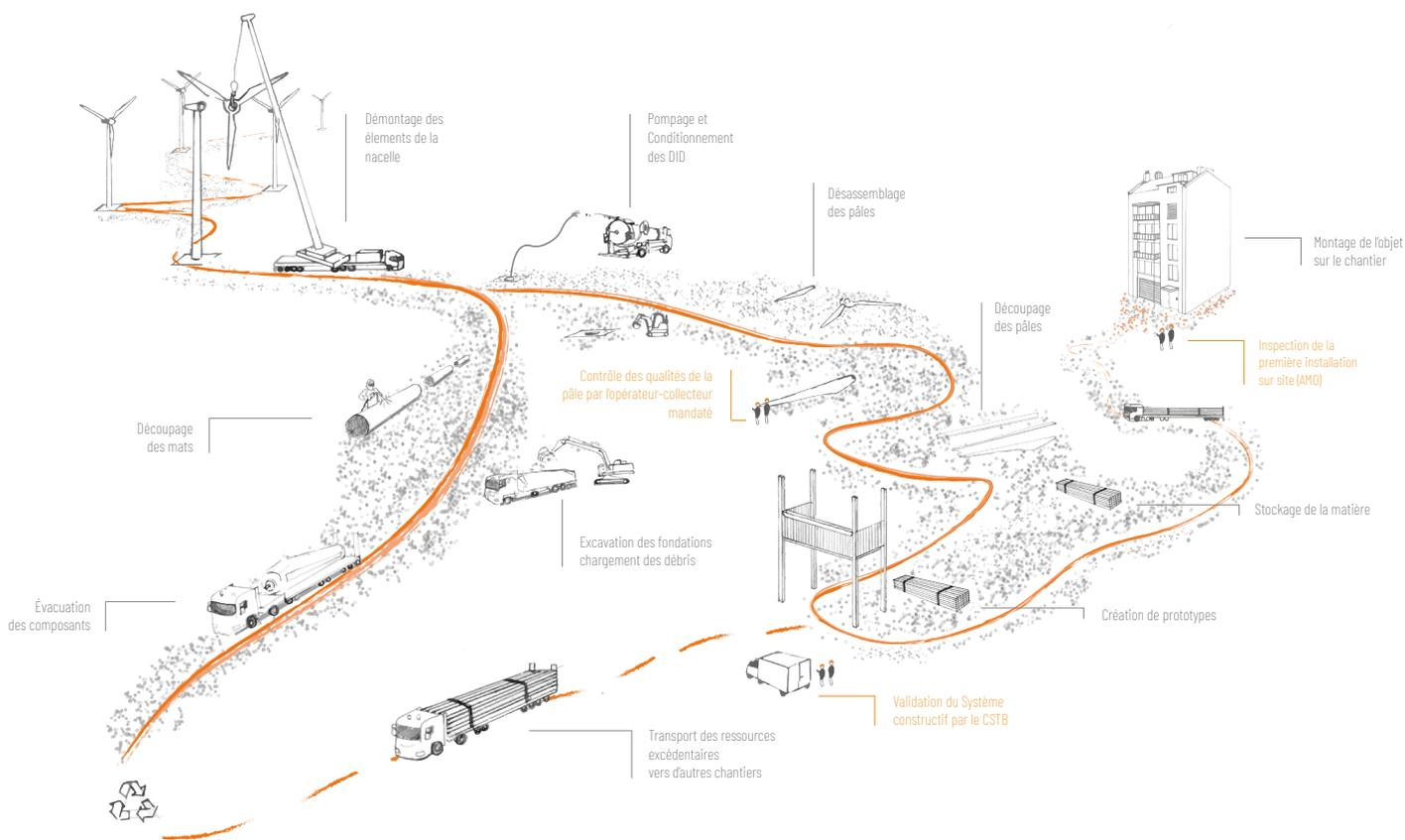
Il est ainsi nécessaire d'avoir une connaissance précise des besoins locaux et de faire un état des lieux des projets de réhabilitation prévu pour évaluer les besoins territoriaux.

De plus, il nous faut envisager la possibilité de mettre en œuvre des systèmes constructifs en réemploi suffisamment génériques pour être obtenus de gisements divers, soient de différents parcs éoliens, et applicables à une variété de projets dans le secteur du bâtiment. Nous devons alors envisager les différentes typologies de projet (liste à définir) en considérant les différents gisements présents sur le site.

DE LA DÉCONSTRUCTION VERS LE RÉEMPLOI

Comment rendre opérationnelle la déconstruction sélective d'un parc éolien ? Nous avons pour cela imaginé une procédure qualifiée de «préparation au réemploi». Elle consiste en la valorisation des matériaux pour qu'ils conservent le statut de matériaux de construction via: une expertise, une standardisation de la matière pour un usage précis, implanter un lieu de prototypage du système constructif générique, un lieu de stockage pour ensuite gérer le transport de la matière en surplus.

A chaque démantèlement de parcs éolien, le chantier deviendrait provisoirement le lieu de déploiement de la filière. Il accueillerait les espaces de production, de prototypage et de stockage du nouveau matériau de construction. Cette organisation a l'avantage de concentrer les activités et de limiter les transports. Le façonnage in situ du matériau permet de le livrer par sections de 12m, en un seul déplacement jusqu'au chantier de réhabilitation.



PROPRIÉTÉ STRUCTURELLE DU MATÉRIAU COMPOSITE

Lorsque l'on observe le comportement du matériau composite, dans sa résistance aux contraintes par exemple, on peut noter quelques similarités avec d'autres matériaux de construction actuels.

On lui trouve des similarités avec le Béton Armé. Le béton est une sorte de pierre recomposée. Ce matériau est très résistant en compression (10 à 100 MPa), mais il est plutôt cassant en efforts de traction ou de flexion (de l'ordre du dixième de sa résistance à la compression, soit 10 MPa au maximum).

C'est pour pallier cette fragilité qu'est née l'idée de placer des tiges en acier -résistantes aussi bien en traction qu'en compression- dans les zones du béton soumises au contraintes de traction ou de flexion.

Le béton armé est donc un matériau composite, qui a été conçu pour des raisons similaires au matériau composite des pales d'éolienne, formé d'un matériau résistant en compression mais faible en traction (la résine époxy) et de fibres légères qui apportent la résistance en traction (fibres de verre, fibres de carbone).

Il peut également être comparé au bois. Il est un matériau fibré : il est composé de fibres unidirectionnelles (dans le sens de croissance verticale de l'arbre) qui dessinent les veines en cercles concentriques. Ces fibres apportent au bois une grande résistance dans le sens des fibres : on ne peut pas "étirer ni compresser" ces fibres de bois, le matériau est résistant en traction et en compression. En revanche, le bois est plus fragile en flexion, c'est-à-dire si l'on applique une force perpendiculaire aux fibres. Ces dernières ont ainsi tendance à se déformer, à se courber, et à produire ce que l'on appelle des flambements

dans le cas d'une poutre ou d'un poteaux.

Notre matériau composite est lui aussi fibré, avec des fibres de verre et de carbone. Les fibres de verres sont très résistantes en traction, et une fois figées dans la résine, sont également résistantes en compression. Il en va de même avec les fibres de carbone, avec de meilleures performances. De plus, puisque ces fibres sont disposées dans non pas une seule, mais plusieurs directions sur un même plan, le matériau est résistant aux efforts de compression et de traction dans ce plan. Il présente en revanche les mêmes fragilité en flexion que le bois pour les forces appliquées perpendiculairement aux fibres, soit pour les forces appliquées sur la surface du panneau composite.

Le matériau est également similaire au lamellé-collé de bois. En effet, dans le but d'augmenter la résistance aux contraintes de flexions, on peut additionner des sections ou lamelle de bois positionnée dans le (même) sens des fibres et collée entre elles. Cela permet d'une part de fabriquer des pièces de grande dimension ou de formes particulières qui n'auraient pu être obtenues avec du bois brut, d'autre part d'améliorer la résistance mécanique par rapport à une pièce de bois massif (également grâce au triage et à la purge des défauts). Ainsi, les résistances mécaniques des classes les plus courantes de bois lamellé-collé vont de 20 à 40 MPa pour la résistance en flexion, de 13,6 à 22,5 MPa pour la résistance en traction et de 21 à 29 MPa pour la résistance en compression.

TECHNIQUES ET ASSEMBLAGES

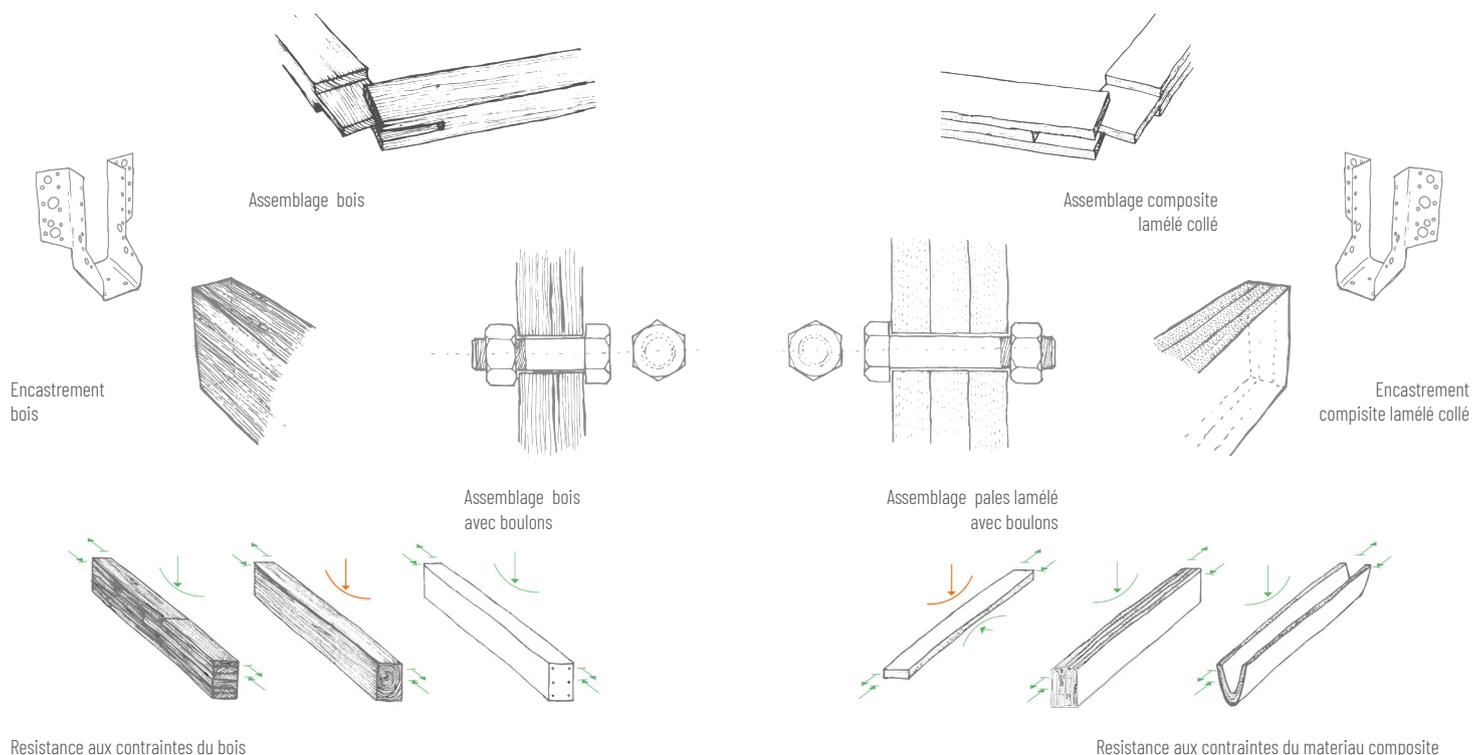
Il existe aujourd'hui divers procédés d'assemblages mécaniques aujourd'hui appliqués à d'autres matériaux et qui pourraient être également appliqués au matériau composite du projet. Nous nous sommes intéressés principalement à deux types d'assemblages: ceux par emboîtement et ceux visserie. Pour chaque solution se pose la question de la réversibilité, et de la démontabilité ou non de l'objet une fois assemblé.

Les assemblages par emboîtement sont des encastresments mécaniques où un emboîtement s'emmanche dans une rainure. Cette technique pourrait être intéressante pour encastrer de

petites pièces en matériau composite en usant d'une scie à fil diamanté.

Puisqu'il s'agit d'éléments standardisés, les assemblages par visserie, tel que les boulons et rivets, également beaucoup utilisés dans les ouvrages en lamellé-collé, semblent tout à fait adéquats aux matériaux composites.

Il suffit simplement de pouvoir percer la matière pour y faire traverser la tige du boulon, puis d'avoir une surface suffisamment résistante pour resserrer l'écrou.

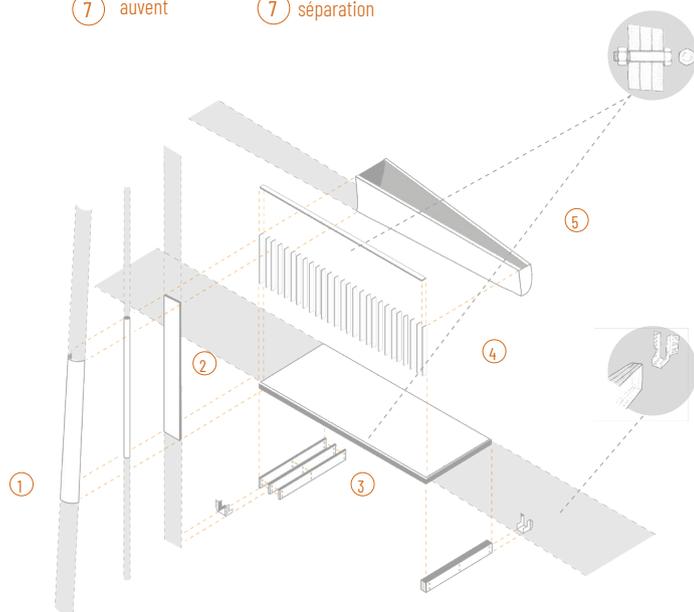


UN BALCON GÉNÉRIQUE

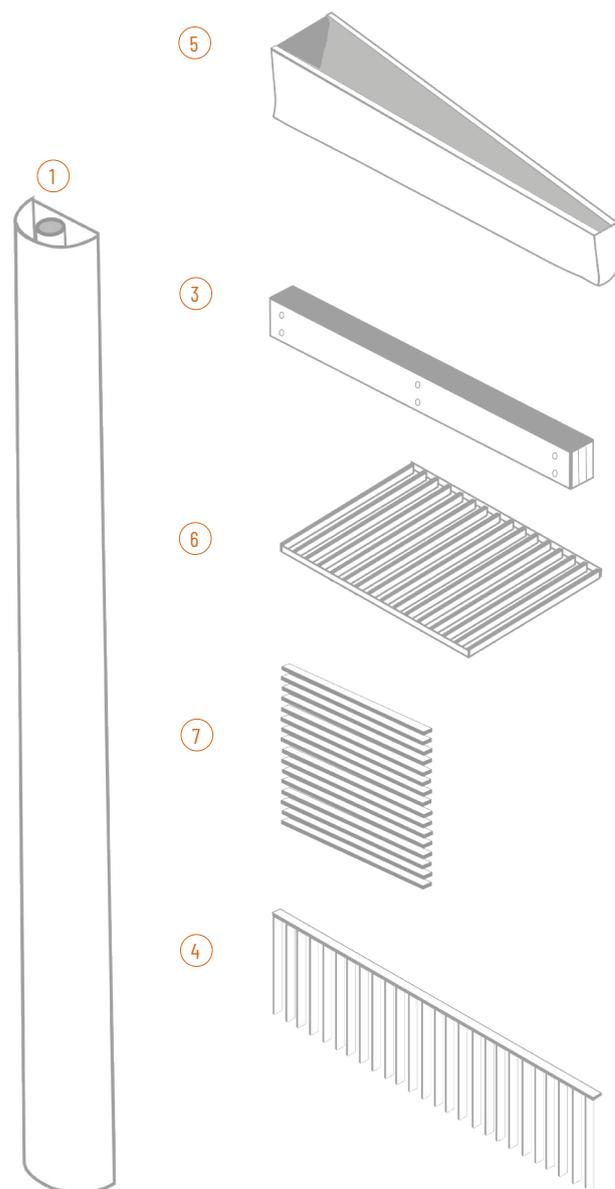
En faisant appel à des assemblages simples, selon des procédés issue d'une industrie déjà existante, nous proposons une solution générique.

Notre notice prévoit un balcon assemblé par encastrement et avec des boulons pour minimiser les coûts énergétiques. De part sa simplicité d'assemblage, cette solution pourrait s'adapter aux différentes typologies de bâtiment et dynamiser leurs façades. En adéquation avec la quantité de matière actuellement disponible, les premiers balcons conçu intégreront uniquement des poteaux en composite. Ils évolueront dans le temps pour recevoir les autres constituantes composées de plus petites sections.

- ① poteau
- ② poteau gouttière
- ③ poutre
- ④ balustrade
- ⑤ bac à fleur
- ⑦ auvent
- ⑦ séparation



Axonométrie éclatée du balcon



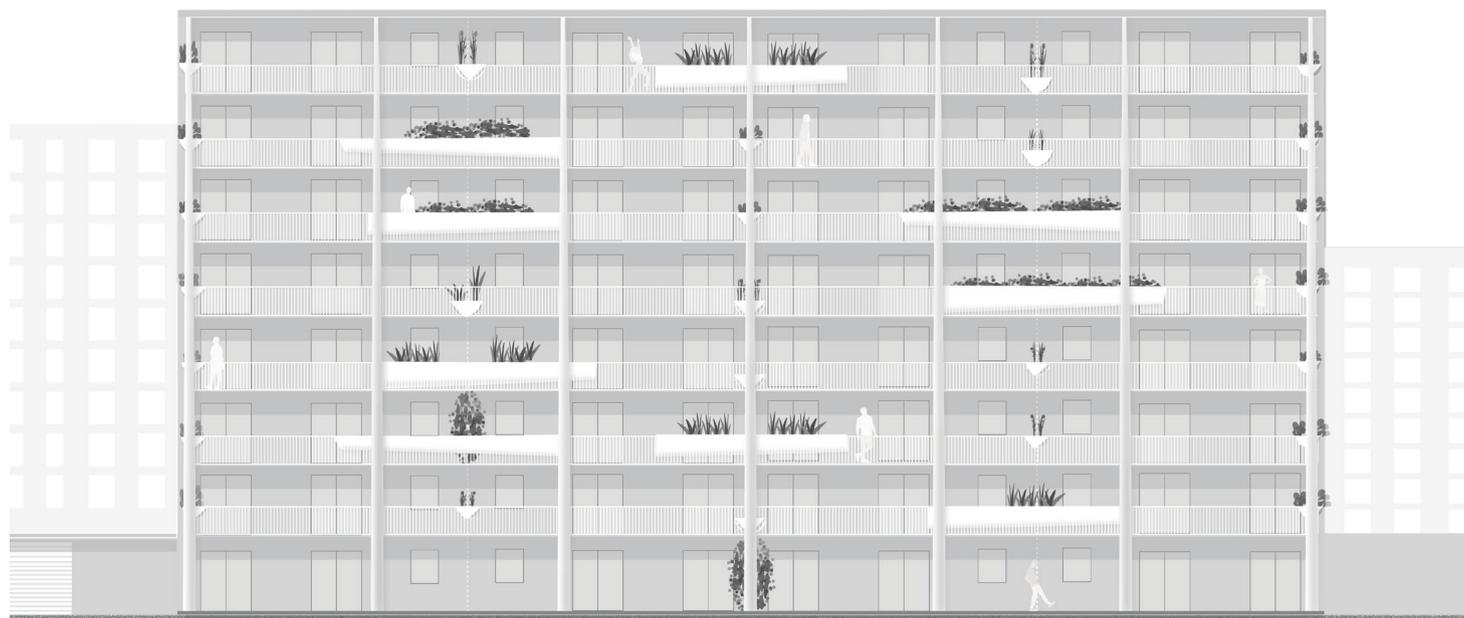
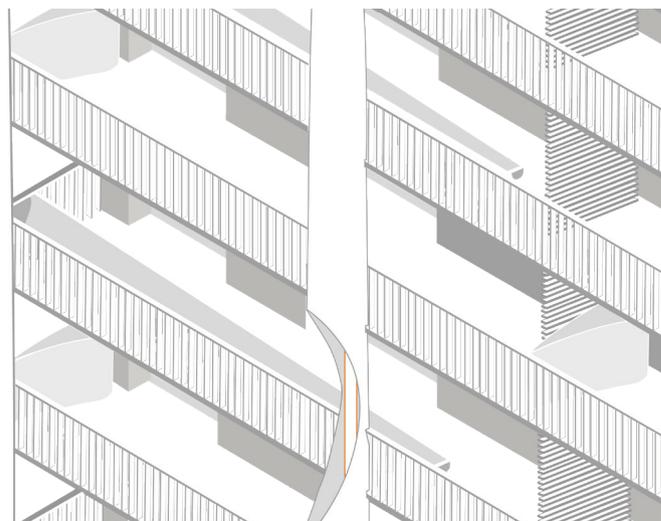
Catalogue des objets conçus

UN BALCON FILANT

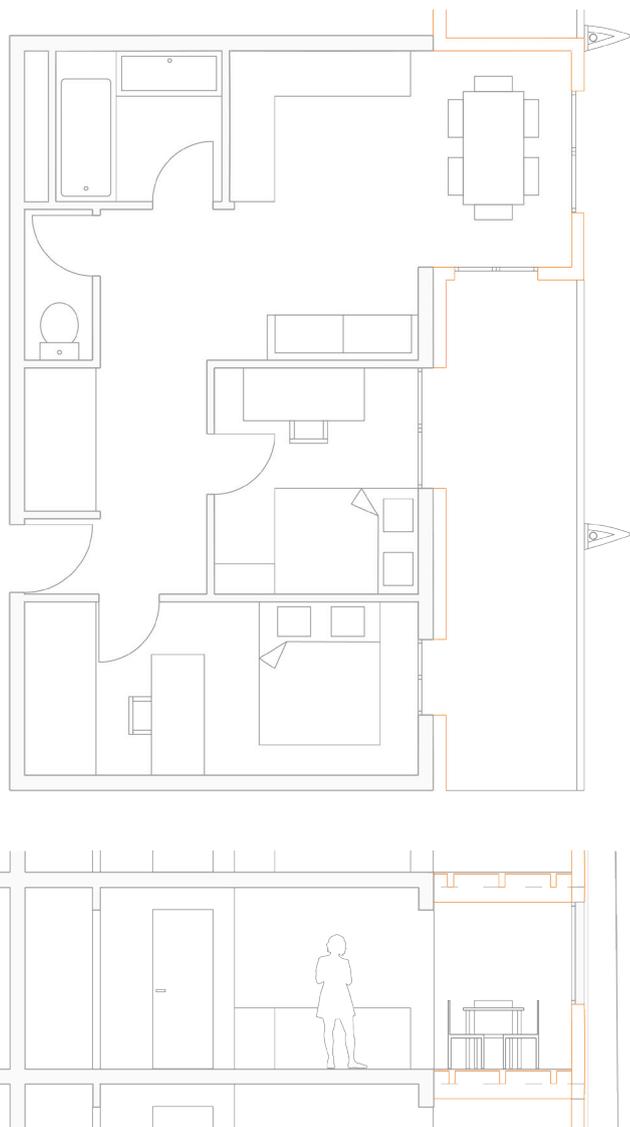
Notre réflexion sur l'augmentation de l'espace de vie lors d'opérations de réhabilitation de logements, nous a mené à produire deux typologies d'extensions :

La première en extérieur avec un balcon filant. Chaque logement disposerait ainsi d'un espace extérieur privé, séparé par du mobilier et des objets pouvant contenir de la végétation. Nous profitons de la forme creuse du poteau pour dissimuler les descentes d'eaux pluviales. Elles seraient récupérées puis redistribuées entre les logements pour l'arrosage extérieur voir une utilisation sanitaire.

Vue extérieure des balcons filants



UNE EXTENSION PAR L'EXTERIEUR



La seconde proposition d'augmentation de l'espace de vie serait partiellement intérieure avec une augmentation du séjour par une extension. Le prolongement de l'espace intérieur du logement permet de palier au manque de pièces des vieux immeubles. Cette extension donnerait également accès à un espace extérieur privé.

La structure des deux prototypes reste inchangée, seul le revêtement des surfaces change. Dans le cas du balcon, il s'agit d'un simple plancher sur solivages, tandis que sur celui de la «pièce supplémentaire», l'extension est réalisée dans la même isolation que celle couvrant la façade rénovée.



Plan et coupe de l'extension

Vue intérieure de l'extension



BIBLIOGRAPHIE

Déconstruction et Réemploi (2017, Rotor)

Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France, Rapport de l'ADEME au ministre de la transition écologique et solidaire

Opportunité de l'économie circulaire dans le secteur de l'éolien, Mai 2015, Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par I CARE ENVIRONNEMENT

Cycle de vie de l'éolienne: tout sauf du vent, L. Vedrine et X. Jourdain

SITOGRAPHIE

<https://www.engie-green.fr/wp-content/uploads/2020/12/fiche-demantelement-bd3.pdf>

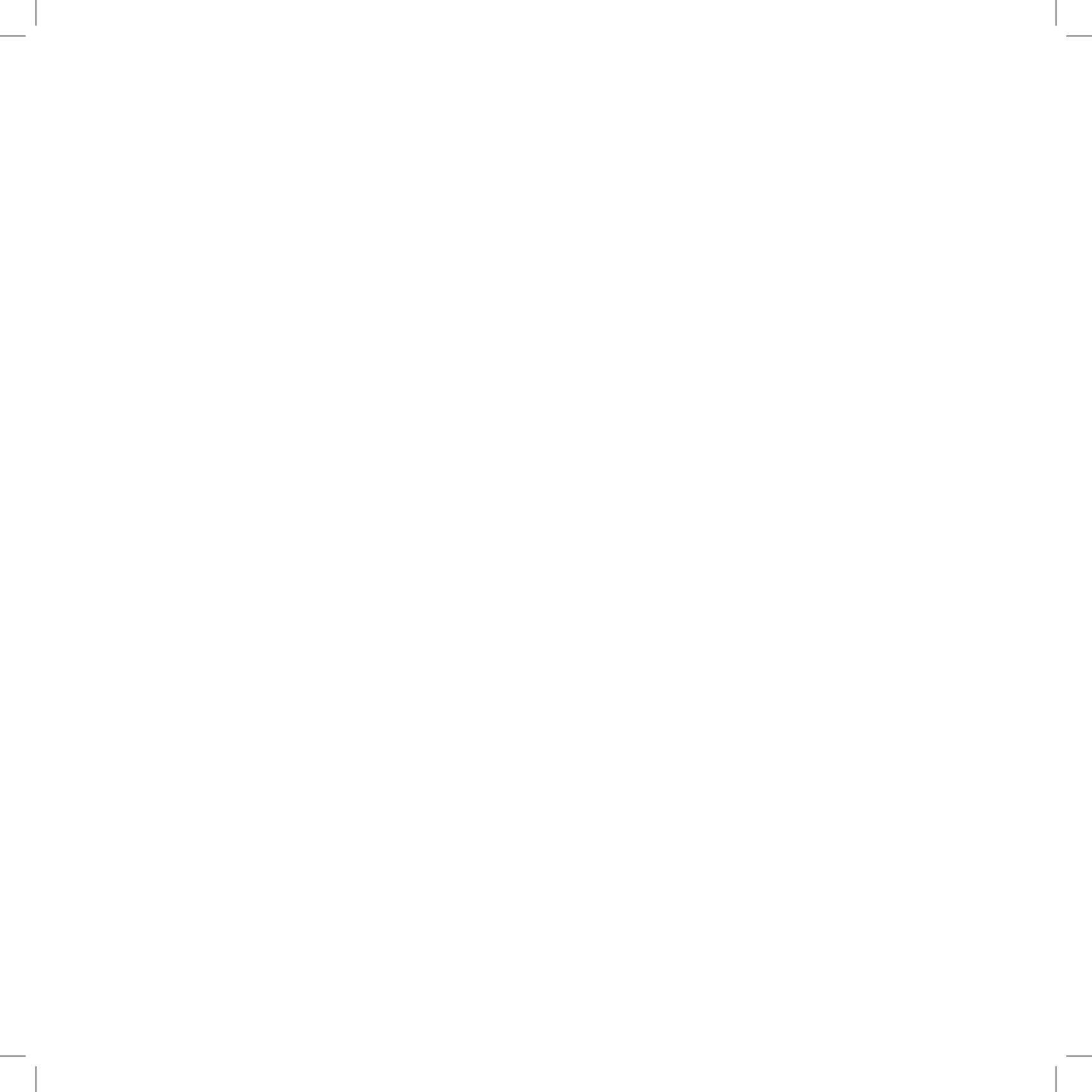
https://www.thewindpower.net/country_maps_fr_1_france.php

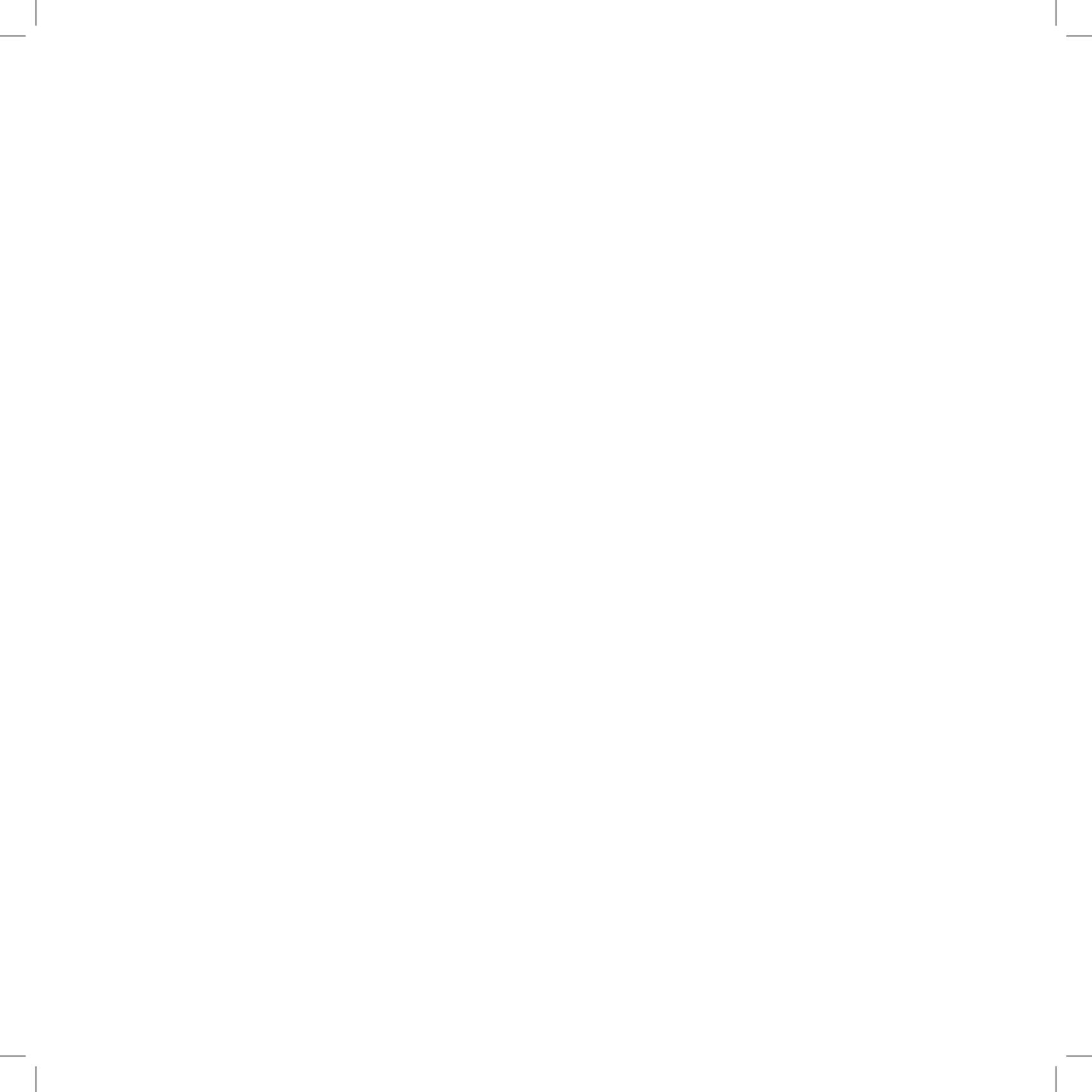
[.https://www.projeteolien-tersainly.fr/page/les-reponses-vos-questionsquantite](https://www.projeteolien-tersainly.fr/page/les-reponses-vos-questionsquantite)

<https://fee.asso.fr/leolien-en-regions/>

<https://www.revolution-energetique.com/dossiers/le-demantelement-et-le-recyclage-des-eoliennes/>

<http://www.journal-eolien.org/tout-sur-l-eolien/lanalyse-de-cycle-de-vie-de-leolien/>





NS/
E
AG

MASTER
DESIGN
RÉSILIENCE
HABITER

UGA
Université
Grenoble Alpes

