DISPOSITIFS ÉOLIENS INTÉGRÉS AUX FAÇADES DES BÂTIMENTS Modélisation et étude performative de dispositifs éoliens innovants intégrés à l'architecture des bâtiments pour la production d'énergie

David Serero

▶ **To cite this version:**

David Serero. DISPOSITIFS ÉOLIENS INTÉGRÉS AUX FAÇADES DES BÂTIMENTS Modélisation et étude performative de dispositifs éoliens innovants intégrés à l'architecture des bâtiments pour la production d'énergie. Architecture, aménagement de l'espace. Université Gustave Eiffel; Ecole doctorale Villes, Transports et Territoires; Ecole d'architecture Paris Malaquais; Laboratoire GSA, 2021. Français. NNT : . tel-03502123

HAL Id: tel-03502123
https://theses.hal.science/tel-03502123

Submitted on 24 Dec 2021

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

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

UNIVERSITE PARIS-EST
ECOLE DOCTORALE

Thèse de doctorat
en Architecture de

David Serero

DISPOSITIFS ÉOLIENS INTÉGRÉS AUX FAÇADES DES BÂTIMENTS

Modélisation et étude performative de dispositifs éoliens innovants intégrés à l'architecture des bâtiments pour la production d'énergie

sous la direction de :
Robert LE ROY, Jean-Denis PARISSE et co-encadré par Loïc Couton

Soutenue le mercredi 13 janvier 2021
ENSA Paris-Val de Seine - 3 Quai Panhard Levassor – Paris 13e

Membres du jury :

Laurent Lescop, Professeur à L'ENSA d'Architecture de Nantes, Architecte, Rapporteur
Julien Weiss, Professeur à l'Université Technique de Berlin, Rapporteur
Sandrine Aubrun, Professeure à l'école Centrale de Nantes, examinatrice
Loic Couton, Professeur à l'ENSA Paris-Malaquais
Robert Leroy, Professeur à l'ENSA Paris-Malaquais
et Jean Denis Parisse, Maitre de conférence, HDR à l'Université Aix-Marseille

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS 5

AVANT PROPOS 7

RESUME EN ANGLAIS – ENGLISH SUMMARY 9

1.0 INTRODUCTION GENERALE 11

VENTS ET ARCHITECTURE 17

1.1 REPERES HISTORIQUES DE L'UTILISATION DU VENT POUR LA VENTILATION ET LA PRODUCTION D'ENERGIE 21

1.2 ANALYSE DES PROBLEMES GENERES PAR LES EOLIENNES TRADITIONNELLES 43

1.3 ANALYSE DES TYPOLOGIES DE BATIMENTS EN SITE URBAIN : L'EXEMPLE DE PARIS 51

PARTIE 2 80

METHODOLOGIE D'INTEGRATION DES DISPOSITIFS AUX ENVELOPPES ARCHITECTURALES 80

2.0 INTRODUCTION 83

2.1 L'INTERNET DE L'ENERGIE 51

2.2 CARTOGRAPHIE DES VENTS ET ANALYSE DES POTENTIELS GEOGRAPHIQUES 85

2.3 METHODOLOGIE DE RELEVE DE DONNEES ANEMOMETRIQUES EN SITE URBAIN 94

2.4 ANALYSE COMPARATIVE DES DISPOSITIFS EOLIENS 107

2.5 CONCLUSION 113

PARTIE 3 114

MODELISATION ET EVALUATION PERFORMATIVE DES DISPOSITIFS 114

3.0 INTRODUCTION 117

3.1 PRINCIPES DE DEPLACEMENT D'AIR EN SITE URBAIN 117

3.2 PRINCIPES PHYSIQUES DE LA MECANIQUE DES FLUIDES 120

3.3 METHODE DE MODELISATION ET DEFINITION DES CONDITIONS INITIALES DE LA SIMULATION 131

3.4 SIMULATION NUMERIQUE D'UN DISPOSITIF EN TOITURE DE BATIMENT AVEC 3 TYPES DE CONDITIONS INITIALES 140

3.5 Conclusion 151

PARTIE 4 153

METHODOLOGIE D'INTEGRATION DES DISPOSITIFS AUX ENVELOPPES ARCHITECTURALES 153

4.0 INTRODUCTION 157

4.1 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE 157

4.2 MODELISATION NUMERIQUE - ETUDE THEORIQUE 1 : UN VOLUME BAS EN SITE DEGAGE 162
4.3 ETUDE THEORIQUE 2 : LES ACCELERATEURS VERTICAUX - PLAN BATIMENT AVEC FOIL TYPE V1 171
4.4 ETUDE THEORIQUE 3 : DISPOSITIFS EN ACROTERE 179
4.5 ETUDE THEORIQUE 4 : UN IMMEUBLE DE LOGEMENTS EN SITE URBAIN DE TYPE FAUBOURG - IMMEUBLE AU 136 AVENUE PARMENTIER, 75011 PARIS 181
4.6 ETUDE THEORIQUE 4 : UN BATIMENT-ILOT (IGH) EN SITE VENTE 187
4.7 BILAN DE CES 4 ETUDES 200
4.8 ETUDE DES EOLIENNES ADAPTEES A L'INTEGRATION ARCHITECTURALE 200

PARTIE 5 203
CONCEPTION ET INTEGRATION ARCHITECTURALE DES DISPOSITIFS 203
5.0 INTRODUCTION 207
5.1 PRESENTATION DE LA METHODE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE 208
5.2 TYPOLOGIES DES TURBINES INTEGREES ET MAQUETTES D'ETUDE EXPERIMENTALE 222
5.3 QUANTIFICATION DES PUISSANCES DES DISPOSITIFS 233
5.4 ESTIMATION DE PRINCIPE DE L'ENERGIE GLOBALE PRODUITE DANS UNE VILLE TYPE 234
5.5 DENDROGRAMMES ACTIONNELS D'AIDE A LA CONCEPTION 235
5.6 EXEMPLES D'INTEGRATION ARCHITECTURALE DE DISPOSITIFS DE PRODUCTION D'ENERGIE EOLIENNE 238
5.7 CREATION D'UNE BIBLIOTHEQUE EN ACCES LIBRE DES MODELES DES DISPOSITIFS EOLIENS SUR UNE PLATEFORME COLLABORATIVE BIM 258

6 CONCLUSION GENERALE 260

ANNEXE 1 : ETUDE INITIALE DE LA RECHERCHE : FABRICATION D'UNE SOUFFLERIE EXPERIMENTALE ET ETALONNAGE DU MODELE NUMERIQUE DE LA SIMULATION 267
ANNEXE 2 : FICHES TECHNIQUES DE DISPOSITIFS EOLIENS DE CAPTATION D'ENERGIE 275
ANNEXE 3 : DISPOSITIFS EOLIENS EXISTANTS INTEGRES AUX BATIMENTS 287
ANNEXE 4 : EXEMPLE D'ETUDE EOLIENNE A PARTIR D'UN OUTIL DE DESIGN GENERATIF (FUSION 360) 293
ANNEXE 5 : UN RAPPORT DE CALCUL DE LA SIMULATION STARCCM+ 296
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 306
INDEX DES ILLUSTRATIONS 315

REMERCIEMENTS

Dans les 4 années de développement de ce travail un grand nombre de personnes, d'institutions et de laboratoires ont contribué à cette recherche, lors de simples conversations téléphoniques, de réunions, ou parfois en passant de longues heures d'analyse ou de relecture de ce travail. Ces échanges, ces réflexions et hypothèses ont profondément nourri la thèse et ont mené à la maturité du travail.

Je ne pourrai citer ici toutes ces personnes et je m'excuse, par avance, auprès de celles que j'aurai oublié de mentionner.

Je souhaite en premier lieu remercier les personnes qui ont encadré cette recherche : Robert Leroy pour son attention particulière au travail et à l'approche méthodologique dans les différentes étapes du projet.

Jean-Denis Parisse de l'Ecole de l'Air pour son précieux soutien dans les étapes de ce travail et pour avoir attentivement suivi mes expériences et ma formation sur la simulation numérique de fluides en particulier sur le logiciel STARCCM+.

Et, en particulier, Loïc Couton qui a fortement participé à initier ce travail et m'a encouragé dans le démarrage de la thèse. Pendant 3 années, de 2013 à 2016, nous avons mené conjointement un séminaire de recherche à l'école d'Architecture Paris-Malaquais sur la conception des enveloppes intelligentes. Ce séminaire, qui a passionné les étudiants, a soulevé à plusieurs reprises, le fort potentiel des façades du bâtiment pour le contrôle des ambiances intérieures, mais surtout leur potentiel de production et de distribution d'énergie à l'ensemble du bâtiment.

Gilles Bouchet du laboratoire IUSTI et enseignant à l'Ecole des Ponts a pu vérifier les hypothèses de calcul, les résultats des simulations numériques et l'évaluation des puissances générées. Son accès à une ferme de calcul a permis d'obtenir des résultats sur des simulations que je ne pouvais calculer avec mes faibles moyens (ou qui auraient pris plusieurs semaines de calcul).

Je remercie le laboratoire GSA de l'ENSA Paris-Malaquais et son directeur Maurizio Brocato pour leur support et les échanges que nous avons pu avoir tout au long de ce travail.

Ainsi que le laboratoire EVCAU, de l'ENSA Paris Val-de-Seine, et tous ses membres pour tous leur support et leur aide dans les multiples expériences de relevé et d'analyse du vent que j'ai faites sur ce grand bâtiment du campus urbain de Paris-Diderot. Ce bâtiment a été un site important d'étude en raison de sa localisation sur un axe dégagé et venté à la limite de Paris.

L'école d'architecture Paris Val-de-Seine et son directeur Philippe Bach qui m'ont permis d'utiliser les laboratoires informatiques pour le calcul de nombreuses simulations et pour l'installation en toiture de l'école de plusieurs anémomètres connectées.

L'école des Ponts, pour m'avoir donné accès à leur formidable bibliothèque de recherche indispensable pour le travail bibliographique et m'avoir autorisé à utiliser leur soufflerie physique. Malheureusement, en raison de la crise sanitaire de COVID 19, cette possibilité n'est pu être entièrement explorée dans le cadre de cette étude.

Pascal Terracol et Stéphanie Boufflet, qui, dans le cadre du comité de suivi de la thèse, ont pris le temps de commenter le travail avec beaucoup d'intelligence et de bienveillance et de répondre et aux questions de méthode soulevées par la recherche.

Margarita Ferrucci, de la Soufflerie Eiffel pour ses remarques pertinentes sur le choix des sites d'études de cas et ses conseils sur l'implantation des anémomètres connectées d'analyse des vents.

Coralie Betbeder de l'école Polytechnique, pour son aide sur la mise en place de simulations numériques.

La société Netatmo, pour m'avoir laissé détourner leurs produits et les implanter de manière expérimentale sur des chantiers afin de générer un nuage de données précieux pour cette recherche.

Le Fablab de l'école Paris Val-de-Seine et le Fablab de Volumes et notamment Corentin Boiteau pour l'impression numérique de dizaines de modèles de turbines et de bâtiments afin de tester à échelle réduite les résultats de nos analyses et leur intégration architecturale.

Je remercie aussi tous les propriétaires, maitres d'ouvrage, entreprises de construction qui m'ont permis de visiter, de relever, de photographier ou de mesurer des bâtiments, des tours, des éoliennes, des moulins, des pompes à eaux pour les besoins de cette recherche comme notamment : le conseil Syndical du 136 Avenue Parmentier (qui m'a autorisé à installer plusieurs anémomètres dès 2016 sur le toit de cet immeuble), la Communauté de Communes Bayeux Intercom pour les relevés sur le toit de la médiathèque de Bayeux, l'université Grenoble Alpes pour les mesures sur le centre de recherche Climat Planète, les moulins à vent de Pla San Jordi à Mayorque, le moulin de Coudrey (14), le centre des affaires publiques de San Francisco, USA, l'hôtel Marina Bay Sand de Singapore et sa façade éolienne kinétique, la tour à vent des jardins de Dolat-abad à Yadz en Iran, la grande éole , l'éolienne à axe vertical de Cap-Chat à Montréal.

Et tous les collaborateurs de l'agence SERERO qui ont participé à la fabrication de modèles physiques, de prototypes d'éoliennes et aux longs calculs des simulations, et en particulier : Mahdi Derakhshan, Hsin-Yu Chen et Camille Ballon.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury de cette thèse qui ont tous accepté, sans aucune hésitation, à participer à la soutenance de cette recherche et au long processus d'évaluation de ce travail : Sandrine Aubrun, Julien Weiss et Laurent Lescop.

AVANT PROPOS

Ce travail vise l'obtention d'un doctorat en architecture. Ce dispositif relativement récent a été dominé par les études historiques ou sociales de l'architecture et fait toujours aujourd'hui l'objet de débat dans les écoles d'architecture françaises, et en particulier à un moment ou le statut des enseignants- architecte s'aligne sur celui des enseignants-chercheurs de l'université : Qu'est qu'une thèse d'architecture ? Est-ce une discipline du domaine des sciences sociales, ou de l'ingénierie ? Une œuvre architecturale n'est-elle pas déjà un acte de recherche ? Si l'architecte développe dans certains cas des connaissances nouvelles sur l'art de construire, ne génère-t-il pas une démarche artistique qui ne constitue pas un apport à la pratique ou aux méthodes de conception ?

Ces questions restent en suspens et chaque thèse en architecture participe à l'éclaircissement et à la définition de ce type de doctorat.

Ma recherche a pris l'axe singulier, de s'appuyer **un double corpus de connaissances** : la conception architecturale et la mécanique des fluides permettant de sortir l'architecture de son isolement entre les Arts et l'ingénierie et de proposer une fertilisation croisée de ces disciplines. L'approche est donc transdisciplinaire, et vise à décaler le champ d'étude de la mécanique des fluides en étudiant l'impact du vent dans des zones hyper-localisées de grands bâtiments, et d'informer la conception architecturale sur le changement d'écoulement d'air inévitable à la périphérie de son enveloppe.

Pourrions-nous proposer une nouvelle approche de la conception en associant les outils d'analyse et de calcul de phénomènes de la mécanique des fluides avec une expertise d'architecte en secteur urbain ?

Cette recherche, à mi-chemin entre architecture et ingénierie, est facilitée par **des outils numériques émergents**, qui permettant de réaliser de données du bâtiment difficilement envisageables auparavant. Ces informations constituent un ***« environnement de conception du projet »*** visant à « profiler », à dessiner le bâtiment, selon **une méthode performative, plutôt que sur une simple approche artistique**.

La méthode de conception architecturale qu'utilisent les architectes : conception parallèle d'une échelle à l'autre du projet, affinement du sens global du projet à son expression la plus fine dans les détails architecturaux, réalisation de prototypes et préfiguration de l''assemblage des matériaux du projet, sont des méthodes éprouvées pour analyser, comprendre et concevoir un espace.

Cependant, malgré les efforts et les heures passées à améliorer mes connaissances techniques en mécanique des fluides, je ne peux être considéré comme un spécialiste du sujet. La méthode de calcul, les conditions limites et conditions initiales, le choix de l'algorithme de calcul ont une importance capitale dans la précision des résultats. Des détails dans ces éléments peuvent facilement faire dévier le calcul du comportement réel et dégrader gravement la précision du calcul. L'acquisition complet de ces savoirs dépasse le cadre temporel de cette recherche.

Par contre la possibilité pour l'architecte d'interagir directement avec les outils d'analyse permet de mieux appréhender l'impact de chacun de ses choix sur l'environnement du projet, son contexte urbain et territorial. Il semble désormais évident que si les données numériques constituent un nouveau corpus de la recherche, les chercheurs doivent apprendre à maitriser leur analyse et leur manipulation. **L'architecte-chercheur** établit ainsi des dispositifs de génération et d'analyse de données, et développe un mode de conception informé de type Design by Data.

RESUME EN ANGLAIS – ENGLISH SUMMARY

Cities, because of their wide variety of building heights, streets corridors and open spaces, have an important potential in the creation of wind acceleration zones. For a long time, airflows generated by buildings have been seen as nuisance for the city. This research on urban wind, by the use of advanced computer fluid dynamics modelization (CFD) showcases that one can precisely locate and evaluate the potential of accelerated airflows around buildings. How would cities look like, in the future, if architects would seize this technology and integrate micro-wind turbines to their design?

This research analyzes several architectural designs based on the airflow simulation model we developed, compares the results with on-site wind speed data survey around buildings, and presents design examples with fully integrated design of wind turbine to building. The method developed in the research aims to provide a straightforward design methodology for architects to integrate wind energy harvesting devices to their projects.

Our research proposes to address the potential of wind energy in urban city, considering that cities are now planned with high level of details 3D models, or with large scale 3D scans of buildings blocks (Lidar technology). Computer fluid dynamics simulations of large urban districts have the potential to become now part of the conceptual tools of architects and designers. Building envelopes are becoming smarter; Building's façade or rooftops are available for wind energy harvesting devices integrated to building, such as photovoltaic panels and wind turbines.

Combining connected anemometers wind survey with computational fluid dynamic (CFD) software STARCCM+, we simulated the reaction between wind and several building typologies to predict potential extracted energy by measuring wind speed acceleration (the extracted energy depends on the cube of the wind speed). The geometry of buildings contributes to wind speed enhancement.

Following an in-depth analysis on the performance and behavior of existing building that integrates these devices, we further studied devices such as "aérofoil" (an acceleration and control wing at the edge of the turbine) to accelerate wind speed to a specific point and to stabilize airflow turbulences. The aérofoil's goal is to developed strategies to compensate the unstable airflows conditions in urban environment and to optimize the wind speed amplification effect of buildings.

In conclusion, if most energy engineers have turned away from urban wind energy harvesting because of their turbulent characteristics, each building can be considered as a wind accelerator with a high potential for cities to produce renewable energy locally, closer to the consumption area.

Keywords—

CFD simulation in urban environment
Wind energy harvesting devices
Net-Zero Energy Building
Urban wind behavior Simulation

1.0 INTRODUCTION GENERALE

1.0.1 Contexte de la recherche

Sans vent, y- aurait-il de la vie sur notre Terre ? Si les vents de notre atmosphère sont capables de déplacer 150 000 tonnes de grains de sable en quelques minutes, de pomper des millions de tonnes d'eau aux Pays-Bas, de participer au déplacement et à la fertilisation des espaces végétales sur notre planète, leur force invisible est souvent négligée et sous-évaluée à l'exception de quelques-uns de ces épisodes spectaculaires qu'ils nous offrent lors de passage de typhons ou de tempêtes… Et pourtant, ce n'est que du vent.

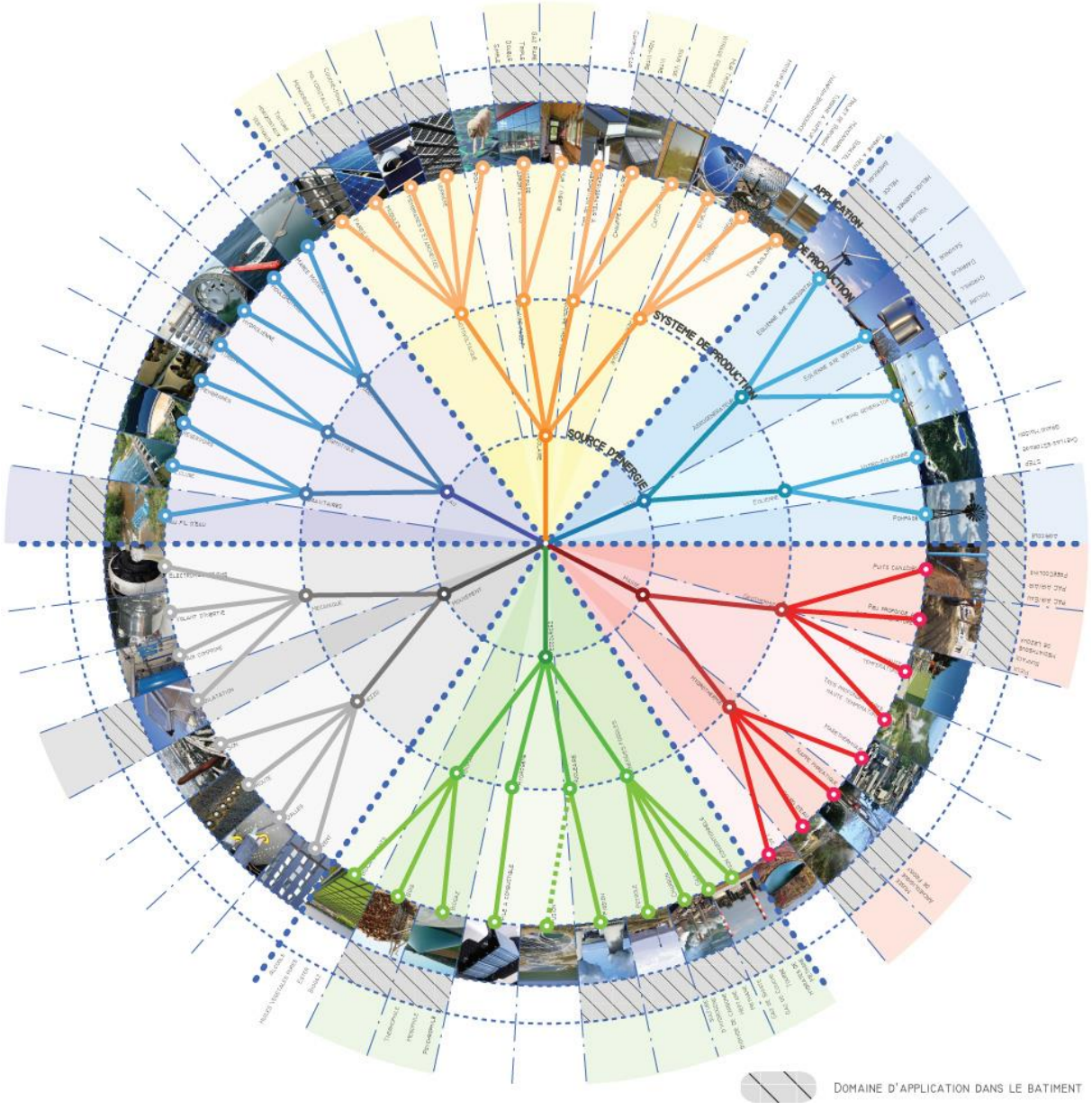


Figure 1. Cartographie des sources d'énergies renouvelables non-utilisées à ce jour dans le bâtiment Par D. Serero

En 1891, deux ans après la construction de sa célèbre tour à Paris, Gustave Eiffel arrête la construction de structures de grande hauteur pour se concentrer exclusivement à l'étude de l'impact des vents sur les bâtiments grâce à la soufflerie qu'il a construit à Auteuil[1]. Il consacrera les 20 dernières années de sa vie à analyser et comprendre les règles de l'aéraulique et de la vibration des structures.

Ce travail d'Eiffel marque le changement de son travail d'ingénieur spécialisé dans l'optimisation et la construction des structures métalliques à une recherche de simulations expérimentales de la force du vent. Gustave Eiffel écrira : *« le vent est la contrainte principale des structures légères de grande hauteur. »*[2] Architectes et ingénieurs passeront les 50 années suivantes à améliorer la résistance des structures, à optimiser la quantité de matière nécessaire à chaque design et à limiter les effets vibratoires du vent qui peuvent les fragiliser ou générer des sifflements.

Cette énergie issue du rayonnement solaire et des déplacements de très grands volumes d'air sur notre planète a un impact fondamental sur notre climat, mais le phénomène météorologique est complexe et difficile à appréhender. Il a souvent été vu comme l'archétype de la théorie du Chaos « un battement d'ailes d'un papillon au Brésil peut-il provoquer une tornade au Texas ? »[3] des mathématiciens[4] et météorologues qui ont eu accès dès les années 1970 aux premières simulations informatiques.

Cette recherche a pris l'axe singulier, de s'appuyer sur un double corpus de connaissances : la conception architecturale et la mécanique des fluides permettant de proposer un apport combiné de ces disciplines.

A mi-chemin entre architecture et ingénierie, ce travail est facilité par des outils numériques émergents, permettant de produire de données du bâtiment difficilement envisageables auparavant. Ces informations constituent un *« environnement de conception du projet »* visant à « profiler », à dessiner le bâtiment, selon une méthode performative, plutôt que sur une simple approche artistique.

1.0.2 Repenser les lieux de production d'énergie

Un vent de protestation souffle depuis quelques années sur l'implantation des éoliennes dans le paysage : La découverte des impacts néfastes sur la biodiversité, la pollution aérienne par micro-vibrations, des effets cinétiques des pales éoliennes néfastes sur la santé, la prise de conscience de la valeur patrimoniale du grand paysage et l'accélération des dérèglements climatiques avec augmentation des épisodes de vents violents sur notre planète sont autant de points de résistance au développement de cette énergie sur notre territoire.

---

[1] La soufflerie Eiffel est située au 67 rue Boileau à Paris 16ème et est toujours en activité à ce jour.

[2] Gustave EIFFEL, *Travaux scientifiques exécutés à la tour de 300 mètres : De 1889 à 1900*, BnF collection ebooks, 2016, 318 p.

[3] Titre de la conférence du météorologue américain Edward Lopez en 1972 à l'American Association for the Advancement of Science. Les simulations informatiques qu'il a réalisées dès 1963 en font un des précurseurs de ce phénomène typique de la théorie du chaos.

[4] Henri Poincaré et Pierre-Simon de Laplace, mathématiciens précurseurs de la théorie du chaos. Cette théorie, prend comme hypothèse qu'une déviation très faible sur un paramètre peut avoir une influence importante sur la situation résultante à une date ultérieure.

D’autre part, la très grande perte d’énergie par induction électromagnétique le long des câbles de grande distance (30 % de l’énergie produite par les éoliennes est perdue lors du transport de l’énergie) nous pousse à envisager un **rapprochement des zones de production d’énergie des zones de consommation d’énergie.** De nouveaux dispositifs d’éoliennes de type micro-turbine (en particulier à axe vertical) nous permettent d’envisager la réutilisation d’un **territoire urbain et construit** pour la production diffuse et continue d’énergie renouvelable.

L’arrivée d’éoliennes à transmission directe sans engrenage (qui limite le bruit et l’entretien de la boîte d’engrenage) combiné avec l’émergence des objets connectés peuvent constituer la **base d’un nouvel espace de partage et d’échange d’énergie géolocalisé en temps réel**. Le contrôle de la demande et la ressource nous font passer au nouveau paradigme de la micro-décentralisation de la production de l’énergie afin répondre aux enjeux du lissage de la production d’énergie éolienne (liés aux à-coups de vent).

Ces problematiques de déploiement de l’énergie éolien sur nos territoires, soulèvent plusieurs hypothèse de travail pour repenser ce fonctionnement :

- Pourrions nous travailler sur le paysage de nos villes afin de proposer une meilleure intégration de ces dispositifs dans un panorama urbain ?
- Pourrions nous rapprocher les lieux de production d’énergie des lieux de consommation ?
- Nos batiments peuvent-ils devenir des supports de capteur d’énergie, et intégrer un champ d’éoliennes plus petites groupées plutôt que quelques grandes éoliennes ?

1.0.3 Objectifs de la recherche

Lors de l’études des utilisations passées du vent, des premiers moulins, au développement du micro-éoliens urbain, et de l’analyse de nouveaux paradigmes telles le partage et d ’échange de l’énergie, ou le relevé anémométriques en site urbain, nous avons défini quatre objectifs principaux pour la thèse :

1 – Mesurer et partager des données de relevé de vent hyper-localisé en site urbain (en accès libre de type Open data)

2- Mise au point d’une méthode scientifique et architecturale de modélisation de l’écoulement du vent et d’évaluation de sa vitesse autour de bâtiments

3- Sur la base de cette analyse conception de dispositifs architecturaux de production d’énergie en cohérence avec l’architecture du bâtiment.

4- Définition d’une méthode simplifiée de type « manuel » d’aide à la conception architecturale de dispositif de production d’énergie intégrés : le dendrogramme

Ces objectifs permettent, dans la logique du projet architectural, d’accompagner le concepteur de l’analyse du site jusqu’à l’intégration de systèmes éoliens à son projet. Les données sur le site seront les bases pour développer une réflexion et une méthodologie de conception de systèmes de production d’énergie embarqué au projet.

1.0.4 Méthodologies déployées dans la recherche

Dans le cadre de ma pratique d'architecte sur la performance des enveloppes architecturales, j'ai étudié, à plusieurs reprises, la possibilité de transformer des bâtiments en supports de dispositif de captation d'énergie éolienne (Voir figure 1) . Ces tentatives sont un des facteurs qui ont motivé ce travail de recherche. Les techniques de simulation aéraulique numérique, offrent un nouvel horizon pour analyser ces phénomènes d'écoulement et d'interaction de particules. Depuis 2015, et en particulier depuis mon travail à la Villa Médicis sur la simulation des effets acoustiques dans un espace de spectacle[5], je suis convaincu de la nécessité **de développer de nouveaux outils d'analyse de phénomènes physiques pour repenser notre manière de concevoir les bâtiments**.

La première étape de la recherche est d'établir un état de l'état de l'art par des recherches bibliographiques et techniques. Beaucoup de recherches ont été effectués sur l'optimisation, l'évaluation ou la conception de systèmes de production énergie éoliennes. Beaucoup moins de recherches existent sur la question du micro-éoliens embarqués, et encore moins sur le mode de relevé de vents en site urbain.

L'un des objectifs de cette recherche est de catégoriser les différents types de vent en zone urbaine et d'identifier leur mode d'écoulement autour des bâtiments. Pour cela, nous avons mise en œuvre **une méthode de relevé de données de vents urbains** , qui permet d'établir une cartographie des vents urbains. Pour cela, nous avons utilisé des anémomètres à ultrasons connectés qui ont été implantés sur plusieurs sites d'étude. Les données sur les vents, fournies en continu, à chacun de ces points sont ensuite utilisées comme référence pour la simulation numérique aéraulique.

Nous avons aussi, dans cette recherche, utilisé une **méthode de simulation numérique aéraulique en utilisant le logiciel STAR CCM+** . Ces simulations sont réalisées à partir de modèles 3D de bâtiments et de zones urbaines, que nous avons modélisés (Revit, Rhinoceros). L'environnement de calcul est paramétré selon les conditions de vent de l'expérimentation et le type de résultat recherché. Cette méthode permet de développer le modèle volumétrique complet du comportement du vent sur une zone de toiture, ou un îlot urbain dans son intégralité.

Troisièmement, nous avons établi une nomenclature des principaux dispositifs de micro-éoliens ainsi que de leur type d'implantation en site urbain. En identifiant les spectres des vents, nous pouvons définir le choix et la performance de dispositifs de captation d'énergie qui pourraient être implantés sur le bâtiment. , ainsi que le mode de fixation en toiture ou façade, le type de vent, l'altimétrie du dispositif par rapport au niveau des toitures, les nuisances potentielles alentours.

Malgré les efforts importants effectués dans le cadre de cette recherche à améliorer mes connaissances techniques en mécanique des fluides, je ne peux être considéré comme un spécialiste d'aéraulique urbaine. La méthode de calcul, les conditions limites et conditions initiales, le choix de l'algorithme de calcul ont une importance capitale dans la précision des

[5] David SERERO, « Dômes Acoustiques à géométrie variable », *Journal de l'Académie de France à Rome Villa Médicis*, 04/2006 p.

résultats. Plusieurs éléments, dans les conditions initiales, ou dans le mode de calcul ont parfois été simplifiés pour tenir dans des temps de calcul raisonnable de moins de 3 à 5 jours.

1.0.5 Présentation du plan

Cette recherche s'articule autour de cinq parties:

La première partie : **Vents et architecture,** fait un état des premières utilisations du vent à l'émergence d'énergies renouvelables. Ce chapitre permet en particulier de découvrir la variété des dispositifs éoliens adaptés à des sites urbains.

La deuxième partie s'intéresse à la **méthodologie d'intégration architecturale des dispositifs de production d'énergie**. Ce chapitre fait une étude poussée des typologies de bâtiment dans les sites urbains éclectiques et propose une approche du phénomène de turbulence de vent en site urbain.

Plusieurs de ces typologies de bâtiment ont fait l'objet de mesures anémométriques multiples réalisées spécifiquement pour cette recherche. La mise en place d'anémomètres connectés sur un bâtiment permet de préfigurer un réseau urbain pour collecter et partager en temps réel des données éoliennes.

La troisième partie : **Modélisation et l'évaluation performative des dispositifs** met en place le modèle expérimental utilisé pour réaliser les études aérauliques de cette recherche. Nous avons privilégié, à la suite à de plusieurs expérimentations, une simulation numérique des dispositifs, étalonnée et comparée à des relevés (prise de mesures) de vent par des anémomètres connectés à ultrasons (réalisé sur une demi-douzaine de bâtiments situés dans le Grand Paris).

La quatrième partie étudie plusieurs cas d'implantation de ces dispositifs et une **évaluation performative de plusieurs prototypes**, en combinant modélisation 3D des enveloppes avec une simulation en soufflerie numérique utilisant le logiciel STAR CCM+. L'analyse numérique de la forme architecturale permet d'ajuster le profilage du projet et ceci est présenté sur des maquettes d'études en impression 3D.

La **cinquième partie** présente un grand nombre de simulation d'intégration architecturale dans des bâtiments existants ou en cours de réalisation. Ce chapitre présente les bases d'un « manuel » dédié aux architectes et aux designers permettant rapidement d'évaluer l'intérêt d'intégrer à un bâtiment un capteur d'énergie éolienne.

En synthèse :

1 - Vents et architecture, fait l'état de l'art sur le sujet et définit la problématique de la recherche

2 - Cartographier les vents, présente les modes de cartographie des vents et les difficultés à obtenir des données hyperlocales en site urbain

3 – Méthode de simulation numérique aéraulique, présente la méthode et le mode de calcul aéraulique mise en place sur STAR-CCM+

4 – Méthodologie de conception des dispositifs éoliens, développe un grand nombre de calcul et d'expérimentation pour profiler et concevoir des accélérateurs à vent

5 – Intégration architecturale et dendrogramme, développe l'approche architecturale de ces systèmes et établit les éléments d'un guide d'aide à la conception

Conclusion et perspectives, résume la recherche et quelques perspectives de développement de ce travail

PARTIE 1

VENTS ET ARCHITECTURE

Des premières utilisations du vent aux énergies renouvelables

Contenu :

- Histoire de l'énergie éolienne et de la ventilation des bâtiments
- Analyse des problèmes générés par les éoliennes traditionnelles
- Etudes de typologies du bâti dans le paysage urbain : l'exemple de Paris

1.1 REPERES HISTORIQUES DE L'UTILISATION DU VENT POUR LA VENTILATION ET LA PRODUCTION D'ENERGIE 21
1.1.1 DES PREMIERS MOULINS A VENT AUX EOLIENNES OFFSHORES 21
1.1.2 Des premiers moulins à vent aux génératrices offshore 21
1.1.3 Les premiers moulins à vents – Deux exemples en Iran 22
1.1.4 Etude de cas des tours à vent appelée Badgir 23
1.1.5 L'émergence du moulin à vent 26
1.1.6 De l'éolienne de Cleveland aux éoliennes modernes 30
1.1.7 L'évolution des installations éoliennes offshore 33
1.1.8 La rupture technologique attendue de l'éolien flottant *farshore* 34
1.1.9 Avantages et inconvénients de la technologie éolienne offshore 35
1.1.10 Limites rencontrées pour leur exploitation 35
1.1.11 Les constructeurs et les opérateurs à l'échelle mondiale 35
1.1.12 Production d'énergie des parcs éoliens offshore 36
1.1.13 Zone de développement et paysage marin 36
1.1.14 Les dates clés du développement des parcs offshores 36
1.1.15 Le futur de cette technologie 37
1.1.16 Evolution des dispositifs d'analyse du comportement du vent 38

1.2 ANALYSE DES PROBLEMES GENERES PAR LES EOLIENNES TRADITIONNELLES 43
1.2.1 Un vent de protestation souffle sur les éoliennes 50
1.2.2 Bilan environnemental global 43
1.2.3 Intermittence et rendement de l'énergie éolienne 45
1.2.4 Éléments polluants contenus dans l'alternateur .... **Error! Bookmark not defined.**
1.2.5 Impact sonore 45
1.2.6 Impact des infrasons 46
1.2.7 Impact visuel 43
1.2.8 Impact sur les oiseaux et les chauves-souris 47
1.2.9 Impact sur la propagation des ondes 48
1.2.10 Artificialisation des sols 48
1.2.11 Impact du démantèlement 48
1.2.12 Impact sur la dynamique terrestre naturelle 50

1.3 ANALYSE DES TYPOLOGIES DE BATIMENTS EN SITE URBAIN : L'EXEMPLE DE PARIS .. 51
1.3.1 Introduction 61

1.3.2 Avant 1800: 62
1.3.3 Entre 1801 – 1850 : 64
1.3.4 Entre 1851 – 1914 : 66
1.3.5 Entre 1918 – 1939: 68
1.3.6 Entre 1945 – 1974: 71
1.3.7 Entre 1975 – 2000: 73
1.3.8 Synthèse des typologies urbaines identifiées 76
1.4 Conclusion 78

1.1 REPERES HISTORIQUES DE L'UTILISATION DU VENT POUR LA VENTILATION ET LA PRODUCTION D'ENERGIE

1.1.1 DES PREMIERS MOULINS A VENT AUX EOLIENNES OFFSHORES

Ce chapitre, intitulé Vents et Architecture, est développé le long de 3 axes :

- Premièrement, une synthèse historique et technique de l'histoire de l'énergie éolienne
- Deuxièmement, l'analyse des problèmes générés par les éoliennes traditionnelles
- Troisièmement, les études de typologies du bâti dans le paysage urbain en prenant l'exemple du bâti parisien.

De nombreux dispositifs ont été mis au point par les hommes pour produire de l'énergie par l'utilisation des phénomènes naturels tels que le vent, les marées, les courants d'eau.
Que ce soit l'assèchement des polders aux Pays-Bas, la production de farine par des moulins à vent ou le développement de la navigation maritime, le vent a toujours été une source importante et fascinante du développement de l'activité humaine et un témoin de l'intelligence de l'homme à utiliser des ressources locales. Les inventions liées aux sports telles que le kitesurf, ou les courses de bateau à hydrofoil sont des exemples intéressants de la maîtrise par l'homme des vents pour la découverte du territoire ou pour le simple plaisir.

1.1.2 Des premiers moulins à vent aux génératrices offshore

Dès l'Antiquité, de Babylone aux côtes de la Perse, les moulins à vent se propagent d'abord à travers le Moyen-Orient, avant de s'implanter en Egypte. Vers l'an mille, les moulins à vents sont utilisés comme outils pour moudre les céréales (meule de pierre tournante), extraire l'huile ou encore pomper l'eau nécessaire à l'irrigation des cultures. Ils viennent remplacer le travail humain fastidieux et répétitif. A la fin du XIXème siècle, l'Allemagne en compte plus de 18 000 sur son territoire, et la Finlande 20 000. Nous nous intéressons ici à quelques éléments singuliers de l'histoire de la maitrise du vent et de la création des premières éoliennes jusqu'à leur développement les plus récents.

Au VIII^{ème} siècle, en Iran, la création de « murs à vent » ou de moulin à vent constitue l'identité architecturale de certaines villes dans le désert. L'exemple remarquable de la ville de Yazd en Iran et de ses cheminées à vent appelées Badgir permettent de ventiler, dès le VIII^{ème} siècle, des maisons par l'utilisation de courants d'air géothermiques (passant dans les puits horizontaux de rafraîchissement). Ceci constitue la naissance de la climatisation par simple mouvement d'air (convection basée sur la température entre chaud et froid). Ces exemples montrent que, très tôt, la gestion du vent autour du bâtiment participe à la conception climatique et architecturale de ces édifices, tout comme celle des maisons dans le paysage de Bretagne ou de Provence liée aux grands vents pendulaires (Mistral, les vents d'Ouest).

1.1.3 Les premiers moulins à vents – Deux exemples en Iran

Figure 2. Les moulins à vent en terre crue de la ville de Nashtifan à l'est de l'Iran [6]

Figure 3. Les pales verticales des moulins à vent en terre crue remontent en partie contre le vent et limite la vitesse du dispositif, src : National Gepgraphic, photo Reza Azizfarkhani

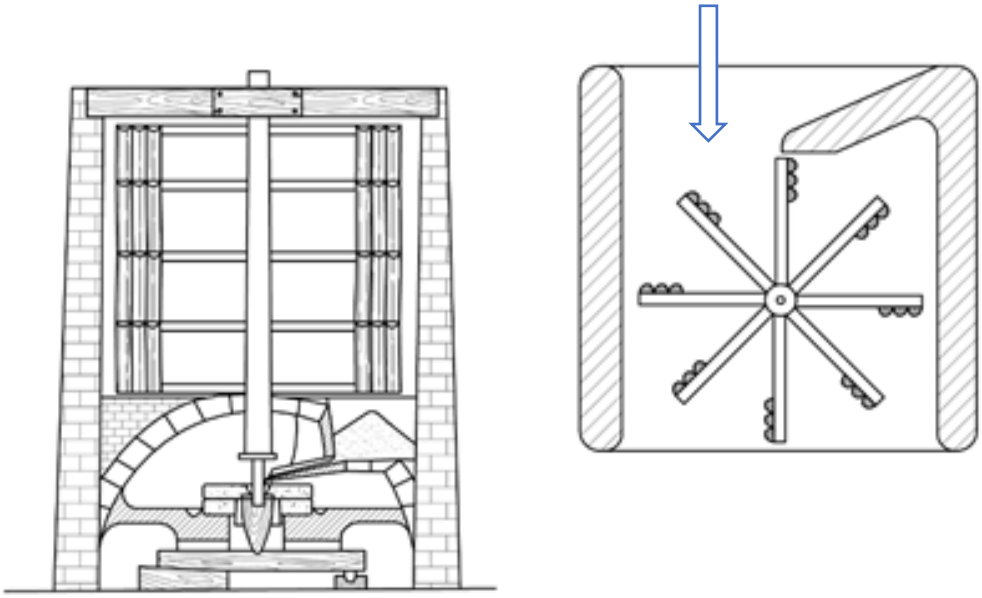


Figure 4. Schéma de fonctionnement des moulins de Nashtifan, relevé par WHC UNESCO

L'une des principales caractéristiques de la ville de Nashtifan[7] est le vent violent qui l'atteint. Ceci constitue très probablement l'origine de son nom qui est dérivé du mot Nish Toofan (aiguillon de la tempête). En raison des éléments naturels de la région, les éoliennes (voir figure 2 et 3) font partie des inventions développées de manière précoce et qui ont été utilisées depuis des siècles. La vitesse du vent pouvant parfois atteindre 120 km/h, ces éoliennes ont été construites perpendiculairement à la direction du vent, afin de maximiser son rendement. Elles ont fait l'objet d'une étude complète par Moshtaghe Gohari[8].

Une trentaine de ces éoliennes sont dispersées dans la région et peuvent atteindre une hauteur de 15 à 20 mètres. D'après mes recherches, il semble que ces types de moulin à vent ont été construits pendant la dynastie Safavid et sont généralement construits en argile, en paille et en

[7] Nashtifan, ville située dans la partie orientale de l'Iran

[8] Kambiz MOSHTAGHE GOHARI, *Morphogenèse des moulins à vent d'Iran, techniques de gestion du vent de manière architectonique*, These de doctorat, Paris Est, 2018.

bois. Les pales en bois de ces moulins font tourner les meules dans une pièce en terre. Chacune des éoliennes est composée de 8 chambres rotatives, abritant chacune 8 pales verticales (essentiellement une paroi à fentes) (Voir figure 4). Une fois que les chambres ont commencé à tourner sous l'effet du vent, l'essieu principal de l'éolienne tourne et enclenche les moulins à grains. Les vibrations créées par cette rotation déplacent progressivement les grains de leur récipient de stockage vers les moulins à grains qui les transforment en farine.[9]

Ces éoliennes comptent parmi les plus anciennes au monde et l'idée de construire des éoliennes dans d'autres pays, en particulier aux Pays-Bas, prend probablement sa source dans l'architecture iranienne. Ces moulins à vent ont été inventés dans l'est de la Perse aux alentours de 500 à 900 après J.-C. Le premier exemple retrouvé est celui de voiles verticales constituées de faisceaux de roseaux ou de bois attachés à la tige verticale centrale par des entretoises horizontales. L'inconvénient de ces éoliennes est que, les panneaux éoliens tournant horizontalement, un seul côté du dispositif absorbe l'énergie éolienne, tandis que l'autre moitié du dispositif tourne contre le vent et limite la vitesse de rotation du moulin.

1.1.4 Etude de cas des tours à vent appelée Badgir

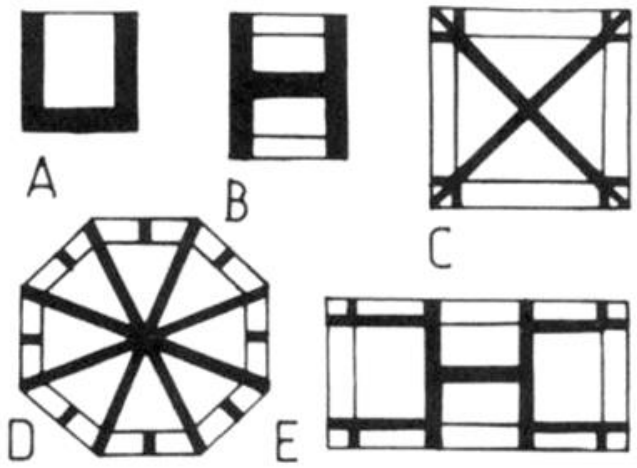


Figure 5. Plans en coupe de cinq types de tours à vent typiques de la ville de Yazd au niveau des évents. A. Unidirectionnel. B. bidirectionnel. C. Quatre directions. D. Octogonal avec deux bouches d'aération de chaque côté. E. Quatre directions avec deux "faux" évents sur deux côtés opposés[10].

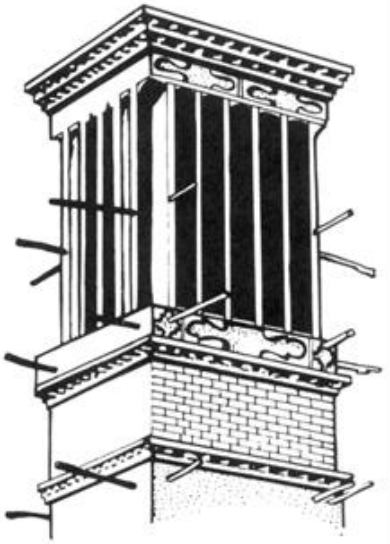


Figure 6. Une éolienne à Yazd avec des poteaux en bois sur lesquels sont fixés des échafaudages à des fins de maintenance. [11]

Yazd est connue sous le nom de « šahr -e- bādgīrhā », la ville des tours à vent , et est réputée pour le nombre et la variété de ses tours à vent, dont certains datent de la période timuride[12]. Les capteurs de vent ici sont des tours de briques qui montent généralement de 30 cm à 5 m au-dessus du toit, bien que le plus haut Bādgīr du monde, construit à Bāḡ-e-Dawlatābād à Yazd, s'élève à 33,35 m au-dessus du toit du pavillon de jardin qu'il dessert.

Les tours à vent ont des ouvertures au sommet sur un, deux ou jusqu'à 8 de ses côtés (Figure 5 et 6) et ont été décorés de briques, de plâtre de boue ou de plâtre de chaux richement sculptés. L'utilisation la plus courante des capteurs de vent est de refroidir et d'aérer l'été les salons au

[9] *BĀDGĪR – Encyclopaedia Iranica*, http://www.iranicaonline.org/articles/badgir-traditional-structure-for-passive-air-conditioning, consulté le 26 février 2019.
[10] Gholamreza DEHGHAN KAMARAGI, *Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique : histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances.*, These en architecture, Laboratoire GSA, Université Paris Est, 2012.
[11] *Ibid.*
[12] O'KANE, « The Madrasa al-GhiyāsÂiyya at Khargird », *in* , 1976, p. 85.

rez-de-chaussée et au sous-sol des maisons[13]. L'air emprisonnée dans les bouches d'aération de la tour est refroidi à mesure qu'il descend et rafraichi les occupants des pièces situées au-dessous par convection et évaporation (Figure 7). Quand il y a peu de vent ou pas du tout, l'air monte dans la tour, dont les murs sont chauffés par le soleil, aspirant ainsi de l'air frais et humide de la cour et du sous-sol à travers les salles d'été[14]. La ventilation par les tours à vent est particulièrement importante dans les sous-sols, où l'on passe la nuit, les après-midis et les nuits d'été. Les capteurs de vent sont également construits sur les locaux d'habitation des caravansérails, sur les salles de prière des mosquées et sur les citernes d'eau où ils refroidissent efficacement l'eau stockée par évaporation.

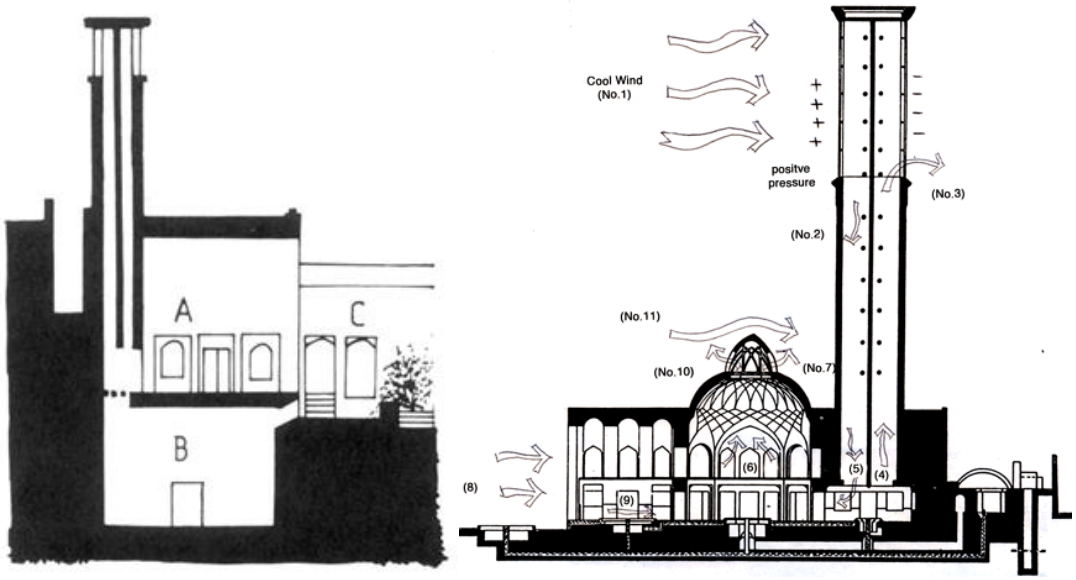


Figure 7. Cross section through a wind catcher serving the main summer rooms of a house in Yazd. A. Ṭālār. B. Basement. C. Courtyard with pool par H. Ahmadikia. [15]

La partie principale de cette architecture est le très grand Badgir d'une hauteur de 33,35 m et d'un plan octogonal. Ce Badgir (Voir figure 7) capte les vents froids (1) à un niveau plus élevé, dans toutes les directions, et les canalise (2, 5) dans les espaces intérieurs. Le vent sec et chaud (5) passera au-dessus d'un étang avec une fontaine et deviendra frais et humide avec l'évaporation. L'air frais et humide (6) pénètre ensuite dans la pièce. Il y a une augmentation de la pression atmosphérique au vent (1) et une diminution au vent sous le vent (3), de sorte que le Badgir capte l'air au vent et aspire l'air sous le vent, ventilant ainsi l'intérieur. Une étude développée du principe de ventilation et rafraichissement et modélisation numérique du principe des Bagdirs a été réalisé par l'architecte iranien Dehghan Kamaragi[16] en 2014.

Ce bâtiment a un dôme sur le hall central, qui aide à la ventilation, l'air chaud monte sous le dôme et sort par ses bouches d'aération, il se produit par effet de cheminée sans vent, mais s'il y a du vent, le vent augmente la ventilation de deux façons. Tout d'abord, le vent sur le dôme crée une pression négative près des passages et cette pression négative aspire de l'air. L'air (8) entre par les grandes fenêtres en passant par des étangs et un jardin, c'est une autre aide à la

[13] S ROAF, « Windcatchers », *in Windcatchers in Living with the Desert*, 1982, pp. 57‑70.
[14] BAHADORI, « Passive Cooling Systems in Iranian Architecture », *in* , 1978, p. 144.
[15] Hossein AHMADIKIA, Amir MORADI et Mohammad HOJJATI, « Performance Analysis of a Wind-Catcher With Water Spray », *International journal of green energy*, 1 février 2012, vol. 9.
[16] Gholamreza DEHGHAN KAMARAGI, *Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique*, *op. cit.*

ventilation. Encore une fois, comme pour le Badgir, l'effet cheminée fonctionne aussi pendant les nuits froides et les journées chaudes.

L'effet du soleil sur ce dôme est également utile. Pendant la journée, le soleil chauffe ce dôme. (Voir figure 8) Cette chaleur est ensuite transmise à l'air ambiant par convection et rayonnement, de sorte que cet air chaud et s'élève et aspire l'air frais du sous-sol. La dernière stratégie utilisée ici pour refroidir le système est la végétation autour du bâtiment. Elle refroidit et donne de l'oxygène à l'air.

Les éléments qui constituent la tour à vent sont les suivants : Chaque élément d'une tour à vent joue un rôle dans le fonctionnement global du dispositif. Une tour à vent dans l'ordre, de bas en haut, est formé des éléments suivants : 1) cheminée, 2) tige, 3) catgut et chaîne, 4) étagère.

1. Cheminée : La partie cheminée de la tour est généralement une forme pyramidale incomplète. Les différentes proportions de la partie supérieure du capteur de vent sont agencées avec cette partie. Dans certains cas, sa hauteur est aussi élevée que celle d'une personne et dans d'autres, elle fait quelques mètres de haut.
2. Tige : la partie de la tour à vent est située entre l'étagère et la pièce est appelée la "tige"; plus le vent est haut, plus la « tige » est haute aussi. En fonction des régions et des climats, la hauteur de la « tige » s'adapte et cherche à capter un vent continu qui souffle en hauteur ; la beauté de cette partie dépend principalement de la décoration en brique.
3. Catgut et chaîne : le catgut et la chaîne sont situés entre le « pédoncule » et le plateau.
4. Tablette : La tête de la tour à vent est la tablette, qui comprend les pales, la gaine de ventilation de l'air. Les types courants, de figures géométriques de la tablette, comprennent un rectangle allongé, vertical, horizontal et un carré. Les étagères sont généralement ouvertes à l'avant. De plus, cette caractéristique est modifiée en fonction du sens du vent, par contre deux tablettes seraient généralement prises en compte pour chaque type de gaine d'air vers la pièce (voir figure 5, schéma C ou D).[17]

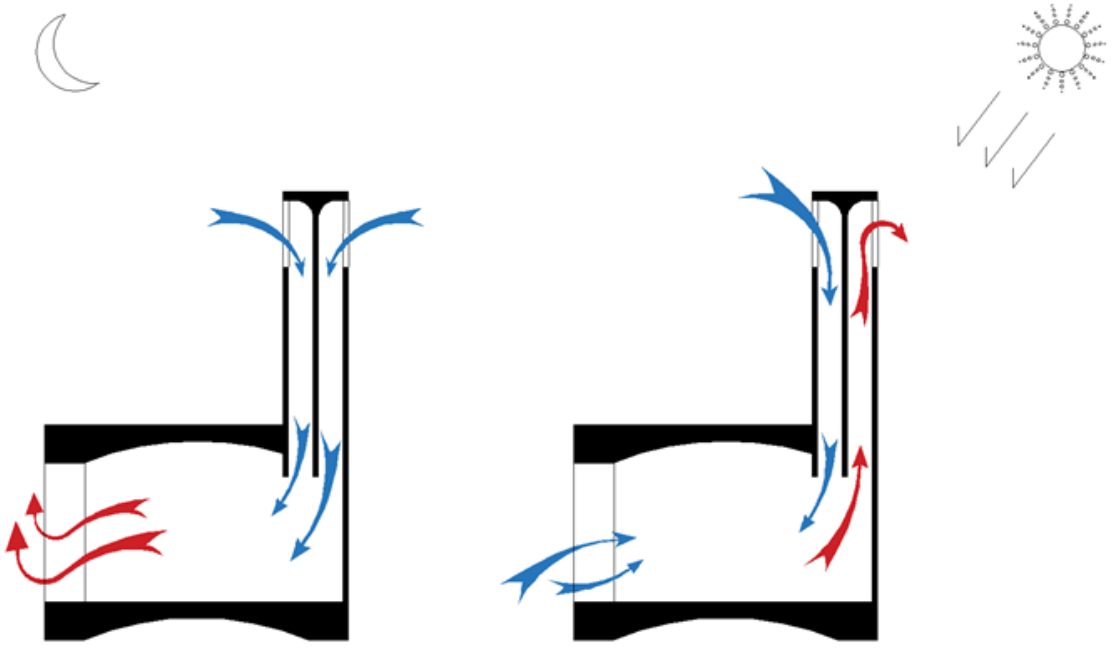


Figure 8. Schéma du fonctionnement de la tour à vent en fonction du jour et de la nuit.(dessiné par D. Serero)

[17] « BĀDGĪR – Encyclopaedia Iranica », *op. cit.*

1.1.5 L'émergence du moulin à vent

Venus des plateaux iraniens, les premiers **moulins à vent** arrivent en Europe à partir du IX siècle, et se banalisent petit à petit jusqu'au XII^{ème} siècle. Si en Orient, il servait uniquement à la **moudre des grains**, en Europe, il va progressivement assumer d'autres rôle, comme celui de **fabriquer de l'huile**, **brasser les draps, scier la pierre ou le bois, réaliser la pâte à papier ou broyer des céréales, …**

Figure 9. Moulin à vent de Schiedam, aux Pays-Bas (photo D. Serero)

Il existe 3 types de **moulins à vent qui constituent la très grande majorité des moulins utilisés**:

- Le moulin tour
- Le moulin pivot ou chandelier
- Le moulin Cavier

- *Les moulins tour*

Le **moulin tour** (Voir figure 9) est le type de moulin le plus répandu en France. Même si sa silhouette varie selon les régions, il a généralement un corps fixe en **pierre ou en briques**, parfois recouvert d'un ciment brut ou peint. Sa toiture, quant à elle, peut pivoter **sur 360°**, supporte les ailes et abrite le rouet et la lanterne.

Figure 10. Le moulin de Moidrey à Pontorson (Manche), Photographie D. Serero le 27 mai 2018, c'est un moulin de type « moulin tour »

Figure 11. Détail des pâles dont l'angle peut varier en fonction de la vitesse du vent. (D. Serero)

Situé à 5 km s du Mont Saint-Michel, le **moulin de Moidrey** (datant de 1806) fait partie des plus témoins intéressants de ces moulins de France (Voir figure 10). Suite à sa restauration en 2003, il a été classé par l'UNESCO au patrimoine mondial en 2007. En activité depuis sa restauration, il est devenu un lieu d'animation et de visites historiques sur le travail des meuniers qui y fabriquent des farines à partir du blé noir, blé et seigle**.**

Figure 12. Le moulin de Cassel (Nord) de type « pivot » (Photo par PAT 2013, www.moulins-a-vent.net)

Figure 13. Le moulin-cavier des Aigremonts à Bléré (Indre-et-Loire) de type « cavier » (Photo par PAT 2013, www.moulins-a-vent.net)

- *Les moulins pivot ou chandelier*

Le **moulin pivot ou chandelier** (Voir figure 12) est un type de moulin qui fait son apparition en France à partir du XIIe siècle, c'est le plus ancien recensé en France. Il se singularise par une **cage en bois** qui peut tourner sur un **pivot vertical** taillé dans un tronc de chêne. Ils sont particulièrement typiques du Nord, ainsi que de l'Est de la France.

Le **moulin de Cassel** (Voir figure 12) construit au XIIIVème siècle est perché au sommet du Mont Cassel, est un symbole de la ville. C'est le dernier représentant de son genre dans la région, où jadis s'élevait une vingtaine de **moulins en bois sur pivot**.

- *Les moulins cavier*

Le **moulin cavier**, à mi-chemin entre le moulin pivot et le moulin tour, (Voir figure 13) est un type de moulin typique de la **région d'Anjou**. Il comporte une cage de bois réduite appelée **hucherolle** supportant les **ailes**, pivotant sur 360°, au sommet d'une tour maçonnée conique.

Édifié en 1848, puis restauré entre 2004 et 2007 par la municipalité de Bléré, le **moulin à vent** d'Aigremonts, de près de 18 mètres de hauteur est de type **cavier**, il était donc construit, à l'origine, sur une structure de cave, adaptée à la double activité de son propriétaire vigneron et meunier. Une Association, « les Amis du moulin des Aigremonts », propose des visites et démonstrations pédagogiques de son fonctionnement.

- *Evaluer la puissance des moulins à vent*

Il n'est pas facile d'estimer la puissance de ces anciens moulins à vent. Cependant les relevés effectuées par l'ingénieur Charles-Augustin Coulomb en 1781 à Lille sur plusieurs moulins à vents de l'époque permet de les comparer et d'estimer leur puissance. Dans son étude l'ingénieur donne la vitesse du vent et la puissance de ces moulins pour différents modes de fonctionnement.

Une simulation informatique[18] d'un moulin à vent de 24,6 m de diamètre et 80 m² de surface de voiles a été réalisée en utilisant la théorie moderne dite de « l'élément de pale » telle que l'a explicitée Albert Betz[19] en 1926. Le calcul donne la puissance et le couple du moulin à vent en fonction du vent, ou, ce qui revient au même, en utilisant des expressions sans dimension, au coefficient de performance Cp (rapport entre la puissance fournie et la puissance théorique du vent) en fonction du rapport d'avance X (rapport entre la vitesse à l'extrémité de l'aile Rω et la vitesse du vent V) :

$$P = \frac{1}{2}\rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_\rho$$

avec ρ = masse volumique de l'air

A = surface balayée par le rotor

La précision du calcul est limitée par la connaissance approximative des données aérodynamiques d'une aile, ici l'aile flamande asymétrique avec planche à vent au bord d'attaque.

A partir de cette étude, il est possible de calculer la puissance de moulins à vent équipés d'ailes différentes : ailes planes à angle d'incidence constant, ailes planes à angle d'incidence variable avec la distance au centre, ailes flamandes.

[18] Philippe BRUYERRE, « Puissance des moulins à vent », *Le Monde des Moulins*, 08/07/2019

[19] Albert BETZ, *Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Göttingen, Vandenhoed & Ruprecht, 1926. Une présentation détaillée en français de la théorie de l'élément de pale est donnée dans : JOURIEH Munif, Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien, Thèse de Doctorat de Mécanique, Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2007, p. 51-57. https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00003390/*, 1926.

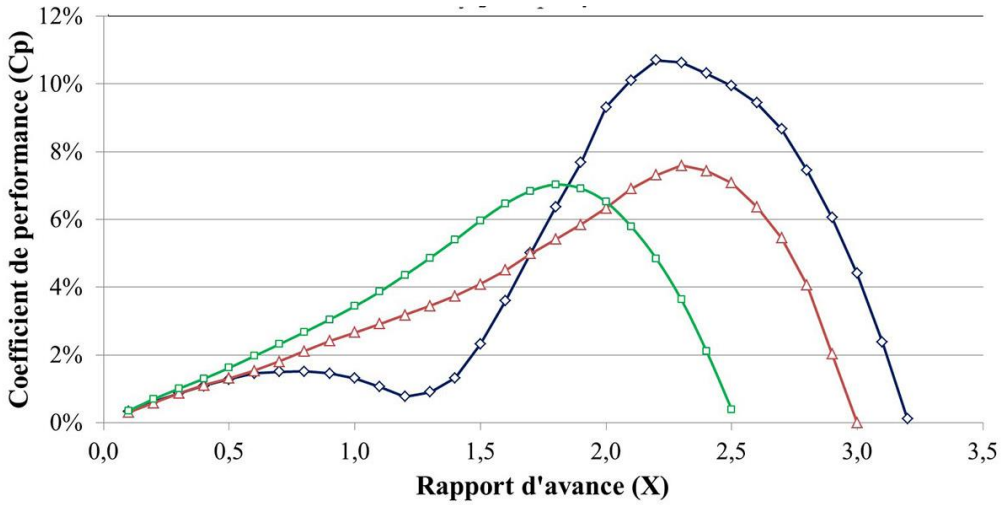


Figure 14 Courbes de puissance de trois grands types de moulins (en noir, moulin flamand ; en rouge, moulin à ailes symétriques et inclinaison variable ; en vert, moulin à ailes symétriques et inclinaison constante[20].

Il s'agit de la puissance disponible sur l'arbre du moulin, la puissance utile étant obtenue en évaluant les pertes de frottements sur les paliers, les pertes de transmission de puissance (pertes de plus de 40% pour des engrenages en bois) et les pertes de la machine entraînée (pertes hydrauliques dans le cas d'une pompe).

Le passage d'ailes symétriques à inclinaison constante à des ailes à inclinaison variable augmente légèrement le coefficient de performance qui est atteint pour un rapport d'avance supérieur. Ce dernier moulin tournera plus vite que le précédent pour une même vitesse de vent. Le passage des ailes à inclinaison variable à l'aile flamande augmente plus fortement le coefficient de performance, le rapport d'avance restant comparable.

Le perfectionnement des ailes de moulin permet d'augmenter leur vitesse spécifique (vitesse de rotation dans un vent donné), leur coefficient de performance ainsi que leur diamètre. L'impact combiné de ces différents facteurs sur la puissance d'un moulin à vent est très important comme le montre le tableau suivant (Voir figure 14).

Type de moulin	Diamètre	Puissance maximale dans un vent de 6,5 m/s
Moulin à ailes symétriques et inclinaison constante	10 m	900 W
Moulin à ailes symétriques et inclinaison variable	15 m	2 300 W
Moulin flamand (ailes asymétriques et planche à vent)	24,6 m	8 600 W

Figure 15 Puissance de différents types de moulins à vent dans un vent de 6,5 m/s[21]

Cette analyse montre que la puissance d'un moulin à vent varie fortement, d'un à dix, suivant le type d'ailes utilisées (vitesse de rotation et performance) et le diamètre du rotor qui dépend lui aussi du type d'ailes (stabilité de fonctionnement) (Voir figure 15).

[20] Philippe BRUYERRE, « Puissance des moulins à vent », *op. cit.*
[21] *Ibid.*

1.1.6 De l'éolienne de Cleveland aux éoliennes modernes

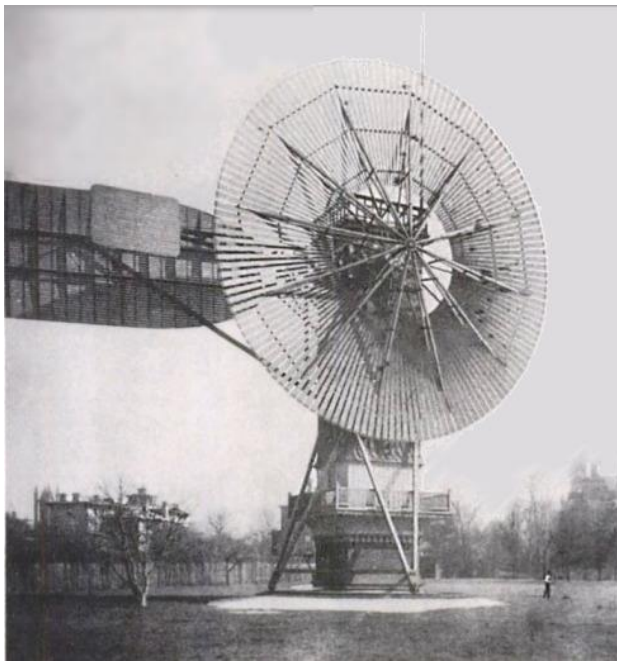


Figure 16. 1888 L'éolienne de Cleveland, une première électrique[22]

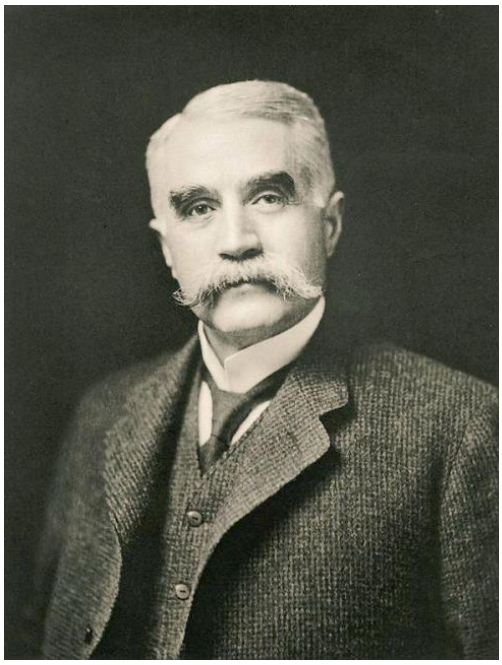


Figure 17. Portrait de Charles Brush, l'inventeur de la première éolienne génératrice d'électricité[23]

En 1888, à Cleveland (dans l'état du Midwest aux Etats-Unis) (Voir figure 16), l'ingénieur Charles Brush (Voir figure 17) parvient à alimenter en électricité sa résidence à partir d'un moulin en bois en utilisant une éolienne géante de 18 mètres de haut et de 17 mètres de diamètre. La première éolienne automatique destinée à la production d'électricité démarre à ce moment-là.

Une éolienne utilise l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut également la qualifier d'aérogénérateur.[24]

Il faut noter que le grand diamètre fait ralentir le mouvement et que le nombre de pâles équilibre les pressions entre le haut et le bas de l'éolienne. Un défaut important de l'innovation du pionnier de l'industrie électrique américaine : Les 144 pales ne produisaient que 12 kW. Ceci est en partie lié à un générateur peu performant et une rotation trop lente

Au Danemark, au même moment, **Poul La Cour**, un météorologue et pionnier de l'éolien danois, (1846-1908) tire rapidement les leçons de son homologue américain. En 1891, son prototype bâti sur le terrain de l'école d'Askov (à la frontière avec la Prusse) présente un nombre moindre de pales afin de tourner plus vite et de produire davantage d'électricité. Son éolienne à rotation rapide, la première dite « industrielle », est un succès. Les bases de l'aérodynamisme du rotor sont jetées. En 1918, dix ans après sa mort, 3 % de l'énergie produite au Danemark provient déjà de l'éolien. « L'Edison danois » a aussi consacré une partie de ses recherches au stockage de

[22] Robert W. Righter (1996) *Wind Energy in America: A History*, University of Oklahoma Press, p. page 44 Accès 27 décembre 2008. ISBN : 0806128127.
[23] Ibid.
[24] *Éoliennes terrestres : fonctionnement, enjeux et acteurs majeurs*, https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eoliennes-terrestres, consulté le 15 juillet 2020.

l'énergie, le grand enjeu naissant, en convertissant la force du vent en hydrogène via un processus d'électrolyse.

Au fil des progrès de la mécanique et de l'aérodynamique, la productivité des éoliennes ne cesse de s'améliorer. Pourtant, des vents contraires soufflent sur son développement, la faute au charbon puis au pétrole bon marché, et enfin à la fission de l'uranium. A partir de 1958, le déploiement du programme nucléaire civil génère un véritable coup d'arrêt des développements de l'éolien qui ne redémarrerons qu'au début des années 2000 lors de la prise de **conscience d'écologique liée au réchauffement climatique**. Le prototype de Lucien Romani et d'EDF d'éolienne à double pales installé à Nogent-le-Roi (Eure-et-Loir) en 1958 est très vite oublié. En 1963, Lucien Romani et le BEST (Voir figures 18 et 19) présentèrent à la Direction des Etudes et Recherches d'EDF un projet d'aérogénérateur susceptible d'être érigé sans intervention d'une grue monumentale et de fonctionner ensuite sans personnel à demeure.

Figure 18. Machine de 35 m, 1 000 kW, Aérogénérateurs Neyrpic de Saint-Rémy-des-Landes. (Source : http://eolienne.cavey.org/communs)

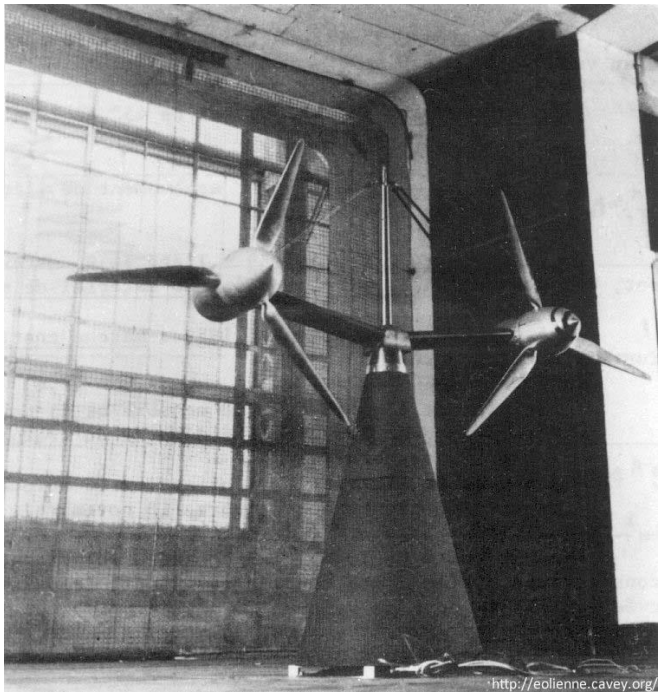


Figure 19. Maquette de l'éolienne BEST double hélice, par l'ingénieur Lucien Romani en 1963, Direction des Etudes et Recherches d'EDF un projet d'aérogénérateur (Source : http://eolienne.cavey.org/communs)

Il résultait de longues études préalables, menées avec les concours du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, du LBTP, de l'O.N.E.R.A., de Breguet, de la CIMT, de Sud-Aviation, de l'Entreprise Générale Industrielle, de Neyrplast, d'Alsthom, de la Société des Monteurs-Levageurs, etc...

Il était prévu deux hélices éoliennes contrarotatives de 32 mètres de diamètre, proches l'une de l'autre et situées dans un même plan sur une tour tronconique en voile mince de béton armé. Chaque hélice aurait entrainé, via un multiplicateur, une génératrice synchrone de 1 000 kW.

Les essais menés à la soufflerie Breguet de Vélizy avaient prouvé que cette disposition procurait un gain de 10 % par rapport à deux hélices analogues éloignées l'une de l'autre.

Les études économiques menées par la Direction de l'Equipement d'EDF montrèrent que, sur la base d'une utilisation moyenne de 2 150 heures / an, le coût de l'énergie produite aurait été de 30 à 50 % supérieur à celui de l'énergie produite à partir du pétrole.

Le projet et avorté malgré le budget important dépensé pour son développement.

Figure 20. Turbine de Gedser au Danemark, sur un mat en béton armé l'origine des éoliennes actuelles (source : https://fr.wind-turbine-models.com/)

Figure 21. L'ingénieur danois Johannes Juul (1887 – 1969) (source : http://www.windsofchange.dk/JohannesJuul.png)

En 1957, le danois Johannes Juul (Voir figure 21) met au point sa turbine de Gedser (Voir figure 20) d'une puissance de 200 kW. Tripale, dotée d'un système d'orientation électromagnétique et d'une génératrice asynchrone, équipée de freins aérodynamiques d'urgence actionnés par la force centrifuge en cas de survitesse, elle est la première à produire du courant alternatif. Ce modèle a largement inspiré la conception des éoliennes actuelles. Après deux chocs pétroliers, les énergies renouvelables ont de nouveau le vent en poupe et les parcs éoliens ne cessent de s'étendre, à partir des années 70 au Danemark et aux Etats-Unis, sur terre comme sur mer. Entre 2000 et 2012, la production mondiale d'électricité d'origine éolienne est multipliée par 28 (la production mondiale d'éolien est alors de 1 039 Twh).

A partir de 2016, de nouveaux appels d'offres sont lancés par l'état français pour la création de parcs éoliens géants en mer, parcs dit *« offshore »*[25] (notamment mer du Nord).

[25] Le terme anglais « *offshore* » signifie littéralement « hors côtes », par opposition aux éoliennes terrestres ou « *onshore* ».

Figure 22. Ferme éolienne offshore de Kentish Flats, au large des côtes britanniques du Kent (©Vattenfall-Robin Dawe)

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. Les éoliennes offshores fonctionnent selon le même principe que les modèles terrestres traditionnels.

Le vent fait tourner des pales, généralement trois. Celles-ci entraînent un générateur qui transforme l'énergie mécanique créée en énergie électrique, suivant le principe d'une dynamo. La différence principale entre un modèle marin et un modèle terrestre d'éolienne tient à la nature des fondations, qui lui permettent d'être fixée dans le sol ou ancrée au fond de la mer (sauf dans le cas des éoliennes « flottantes »). Les éoliennes offshores doivent également être très robustes afin de résister aux conditions marines difficiles.

Les éoliennes offshores (Voir figure 22) sont le plus souvent rassemblées dans un « parc éolien » ou « ferme éolienne » comportant entre 20 et 50 éoliennes de plusieurs mégawatts (MW) de puissance unitaire. Les parcs offshores traditionnels ne sont généralement pas installés dans des zones où la profondeur dépasse 40 mètres.

Certaines installations « *farshore* » c'est-à-dire au large (plus de 30 kilomètres des côtes), dotées de bases flottantes, sont aujourd'hui en phase de conception.

1.1.7 L'évolution des installations éoliennes offshore

Si les premiers prototypes d'éoliennes offshore étaient de simples copies des éoliennes terrestres, les machines se sont peu à peu adaptées à la mer. Les développements technologiques actuels, et en particulier l'évolution attendue des machines en taille et en puissance, sont d'ailleurs caractéristiques des éoliennes offshores.

Il y a eu en quelques années une forte augmentation de la performance de ces dispositifs. Par exemple le parc de Thorntonbank, installé en 2008 au large d'Ostende (Belgique) , utilise des turbines de 5 MW, **des éoliennes de 8 MW de puissance unitaire sont aujourd'hui développées et des modèles de 10 MW à l'étude.**

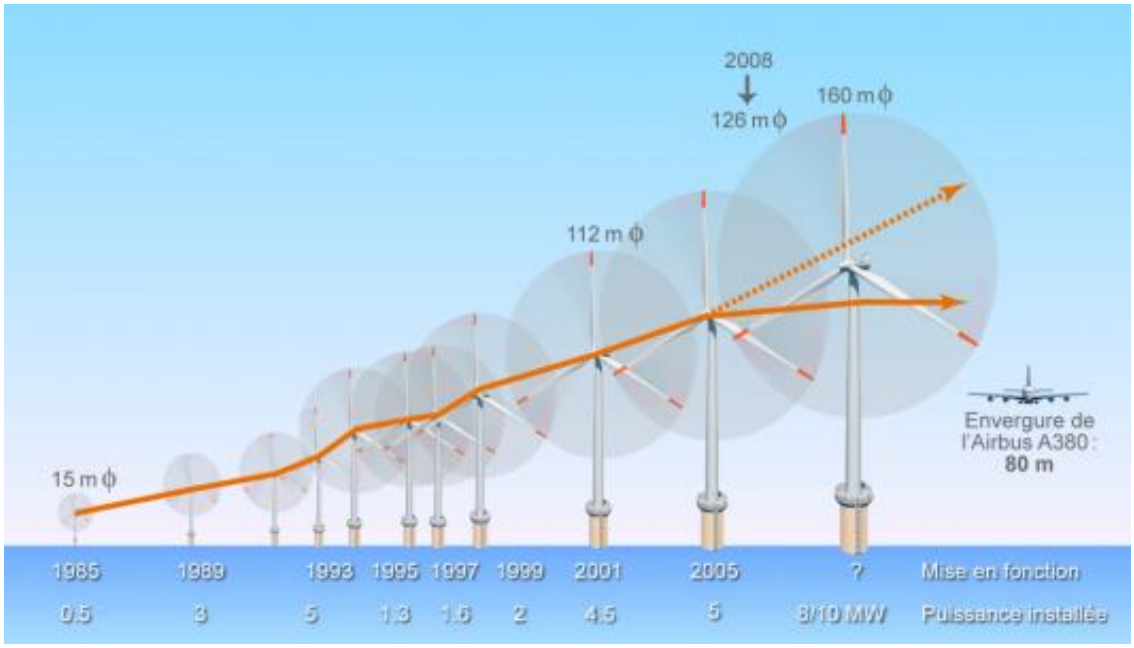


Figure 23. Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore (©Connaissance des Énergies / https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/eolien_offshore.infographie_zoom.png)

Les éoliennes offshores se différencient également de plus en plus des éoliennes terrestres par leur conception technique adaptée au milieu marin. Si elles ont le même aspect, leurs conditions de fonctionnement sont différentes (voir figure 23). Les fondations marines sont l'aspect le plus notable de leurs particularités puisqu'elles doivent être ancrées ou enfoncées dans le fond marin. Elles doivent également résister à la corrosion, aux tempêtes et aux efforts créés par les masses d'eau alentour.

1.1.8 La rupture technologique attendue de l'éolien flottant *farshore*

Les premiers projets éoliens offshore ont consisté à installer des éoliennes en eaux peu ou moyennement profondes, de 5 à 40 mètres de profondeur. Au-delà il est difficile et très coûteux de planter l'éolienne dans le fond marin ou de déposer sa base. S'affranchir de la contrainte de la profondeur d'eau est une piste intéressante, surtout dans les pays comme la France où les profondeurs dépassent rapidement les 40 mètres lorsque l'on s'éloigne de la côte.

A fin 2017, la profondeur moyenne des parcs éoliens en mer dans les eaux européennes était de 27,5 m, ceux-ci étant en moyenne situés à 41 km des côtes.

Des projets d'éoliennes flottantes, situées à plusieurs dizaines de kilomètres des côtes et à plus de 50 mètres de profondeur, offrent des perspectives intéressantes, notamment en France (prototype Floatgen d'Ideol, au large du Croisic, projets en Bretagne et en Méditerranée)[26]. Contrairement aux éoliennes offshores traditionnelles, leurs fondations ne sont pas enfoncées dans le fond marin mais ancrées au moyen de câbles. C'est pourquoi leur installation est simplifiée et les besoins en matériaux grandement diminués.

[26] *Éoliennes terrestres : fonctionnement, enjeux et acteurs majeurs*, https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eoliennes-terrestres, consulté le 15 juillet 2020.

1.1.9 Avantages et inconvénients de la technologie éolienne offshore

- La technologie de l'éolien offshore a bénéficié d'une grande partie des avancées technologiques récentes de l'éolien terrestre, une des énergies renouvelables les plus matures.
- La mer étant plane, les vents rencontrent moins d'obstacles et sont par conséquent plus soutenus, plus réguliers et moins turbulents que sur terre. A puissance égale, une éolienne offshore peut produire jusqu'à 2 fois plus d'électricité qu'une éolienne terrestre.
- La mer offre de grands espaces libres d'obstacles, où l'implantation des machines est possible, sous réserve de concertation avec les autres usagers de la mer.

1.1.10 Limites rencontrées pour leur exploitation

- Les investissements initiaux dans des projets éoliens offshore sont très sensiblement plus élevés que ceux dans des projets à terre, notamment en raison des coûts additionnels liés aux fondations et au raccordement.
- Bien que les vents soient plus constants en mer que sur terre, l'énergie éolienne offshore est également intermittente[27].
- L'éolienne est soumise mécaniquement non seulement aux efforts du vent sur les pales et la structure, mais aussi aux efforts créés par les courants.
- L'installation des éoliennes en mer est plus compliquée que sur terre. Des bateaux adaptés doivent être employés. La maintenance des éoliennes est également plus compliquée et plus coûteuse qu'à terre. Si une panne survient, il peut se passer plusieurs jours avant la réparation, ce qui entraîne une perte de production.
- Le raccordement électrique nécessite l'installation de câbles sous-marins jusqu'à la côte qui peut être distante de plusieurs kilomètres. Pour les grandes distances, il faut recourir à un acheminement en courant continu[28] et associer des convertisseurs électroniques de puissance afin d'atténuer les pertes d'électricité.

1.1.11 Les constructeurs et les opérateurs à l'échelle mondiale

Au vu des investissements colossaux dont cette filière a besoin, les constructeurs et opérateurs se sont très vites agrégés pour faire face à l'échelle des projets. En 2016, le chinois **Sewind** (qui construit en partie des éoliennes Siemens sous licence) et l'allemand **Siemens** étaient les deux principaux constructeurs d'éoliennes offshore selon *Bloomberg New Energy Finance*[29] (Siemens Wind Power a depuis fusionné avec le groupe espagnol Gamesa en avril 2017). MHI Vestas est également un constructeur majeur d'éoliennes offshore.

Le danois Ørsted (ex-Dong Energy), l'allemand EON Climate and Renewables et le suédois Vattenfall et le danois DONG sont les principaux opérateurs de parcs éoliens offshore dans le monde.

---

[27] *Idée reçue : Toutes les énergies renouvelables productrices d'électricité sont intermittentes*, https://www.connaissancedesenergies.org/toutes-les-energies-renouvelables-productrices-delectricite-sont-intermittentes-141105, consulté le 15 juillet 2020.

[28] *Transport de l'électricité courant alternatif ou continu ? Explication*, https://www.connaissancedesenergies.org/est-il-preferable-de-transporter-l-electricite-en-courant-alternatif-ou-continu-130830, consulté le 15 juillet 2020.

[29] *BNEF 2016 wind turbine manufacturers ranking*, https://about.bnef.com/blog/vestas-reclaims-top-spot-annual-ranking-wind-turbine-makers/, consulté le 17 juillet 2020.

1.1.12 Production d'énergie des parcs éoliens offshore

La **densité énergétique** d'un parc éolien offshore, c'est-à-dire la puissance installée sur 1 km² de surface de mer, permet d'appréhender la productivité potentielle d'un site. Elle est de l'ordre de 8 MW/km² en moyenne pour 2 à 3 éoliennes installées par kilomètre carré, et atteint 15 à 20 MW/km² dans des sites très ventés.

L'**échelle de Beaufort** est une échelle cotée de 0 à 12 degrés, proposée par l'amiral Beaufort en 1806 (modifiée en 1946), et utilisée pour mesurer la force du vent (échelle de Douglas).

Une éolienne offshore commence à fonctionner par un vent de 2 Beaufort (environ 10 km/h ou 3 m/s), atteint sa vitesse de croisière à 6 Beaufort (45 km/h ou 12 m/s), et doit être arrêtée à 11 Beaufort (110 km/h, 30 m/s). Le rapport entre le nombre d'heures de fonctionnement en équivalent pleine puissance et le nombre d'heures de fonctionnement théorique dans l'année (8 760 h) est appelé **facteur de charge.** Selon WindEurope, les facteurs de charge des parcs éoliens offshore en Europe sont compris entre **29% et 48%**[30]**.**

L'éolien offshore a connu de fortes réductions **de coûts au cours des dernières années**, comme en témoigne l'attribution en novembre 2016 du projet danois de Kriegers Flak à Vattenfall à un prix de 49,9 €/MWh[31].

1.1.13 Zone de développement et paysage marin

L'exploitation de la ressource éolienne en mer convient particulièrement aux pays à forte densité de population ayant des difficultés à trouver des sites appropriés sur terre et disposant d'un espace maritime côtier conséquent et venté.

L'Europe du Nord est particulièrement bien dotée pour l'exploitation de l'énergie éolienne offshore, avec des vitesses de vent supérieures à 8 m/s à 50 m de hauteur, soit une densité de puissance supérieure à 600 W/m^{2}. Afin d'empêcher les collisions, ces parcs sont signalés sur les cartes maritimes et visuellement, par l'emploi de lumières de positionnement.

Le Royaume-Uni dispose du premier parc éolien offshore au monde, devant l'Allemagne et la Chine. A fin 2016, près de 88% des installations éoliennes offshore dans le monde étaient situées dans les eaux de 10 pays européens[32].

1.1.14 Les dates clés du développement des parcs offshores[33]

1991 : le premier parc éolien offshore au Danemark est installé sur le site de Vindeby à 2,5 km de la côte en eaux très peu profondes (moins de 5 mètres). Les 11 éoliennes installées d'une puissance unitaire de 450 kW ne sont alors que des éoliennes terrestres légèrement modifiées.

Années 1990 : le Danemark et deux autres pays pionniers du secteur éolien offshore (les Pays-Bas et la Suède) lancent des programmes de valorisation du vent maritime. Ces pays disposent de plateaux continentaux étendus et peu profonds propices à l'installation d'éoliennes offshore.

Milieu des années 2000 : le Royaume-Uni et l'Allemagne se lancent à leur tour dans l'éolien offshore à grande échelle. Avec le parc de Middelgrunden, le Danemark inaugure en 2001 le plus

[30] *Eolien en mer*, https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/eolien-en-mer-0, consulté le 15 juillet 2020.
[31] *Ibid.*
[32] « OFFSHORE WIND ».
[33] « Eolien en mer », *op. cit.*

grand parc éolien offshore de l'époque et une nouvelle génération d'éoliennes : 20 éoliennes de 2 MW, distantes de 180 m et disposées sur un arc de cercle de 3,4 km de rayon. Si nous considérons la consommation moyenne d'un foyer annuelle de l'ordre de 100kW, la production énergétique de ce parc permettrait d'alimenter une ville de 20 000 habitants.

2011 : la France lance un premier appel d'offres sur l'éolien offshore dont les résultats sont annoncés en avril 2012 : 4 sites sont attribués pour une capacité installée prévue de près de 1 930 MW.

2017 : plus de 3,1 GW de nouvelles capacités éoliennes offshore sont installées (et raccordées au réseau) cette année-là selon WindEurope[34], un record (560 nouvelles éoliennes réparties entre 17 parcs). Cela porte à 15 780 MW la puissance éolienne offshore installée en Europe à fin 2017. WindEurope n'a en revanche pas communiqué la production électrique associée cette année-là.

1.1.15 Le futur de cette technologie

Les technologies d'éolien **farshore**, c'est-à-dire en haute-mer à plus de 30 kilomètres des côtes, ouvrent des perspectives encore plus intéressantes que l'éolien offshore classique. En effet, le vent du large est plus régulier et plus soutenu, sans compter que le partage de l'espace maritime y est moins problématique que près des côtes. Du fait de la complexité de la fabrication et de l'installation d'éoliennes à base flottante, ces technologies en sont encore à la phase de recherche préindustrielle.

Selon Wind Europe, le parc éolien offshore en Europe pourrait disposer d'une puissance totale installée de 25 GW en 2020 (contre 15,8 GW à fin 2017). En France, 6 000 MW d'éoliennes offshore devaient être installés à cet horizon selon les objectifs du Grenelle Environnement[35] mais cette cible est désormais hors de portée en raison de différents retards. La programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)[36] fixe ainsi un objectif de 3 GW offshore installés d'ici à fin 2023[37].

Différents appels d'offres sur l'éolien offshore ont eu lieu en France et les premières mises en service sont désormais attendues après 2020. Selon les acteurs de la filière, la France disposerait du 2e gisement pour le développement de l'éolien en mer en Europe après le Royaume-Uni.

[34] Tom REMY et MBISTROVA, « Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2017 », *windeurope*.
[35] *Grenelle de l'Environnement : enjeux, acteurs, lois de 2009 et 2010*, https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/grenelle-environnement, consulté le 15 juillet 2020.
[36] Mael DANCETTE, *À quoi sert la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) ? PPE (programmation pluriannuelle de l'énergie) : définition et objectifs*, https://www.connaissancedesenergies.org/quoi-sert-la-programmation-pluriannuelle-de-lenergie-ppe-170324, consulté le 15 juillet 2020.
[37] « Eolien en mer », *op. cit.*

1.1.16 Evolution des dispositifs d'analyse du comportement du vent

Dès premières soufflerie à la simulation CFD

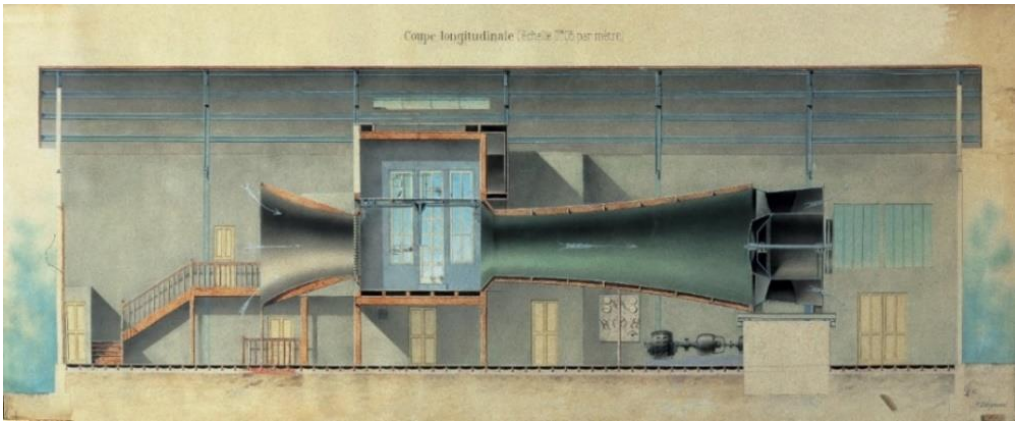
- *TYPOLOGIES DES TUNNELS A VENT*

Comme évoqué dans l'introduction de la thèse, l'ingénieur Gustave Eiffel, fait figure au même titre que les frères Voisins ou que Léonard de Vinci de précurseur sur l'étude du vent et notamment grâce à sa capacité à appréhender et à mesurer la pression du vent sur des structures. Dès les années 1890, Eiffel fort de son expérience sur des structures porteuses, crée une soufflerie d'expérimentation, où il peut tester des maquettes et prototypes de structure afin d'améliorer leur dimensionnement et leur conception. Cette soufflerie (Voir figure 25, 26 et 27) , toujours en activité à ce jour, participera au développement de nombreuses techniques expérimentales d'analyse de flux d'air. Nous allons présenter ici sommairement quelques-unes des souffleries importantes pour l'étude du vent sur les bâtiments ainsi que leurs caractéristiques.

- Soufflerie Eiffel

Elle est construite en bois et entoilée. La soufflerie comprend d'amont en aval :

- Un collecteur de 4 m de diamètre à l'entrée et 2 m de diamètre dans la chambre d'expérience
- Une veine non guidée de 2 m de diamètre et 2,37 m de long
- Un diffuseur de 2 m de diamètre à la sortie de la chambre d'expérience et 4 m de diamètre au ventilateur
- Un ventilateur 23 pales de diamètre 4 m (7 tonnes).



Caractéristiques :

Vitesse de 0,5 m/s à 30 m/s

Taux de turbulence entre 1 et 2%.

Possibilité de modéliser la couche limite atmosphérique turbulente

Niveaux de pressions acoustiques globaux de 43 à 82 dB(A) [38]

[38] *Laboratoire Aérodynamique Eiffel*, http://www.aerodynamiqueeiffel.fr/detail.php?id=45, consulté le 15 juillet 2020.

Figure 24. Soufflerie Eiffel, Coupe longitudinale de la configuration initiale de la soufflerie. Source : © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter

Figure 25. Motorisation de la soufflerie Eiffel, Photo D. Serero du 18/09/2016. Source © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter

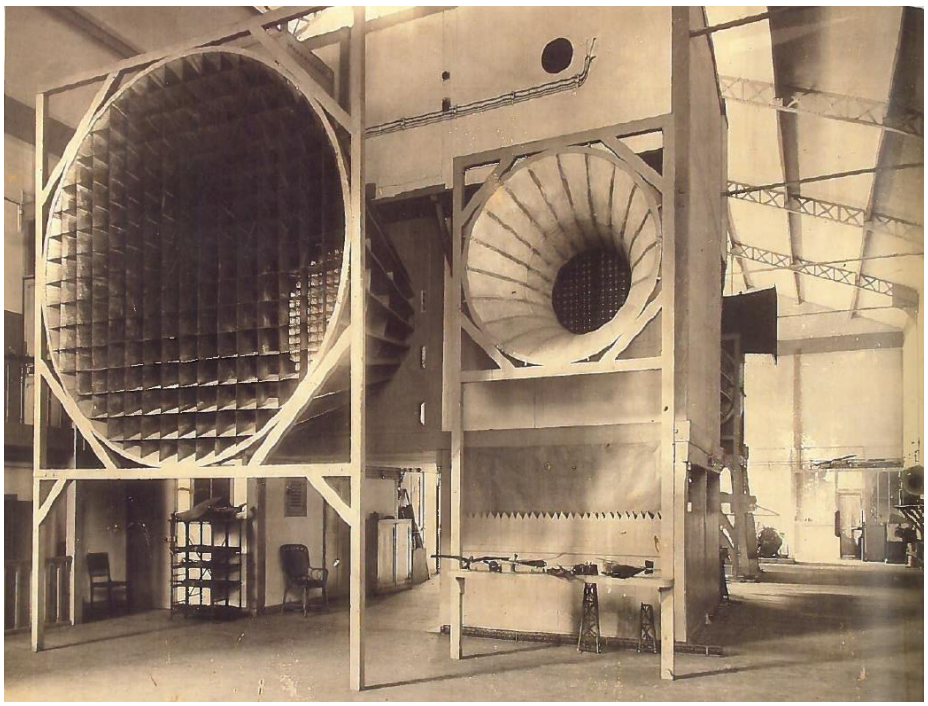


Figure 26. Soufflerie Eiffel par Gustave Eiffel. La chambre de soufflerie du laboratoire aérodynamique créé par Gustave Eiffel en 1911. Paris XVIème arr., 67, rue Boileau. Source © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter

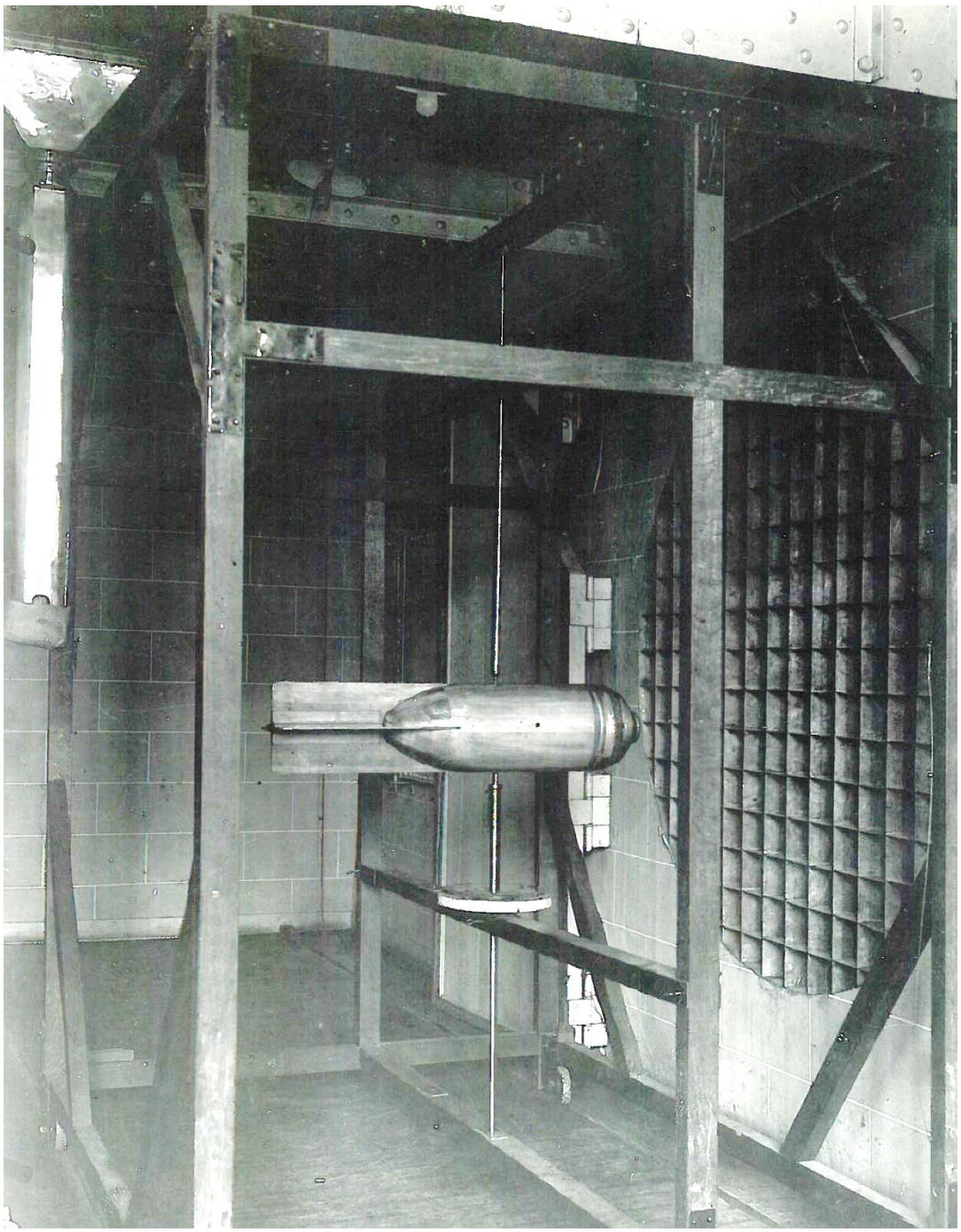


Figure 27. Soufflerie Eiffel par Gustave Eiffel, étude d'un aéronef, Source © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter

- Soufflerie Aérodyne[39]

C'est la soufflerie de l'IUT de Cachan, utilisable par les étudiants et les membres de l'association qui la gère (Voir Figures 28 et 29).

- Etude de prototype à l'échelle 1, fonctionnement en circuit fermé murs éclairants pour visualiser le flux d'air, Système de sol coulissant très innovant
  - Volume de la coupe d'étude : 17.2 m^2
  - Vitesse de test: Up to 58 m/s
  - Surface de support : 2.65m – 3.12m
  - Track : 1.40m – 1.65m
  - Poids: 1800 kg Front Axle, 900 kg Rear Axle
  -

Figure 28. Soufflerie aérodyne, Association d'études réalisations en optimisation Dynamique& Energétique ; Source : https://aerodyne-cachan.blogspot.com/, avec l'aimable autorisation de l'association

Figure 29. Soufflerie aérodyne. Source : https://aerodyne-cachan.blogspot.com/, avec l'aimable autorisation de l'association

[39] « Tunnel Info – Aerodyn Wind Tunnel ».

- Soufflerie de Saint Cyr[40]

Située en région parisienne, la soufflerie S2A est la seule soufflerie à pouvoir fournir des prestations aérodynamiques et acoustiques aussi complètes. La soufflerie S2A, GIE formé par PSA, Renault et le CNAM (Voir figure 30) permet de faire des essais en aérodynamique ou acoustique sur tous types de véhicules ou d'objets.

PLENUM	
Vein (vein predisposed Semi Guided)	3/4 open
the nozzle section	24 m2 (6.5 x 3.7)
Length of the plenum (between sails)	22,70 m
Width of the plenum (between sails)	16,20 m
test section length	14 m
Height of the plenum	10.40 m
Maximum wind speed	240 km / h
Coefficient of contraction	6
acoustic treatment	semi-anechoic (F. cutoff = 125 Hz)
background noise level, shutdown	<44 dB (A) (noise equivalent to a library)
Maximum noise at 160 km / h	69 dB (A) (Equivalent noise in a busy street)
Volume control (ref center tray)	-3 M <X <3 m;
	-1.5 M <Y <1.5 m
CHARACTERISTICS OF THE FLOW[41] **to control volume**	
Uniformity of flow 160 km / h	<0.4%
angular deviation	<0.6 ° planes XY and XZ
turbulence ratio	<0.4%
Longitudinal static pressure gradient along the X axis (Y = 0, Z = 0.25 m)	<0.001 / m -3m to + 3m <0.004 / m + 3m to 5m +
boundary layer displacement thickness	15 mm without aspiration 7 mm with aspiration

Figure 30. Souffleries de Saint Cyr. Source : Souffleries S2A ; www.soufflerie2A.com

[40] « Soufflerie S2A- Échelle 1/1 ».

1.2 IMPACT DES EOLIENNES SUR LES TERRITOIRES

Les développements récents d'un grand nombre de champs d'éoliennes font l'objet de critiques plus ou moins fondées. Des associations locales et des journalistes soulèvent des critiques importantes de ces systèmes (Voir figure 31) alors que la bibliographie scientifique est plus mesurée sur leur impact. Nous faisons ici un premier bilan de ces grandes éoliennes dans notre paysage.

Bilan environnemental global

Une étude multicritère publiée en 2008 dans la revue Energy & Environmental Science considère l'éolien comme la filière ayant le meilleur bilan environnemental global[42]. Une éolienne ne consomme pas d'eau douce (l'accès à l'eau douce est un problème de premier plan à l'échelle mondiale), ne nécessite pas de pesticides, n'induit pas de pollution thermique. Elle a une empreinte surfacique très faible (la présence d'une éolienne est compatible avec les activités agricoles) et un impact sur la biodiversité réduit. Elle est, de plus, disponible presque partout, de manière décentralisée. C'est une énergie propre qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni fines particules, ni déchets radioactifs à vie longue, ou n'importe quel autre type de pollution de l'air ou de l'eau sur son site de fonctionnement.

Cette étude n'a qu'une vision réduite de l'impact de l'énergie éolienne sur un territoire, et une analyse plus globale et systémique permet de mieux identifier et peser le poids de chacun de ces arguements. En voici ici une synthèse des principaux.

Impact visuel

Dans beaucoup d'installation, des éoliennes ont été considérées comme trop nombreuses avec une rotation trop rapide de leur pales. C'est le cas du parc éolien de Tehachapi Pass en Californie, ou celui de San Gorgonio (voir Figure 34). Comparativement aux premiers parcs éoliens, très denses, les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées, celles-ci étant de plus grandes taille et puissance. Ils ont donc perdu leur aspect sur-concentré.

L'énergie éolienne fait débat en France, entre partisans, qui militent pour le développement de structures éoliennes, et opposants, qui militent pour un moratoire sur ces dispositifs, qu'ils accusent de défigurer le paysage et dont ils mettent en doute l'utilité écologique.

[42] *Energy & Environmental Science*, https://www.rsc.org/journals-books-databases/about-journals/energy-environmental-science/, consulté le 23 juillet 2020.

Figure 31. L'impact visuel sur le paysage d(une ferme à vent à San Gorgonio Pass, Etats-Unis, source : Photos Stock & Des Images (662)

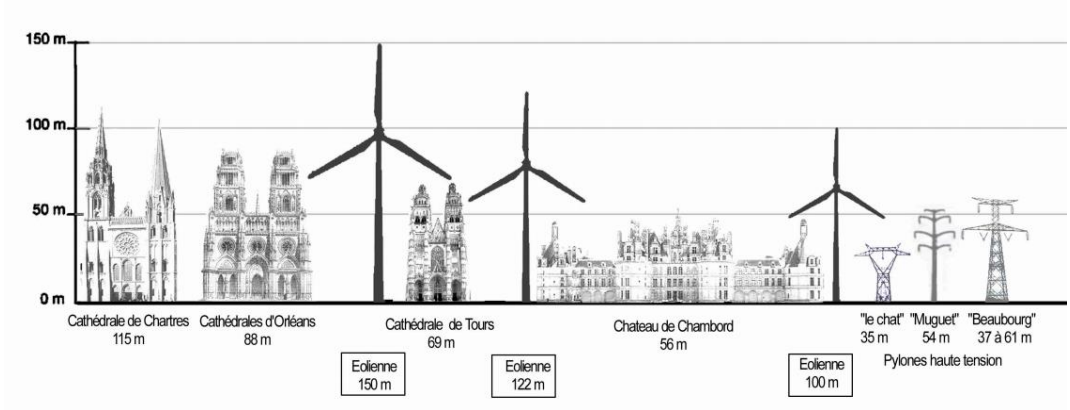


Figure 32. Hauteur comparée des éoliennes aux bâtiments patrimoniaux des villes d'échelle intermédiaire.[43]

Figure 33. A Coutances en Normandie, une éolienne est située dans l'axe de la cathédrale de la ville et dénature le panorama urbain de la ville[44]

[43] https://www.irca.fr/ils-vendent-leur-chateau-pour-echapper-aux-eoliennes-geantes/

[44] *https://www.lamanchelibre.fr/actualite-52657-eolienne-et-cathedrale-la-ville-de-coutances-demande-un-droit-de-reponse-a-tf1*

Intermittence et rendement de l'énergie éolienne

- Selon le think tank britannique Civitas , en raison de l'intermittence de sa production, l'éolien entraînerait davantage de rejets de gaz à effet de serre que le nucléaire et le gaz. Sa production d'énergie non régulière impose de faire appel à d'autres sources d'énergie ponctuelles comme le charbon et le gaz quand le vent est trop faible ou trop violent[45] pour compenser la baisse de production. Cette alternance de production génère une baisse de la performance des centrales de compensation d'énergie.

Impact sonore

En 2006 puis 2017, un groupe de travail de l'Académie nationale de médecine sur les éoliennes concluait que[46]:

> *« La production d'infrasons par les éoliennes est, à leur voisinage immédiat, sans danger pour l'Homme ; il n'y a pas de risques avérés de stimulation visuelle stroboscopique par la rotation des pales des éoliennes. »*

La réglementation relative à l'impact sur la santé du bruit induit était, à cette date, insuffisante, ce qui a été corrigé depuis, l'étude d'impact prévoyant maintenant une cartographie des nuisances sonores et des mesures individuelles chez les habitants les plus proches (Voir figure 33), la distance minimale des habitations étant maintenant de 500 m.

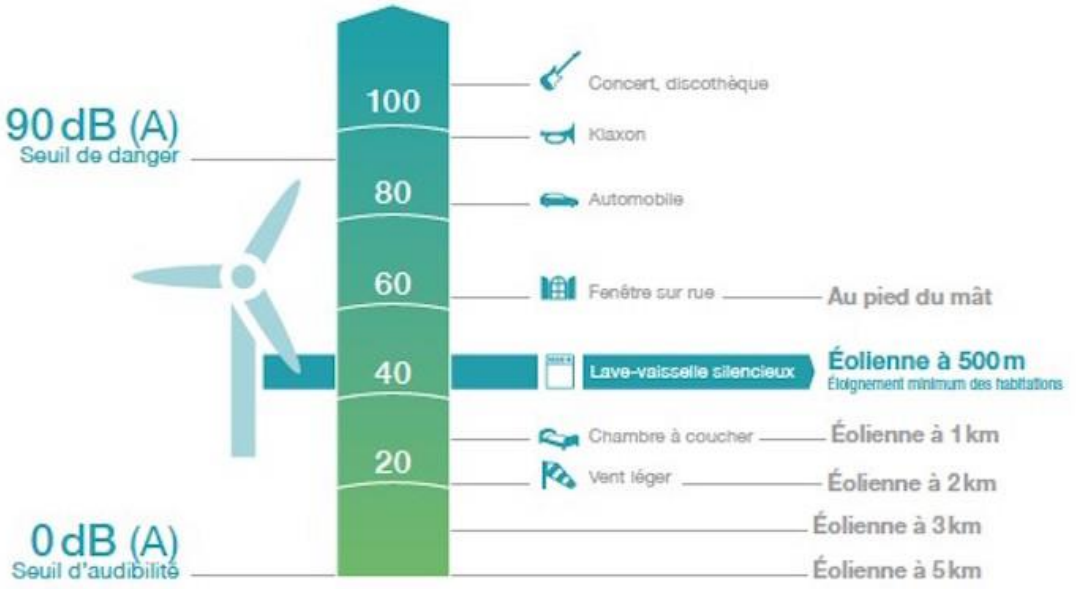


Figure 34. Comparaison de l'impact sonore (source : https://reporterre.net/Quel-est-l-impact-des-eoliennes-sur-l-environnement-Le-vrai-le-faux)

Concernant la distance de 500 m, le groupe de travail demandait, à titre conservatoire et en attendant la conclusion des études demandées, que soit suspendue la construction des éoliennes d'une puissance supérieure à 2,5 MW alors qu'il n'existait, à cette date, aucune éolienne terrestre d'une telle puissance en France. Ce rapport applique d'avantage, un principe de précaution, sans fondements scientifiques, car le bruit d'une éolienne n'est pas lié à sa

[45] « Les éoliennes accroissent-elles les émissions de CO2 ? », *Le Monde.fr*, 10/01/2012 p.
[46] « Rapport 17-03. Nuisances sanitaires des éoliennes terrestres – Académie nationale de médecine | Une institution dans son temps ».

puissance nominale. C'est pourquoi des expertises acoustiques sont systématiquement réalisées dans le cadre d'une étude d'impact environnemental.

Les machines de dernière génération ont fait des progrès importants sur le plan des nuisances sonores et elles peuvent être programmées, dans des circonstances particulières de force et orientation du vent, pour réduire l'impact sur une zone d'habitation proche.

En Australie, en mars 2005, le pédiatre David Iser a relevé trois cas de « problèmes significatifs » sur une étude concernant 25 personnes habitant dans un rayon de 2 km d'une ferme éolienne[47].

Une éolienne produit un bruit de 55 dBA au pied de sa tour, ce qui correspond à l'ambiance sonore d'un bureau. Ce niveau sonore est en général considéré comme acceptable. La réglementation française ne se base pas sur le bruit intrinsèque mais sur la notion d'émergence sonore, c'est-à-dire la différence entre le niveau sonore ambiant et celui-ci plus celui des éoliennes. Il s'agit de rester en deçà de 5 dBA le jour et 3 dBA la nuit, ce quelle que soit la vitesse du vent. Une nouvelle réglementation vient renforcer ce critère, en introduisant la notion d'émergence spectrale, avec des niveaux d'émergence à respecter par fréquence (7 dB entre 125 et 250 Hz, 5 dB entre 500 et 4 000 Hz). Cela en fait une des réglementations les plus strictes en Europe.

Le 28 novembre 2009, Le Monde consacre un dossier de huit pages aux « maudits du vent », qui vivent à proximité des éoliennes et « souffrent de stress, nausées, insomnies, vertiges, irascibilité, dépression… ». Le journal indique que « les témoignages s'accumulent de façon troublante »[48].

Impact des infrasons

Les grandes éoliennes à axe horizontale génèrent des nuisances qui peuvent avoir un impact sur plusieurs kilomètres dans la direction de la traînée d'air sortante de l'éolienne. Une étude britannique du Ratcliffe Technology Center de Nottingham montre que des micros-vibrations de l'air générées par le mouvement du vent sur les pales d'une grande éolienne peuvent polluer l'air[49] de sons à basse fréquence à sources périodiques qui peuvent constituer des fortes sources de pollution invisibles pour l'homme et perceptible par un grand nombre d'espèces animales.

> *Low frequency noise and vibration levels at a modern wind farm have been measured at distances up to 1km. Noise and vibration levels have been found to comply with recommended residential criteria even on the wind turbine site itself and the acoustic signal is below accepted thresholds of perception below 20 Hz. Nevertheless, low-level infrasonic, periodic noise from the windfarm may occasionally be detected by instrumentation at distances up to 1 km, despite other sources of noise.*

[47] *Federation Environnement Durable - Vent du Bocage*, https://ventdubocage.net/sante3.htm, consulté le 23 juillet 2020.
[48] *Le Monde en guerre contre les éoliennes*, https://www.territoire-energie.com/article/le-monde-en-guerre-contre-les-eoliennes/, consulté le 23 juillet 2020.
[49] D. J. SNOW, *Low frequency noise and vibrations measurements at a modern wind farm*, Powergen - Ratcliffe Technology Centre, 1997.

Plusieurs publications rapportent les effets néfastes sur la santé des basses fréquences et infrasons générés par les parcs éoliens[50]. Les symptômes le plus souvent évoqués sont nausées, tachycardie, acouphènes, difficultés d'endormissement et de concentration. Les très basses fréquences et les infrasons ne sont actuellement pas pris en compte en France dans les études d'impact préliminaires à l'installation d'un parc éolien. L'ANSES a ainsi été saisie afin d'en étudier les effets[51].

Impact sur la biodiversité

Plusieurs études sur les éoliennes[52] montrent que le nombre d'oiseaux tués par les éoliennes est négligeable par rapport au nombre qui meurt en raison d'autres activités humaines (chasse…). Une autre étude suggère que les oiseaux migrateurs s'adaptent aux obstacles ; ces oiseaux qui ne modifient pas leur route et continuent à voler à travers un parc éolien seraient capables d'éviter les pales, du moins dans les conditions de l'étude (vent faible et en journée). Au Royaume-Uni, la Société royale pour la protection des oiseaux a ainsi conclu que :

« Les preuves disponibles suggèrent que des parcs éoliens correctement positionnés ne représentent pas un danger significatif pour les oiseaux. »

Selon la Ligue pour la protection des oiseaux, aux exceptions documentées du vanneau huppé, du chevalier gambette et de la barge à queue noire, de nombreuses espèces semblent pouvoir utiliser l'espace proche des parcs éoliens pour nicher[53].

D'autres études sur les éoliennes montrent qu'elles peuvent avoir un impact significatif sur l'avifaune[54]:

- Perte d'habitat
- Dérangement en phase de travaux
- Effet barrière
- Mortalité (de 1 à 60 oiseaux par éolienne et par an)

Jusqu'à présent relativement négligées, les chauves-souris provoquent des inquiétudes du même type, spécialement pour les plus grandes installations : la mortalité des chauves-souris augmente de façon exponentielle en fonction de la hauteur de la tour, selon une étude de 2007, alors que les mortalités d'oiseaux restent stables. En effet, outre le risque de collision directe, les chauve-souris sont sensibles aux barotraumatismes provoqués par la rotation des pales[55]. Le taux de mortalité des chauve-souris par barotraumatisme ou collision est évalué de 1 à 69 individus par éolienne et par an[56].

---

[50] *Schomer, et al, Wind Turbine Noise Conference, Denver, August 2013 | Waubra Foundation*, https://waubrafoundation.org.au/resources/schomer-et-al-wind-turbine-noise-conference-denver-august-2013/, consulté le 23 juillet 2020.
[51] *Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail*, https://www.anses.fr/fr, consulté le 23 juillet 2020.
[52] *Wind Power and Bird Studies*, http://www.currykerlinger.com/studies.htm, consulté le 23 juillet 2020.
[53] *LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux)*, https://www.lpo.fr/, consulté le 23 juillet 2020.
[54] *Impacts des éoliennes sur les oiseaux - Éolien Biodiversité*, https://eolien-biodiversite.com/impacts-connus/article/eoliennes-et-oiseaux, consulté le 23 juillet 2020.
[55] PROGRAMME DES NATIONS UNIES POUR L'ENVIRONNEMENT, *Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens. Actualisation 2014*, Bonn, UNEP/EUROBATS, 2016.
[56] *Impacts des éoliennes sur les chauves-souris - Éolien Biodiversité*, https://eolien-biodiversite.com/impacts-connus/article/eoliennes-et-chauves-souris, consulté le 23 juillet 2020.

Les impacts néfastes sur la faune nous ont d'ailleurs été rapporté lors d'un entretien avec le spécialiste des chauve-souris, **Laurent Arthur** [57]du Muséum d'histoire Naturelle de Bourges en mars 2019. Il déplore une mortalité forte de chauves-souris aux abords des grandes éoliennes. Leur sonar à ultrasons est souvent pris en default par la vitesse des pales des grandes éoliennes. A ce jour, M Arthur déplore que les données sur la **mortalité des oiseaux et des chauves-souris**, ne font l'objet d'aucune quantification ou suivi de la part des installateurs d'éoliennes ou d'entreprises de production d'énergies renouvelables.

Comment pourrions-nous développer des éoliennes à très faible nuisances sur leur environnement ? Pouvons-nous réduire les nuisances sonores, les effets de micro-vibrations de l'air, les effets stroboscopiques liés aux pales de ces éoliennes de grand format dans le paysage ?

Si elle n'est pas, a priori, opposée à l'énergie éolienne, l'association France Nature Environnement demande une meilleure prise en compte des risques auxquels les oiseaux sont exposés[58].

Impact sur la propagation des ondes

Les éoliennes ont été accusées d'interférence potentielle avec les radars militaires dans le cadre de la détection d'un aéronef volant à basse altitude ou pour les radars météorologiques pour la détection des précipitations. En effet, les éoliennes constituent un obstacle à la propagation de l'onde. Selon la proximité et la densité du parc d'éoliennes, ceci peut constituer un blocage majeur à basse altitude donnant une zone d'ombre dans les données. De plus, comme les pales sont en rotation, le radar note leur vitesse de déplacement et le traitement des données par filtrage Doppler ne peut les différencier d'une cible en mouvement.

Artificialisation des sols

Un socle d'éolienne terrestre est fabriqué en coulant dans le sol 1 500 tonnes de béton sur une armature composée d'un treillis acier. Pour implanter les vingt mille éoliennes terrestres prévues à l'horizon 2025 par la Transition Énergétique, il faudrait donc couler 30 millions de tonnes de béton, incompatibles avec la politique de lutte contre l'artificialisation des sols. De plus, en France, il n'existe aucune obligation légale pour enlever ce béton du sol lors du démantèlement de l'éolienne[59].

Impact du démantèlement

- *Les fondations*

Elles sont arasées à 1 m de profondeur au minimum, pour une hauteur totale de 2,5 à 4 mètres, laissant la possibilité de reprendre une activité agricole sur le site. Dans certains cas, il est

[57] L. ARTHUR et M. LEMAIRE, *Les Chauves-souris de France Belgique Luxembourg et Suisse*, BIOTOPE, coll. « Collection Parthénope », 2009.
[58] *Mise en péril d'espèces protégées : FNE assigne EDF Energies Nouvelles*, https://www.fne.asso.fr/actualites/mise-en-p%C3%A9ril-d%E2%80%99esp%C3%A8ces-prot%C3%A9g%C3%A9es-fne-assigne-edf-energies-nouvelles, consulté le 23 juillet 2020.
[59] *Éoliennes : 30 millions de tonnes de béton pour sauver la biodiversité - Economie Matin*, http://www.economiematin.fr/news-eoliennes-beton-artificialisation-sol-biodiversite, consulté le 23 juillet 2020.

envisageable de supprimer l'intégralité de la fondation, bien que les coûts afférents ne soient pas provisionnés par les exploitants[60].

- *Les postes de livraisons*

Ils sont retirés et leurs fondations entièrement supprimées. Chaque emplacement est ensuite recouvert de terre et rendu à la végétation naturelle ou à une exploitation agricole. Cette dernière étape ne laisse aucune trace visible de l'existence passée du parc éolien.

- *Les pales*

Faites en matériaux composites, elles sont difficilement recyclables et valorisables. À ce jour (2019) la filière de traitement n'existe pas, en France comme en Allemagne[61]. Des procédés de pyrolyse (déjà testés en aéronautique) ou de solvolyse font l'objet de recherches, qui permettraient de recycler à la fois la fibre et la résine polymère, mais il n'existe aucune usine capable de les mettre en œuvre[62]. Aujourd'hui, l'enfouissement des pales est la seule méthode utilisée lors du démantelement des éoliennes pour leur traitement.

- *Le coût du démantèlement*

Il est assumé par le propriétaire du bâtiment (opérateur éolien, SEM…) et est en partie récupéré grâce à la vente de la ferraille des mâts et autres composants. En France, l'article L553-3 du code de l'environnement)[63] impose aux exploitants le démantèlement des installations et la remise en état du site en fin d'exploitation ; pour s'assurer qu'ils seront à même de conduire ces opérations, ils sont tenus de constituer des garanties financières à cet effet. Il n'existe pas, en 2020, de parc éolien en friche en France[64].

- *Sécurité physique autour des éoliennes*

Les éoliennes présentent des risques d'accidents : un fort vent est susceptible de rompre les structures des éoliennes. En 2000, une rupture d'hélices au parc de Burgos, en Espagne, a envoyé des débris tournoyer à plusieurs centaines de mètres[65]. Une des éoliennes de 62 m du parc de Bouin en Vendée s'est écrasée au sol lors du passage de la tempête Carmen le 1er janvier 2018[66].

La majorité des accidents connus sont liés à l'utilisation de matériels d'occasion ou manquant de retour d'expérience, risque inhérent à toute technologie émergente. Les éoliennes aujourd'hui installées bénéficient de certifications réalisées par des organismes indépendants, et sont construites sous contrôle qualité sévère, réduisant significativement les risques de rupture du matériel. Cependant les éoliennes certifiées ne font pas toujours l'objet de tests de longue durée en situation d'exploitation. Comme pour les ouvrages d'art, ce point soulève la

---

[60] Luc LENOIR, *Le (polluant) recyclage des vieilles éoliennes allemandes*, https://www.lefigaro.fr/economie/le-scan-eco/decryptage/2019/01/29/29002-20190129ARTFIG00141-le-polluant-recyclage-des-vieilles-eoliennes-allemandes.php, consulté le 23 juillet 2020.

[61] *Ibid.*

[62] *Comment recycler les pales des éoliennes ?*, https://www.livingcircular.veolia.com/fr/industrie/comment-recycler-les-pales-des-eoliennes, consulté le 23 juillet 2020.

[63] « Code de l'environnement - Article L553-3 ».

[64] *Limoux. Eoliennes du Limousis : on les démonte*, https://www.ladepeche.fr/article/2010/04/21/820617-eoliennes-du-limousis-on-les-demonte.html, consulté le 23 juillet 2020.

[65] « Federation Environnement Durable - Vent du Bocage », *op. cit.*

[66] Laura JARRY, *Tempête Carmen. Éolienne de Bouin au sol : « Ce serait une mini-tornade »*, https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/challans-85300/tempete-carmen-eolienne-de-bouin-au-sol-ce-serait-une-mini-tornade-5480134, consulté le 23 juillet 2020.

question de l'inspection et de la maintenance des installations d'éolienne, qui ne sont pas tpujours

Impact sur la dynamique terrestre naturelle

Les éoliennes exploitent une énergie cinétique produite par des différences de pression dans l'atmosphère sous l'influence du soleil. Ces flux gazeux participent à la dynamique climatique globale. Une étude publiée par des chercheurs de la Société Max-Planck dans la revue Earth System Dynamics[67] montre que l'énergie potentiellement extractible (18 à 68 Térawatts (TW) selon la méthode d'évaluation) est du même ordre de grandeur ou supérieure d'un ordre de grandeur à celui de la demande mondiale en énergie (17 TW), mais que certaines des conséquences climatiques (sur les flux de vents et leur vitesse) d'une extraction à ce niveau maximal seraient comparables à celles d'un doublement du taux de CO2.

L'étude ne prend en compte que l'éolien terrestre; si l'on y ajoute l'éolien en mer (offshore), le potentiel est presque doublé.

En 2018, la puissance moyenne produite par l'éolien est de 0,27 TWn 21, soit à peine 1,5 % du bas de la fourchette citée ci-dessus, et un facteur de croissance de 3,5 en huit ans. Tout indique que la puissance installée va continuer à croître fortement dans les prochaines années, bien qu'un net ralentissement soit observé en Europe. La marge est donc en train de se réduire, mais reste plus que confortable.

En tout état de cause, le rapport affirme que l'utilisation généralisée de l'énergie éolienne provoquerait un changement dans les précipitations, dans la dissipation de chaleur par convection, ainsi qu'une augmentation des radiations solaires à la surface de la Terre. En conclusion, il préconise de lancer des études complexes de modélisation pour accompagner et limiter le développement de l'utilisation de l'énergie éolienne, tout en confirmant d'ores et déjà qu'il existe un niveau maximal pour la récupération d'énergie éolienne, entraînant des conséquences sur le climat de la planète.

Un vent de protestation souffle sur les éoliennes

L'ouvrage "Eoliennes, La face noire de la transition écologique », de Fabien Bouclé[68] fait le bilan, et énumère l'ensemble des contraintes qui s'appliquent désormais au secteur de l'éolien.

Le livre démontre de manière méthodique, avec l'appui d'un grand nombre de documents l'impact écologique de 30 ans de transition énergétique verte.

L'impact écologique d**e l'extraction des terres rares**, pour les pièces qui constituent les éoliennes, l'impossibilité de recyclage des pales en carbone, l'impact néfaste sur la biodiversité, notamment les oiseaux et les poissons, les nuisances sur l'homme en particulier sur les vents pollués de vibrations basses fréquences qui avec l'effet stroboscopique des pâles créent de véritables nuisances sur l'homme, la pollution visuelle des paysages et leur impact sur notre territoire. (Des sons à basses fréquences (de 20Hz à 200 Hz) et les infrasons (en dessous de 20Hz) émis par les champs d'éoliennes, font l'objet d'études contradictoires sur leur impact sanitaire.)

[67] L. M. MILLER, F. GANS et A. KLEIDON, « Estimating maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences », *Earth System Dynamics*, 11 février 2011, vol. 2, nº 1, pp. 1‑12.
[68] Fabien BOUGLE, *Eoliennes : la face noire de la transition écologique*, Éditions du Rocher, 2019.

Cette énergie “verte” que les institutions nationales et européennes défendent coute que coute, n’est-elle pas devenue obsolète et néfaste pour notre environnement ?

Mais l’aspect le plus inquiétant de cette liste est que l’économie de l’éolien, poussée par de forts lobbies industriels, fait souvent l’objets de prise illégale d’intérêts d’élus locaux qui perçoivent des contres-parties pour favoriser l’implantation de ces éoliennes dans leur territoire, quand ils n’en sont pas eux-mêmes les bénéficiaires directs. A travers l’Europe des organisations “mafieuses” ou des individus, par pure intérêt personnel, participent à la promotion de cet éolien.

A contrario, l’éolien urbain intégré sur des bâtiments permet un contrôle différent, car ces territoires et potentiels éoliens en périphérie des bâtiments ne fait pas partie de territoires sur lequel un groupe d’élus locaux à la possibilité de contrôle.

C’est bien le promoteur, l’investisseur ou le maitre d’ouvrage qui a le droit d’installer ces éoliennes sur un bâtiment en cours de construction. D’autre part, le bâtiment servant de support, ce dispositif n’a pas d’impact supplémentaire sur l’environnement que le bâtiment lui-même. Le dispositif offre des nuisances sonores et un impact sur la biodiversité réduit. La hauteur des éoliennes, leurs pales dangereuses sont remplacées par des micro-éoliennes à axe vertical dont les pales sont de plus grande sureté.

Ces problematiques de déploiement de l’énergie éolien sur nos territoires, soulèvent plusieurs hypothèses de travail pour repenser ce fonctionnement :

- Pourrions nous travailler sur le paysage de nos villes afin de proposer une meilleure intégration de ces dispositifs dans un panorama urbain ?
- Pourrions nous rapprocher les lieux de production d’énergie des lieux de consommation?
- Nos batiments peuvent-ils devenir des supports de capteur d’énergie, et intégrer un champ d’éoliennes plus petites groupées plutôt que quelques grandes éoliennes ?

Nous étudions, dans le chapitre suivant, les technologies de partage d’énergie qui pourraient avoir un impact sur le fonctionnenment des infrasctructures de production d’énergie et sur leur possibile dissémination au travers de nos territoires.

1.3. ETAT DE L’ART SCIENTIFIQUE

Un grand nombre de recherches (articles, ouvrages et thèses) ont fait des apports important de connaissance sur l’utilisation du vent et pour définir le cadre de cette thèse. Ils sont cités dans les parties qui constituent cette thèse. J’ai souhaité ici regrouper les éléments les plus significatifs.

1.3.1 Etudes de moulins traditionnel ou d’architecture ancienne

Les formes anciennes d'utilisation du vent dans la conception des batiments ont fait l'objet de 2 thèses intéressantes d'architectes du laboratoire GSA: Celle de Reza Dehghan[69] sur les Bagdir, ces formes anciennes tour à vent intégrées au palais de certaines villes comme celle de Yadz. En créant un modèle numérique de ces tours, il a pu calculer la vitesse de l'écoulement d'air dans les alvéoles de la tour et évaluer les performances climatiques de ces ouvrages. Ce travail montre que les proportions de ces tours anciennes sont presque parfaites pour optimiser la ventilation par convection d'air. Le travail de Kambiz Moshtaghe[70] s'est concentrée sur les formes traditionnelles de moulins à vent en Iran et l'évaluation de leur performance énergétique à partir, là encore d'une modélisation de leur fonctionnement.

1.3.2 Etudes sur la simulation numérique d'écoulement d'air

Ce sujet fait l'objet de nombreux travaux, mais je présente ici quelques-uns de ceux qui ont pu faire avancer la connaissance des méthodes de simulation numériques d'écoulement dans l'étude des bâtiments : C'est le cas de la chercheuse Italienne Margherita Ferrucci[71] qui a développé en étudiant des palais anciens Italiens un modèle de conception de ventilation naturelle en fonction de la typologie de bâtiment, de leur hauteur et proportions.

Sur la simulation numérique aéraulique, l'ouvrage de DC Wilcox Turbulence Modeling for CFD[72] a servi de référence pour définir les conditions et le paramétrage de l'étude aéraulique en régime turbulent, le régime d'écoulement caractéristique des villes. Cette étude a permis de définir le niveau de rugosité de la couche limite en site urbain et de donner des hypothèses de réflexions sur l'implantation de dispositifs urbains en site urbain.

La thèse de Munif Jourieh[73], étudie l'implantation d'éoliennes dans ces parcs éoliens et donne des indications précieuses sur le mode d'évaluation des turbulences générées par un parc éolien et stratégies d'implantation au sol afin de minimiser cet impact.

Concernant les études de cas de systèmes éoliens et leur simulation, il faut citer le travail de R. Yang[74] de l'Université de Quanzhou « Wind Energy Utilization on the roof of High-rise Building"[75]qui a évalué des scénarios de performance d'éoliennes sur des toits de bâtiment à partir d'une analyse dans ANSIS Fluent. Ce travail ne considère que le toit comme source possible d'implantation et n'étudie que des typologies de bâtiments isolés et non intégrés à un ilot urbain en site dense.

1.3.3 Etudes sur le micro-éolien et l'intégration en site urbain

[69] DEHGHAN KAMARAGI GHOLAMREZA, *Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique : histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances - Sécheresse*,Unversité Paris Est, 2012.
[70] Kambiz MOSHTAGHE GOHARI, *Morphogenèse des moulins à vent d'Iran, techniques de gestion du vent de manière architectonique*, *op. cit.*
[71] Margherita FERRUCCI, *Ventilation naturelle en architecture : méthodes, outils et règles de conception*, These de doctorat, Paris Est, 2017.
[72] David C. WILCOX, *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd edition., La Cãnada, Calif, D C W Industries, 1998, 540 p.
[73] Munif JOURIEH, *Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien*, phdthesis, Arts et Métiers ParisTech, 2007.
[74] Yan Hong CHEN, Xing Qian PENG et Rong YANG, « Wind Energy Utilization of High-Rise Buildings Roof Numerical Analysis », *Applied Mechanics and Materials*, 2012, vol. 137, pp. 87-94.

Mark Moriarty dans sa thèse [76] à l'Université de Pittsburg développe une faisabilité pour des éoliennes embarquées sur des bâtiments simples en réseaux. Ce travail évalue le potentiel énergétique à partir de comparaison de systèmes équivalents connus sans simulation numérique, ni essai en soufflerie des dispositifs proposés.

La thèse de Bao Wang[77] de l'Université de Toulouse étudie plusieurs scénarios d'écoulement de vent dans des quartiers qui utilisent majoritairement le modèle de la ville chinoise ou américaine, un champs de tours de grandes hauteurs, en fonction de leur hauteur et de leur orientation par rapport au vent. Ce travail évalue les modes d'implantation sur ces ouvrages mais ne discute pas de la problématique d'intégration architecturale de ces dispositifs.

Zeng[78] du laboratoire Energie du MIT développe une réflexion sur des modèles de production d'énergie hybrides intégrant dispositifs photovoltaïques et éoliens et de leur répartition sur des ensembles urbains. Le modèle identifie en fonction de l'orientation des batiments une méthode d'implantation de ces 2 types de dispositifs.

L'article de John Dabiri[79] du Caltech Field Laboratory for Optimized Wind Energy (FLOWE) en Californie étudie la densité des éoliennes à axe verticales ou des micro éoliennes permettant d'augmenter leur regroupement en clusters. Les turbulences en sortie de pâles sont beaucoup moins importantes sur ce type de dispositifs que sur les dispositifs de type grande éolienne, où les effets de turbulence spiralée créent sur plusieurs centaines de mètres des mouvements d'air non utilisables.

Ces études ont permis de définir le contour de cette recherche et de combiner dans une seule étude les questions d'intégration architecturale, d'évaluation de performance et de comportement en site urbain dense.

1.3.4 Vers l'internet de l'énergie

L'Internet de l'énergie (IoE) est un paradigme important pour comprendre le contexte futur de dispositifs produisant de l'énergie décentralisés. L'IOE est la mise en œuvre de la technologie de l'Internet des objets (IoT) dans les systèmes énergétiques distribués afin **d'optimiser l'efficacité des infrastructures énergétiques et de réduire le gaspillage**[80]. Ce système énergétique est particulièrement adapté à l'intégration de dispositif de production d'énergie en zone urbaine dense et permet une amélioration continue des protocoles d'échange et de partage de l'énergie dans ce réseau. Ce chapitre précise le fonctionnement de ces systèmes.

L'Internet de l'énergie (IoE) fait référence à la modernisation et à l'automatisation des infrastructures électriques pour les producteurs d'énergie. Cela permet à la production d'énergie de progresser plus efficacement et plus proprement, avec le moins de déchets

[76] Mark MORIARTY, *FEASIBILITY OF SMALL-SCALE URBAN WIND ENERGY GENERATION*, University of Pittsburgh ETD, University of Pittsburgh, 2010.
[77] Biao WANG, *Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent: performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier*, 2015.
[78] Heshuang ZENG, *Integration of renewable energy with urban design : based on the examples of the solar photovoltaics and micro wind turbines*, Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2011.
[79] Robert W. WHITTLESEY, Sebastian LISKA et John O. DABIRI, « Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design », *Bioinspiration & Biomimetics*, août 2010, vol. 5, n° 3, p. 035005.
[80] *What is the Internet of Energy?*, https://www.nesgt.com/blog/2019/05/what-is-the-internet-of-energy, consulté le 15 juillet 2020.

possible. Le terme est dérivé du marché de plus en plus important de la technologie de l'Internet des objets, qui a permis de développer les systèmes d'énergie distribuée qui composent l'IoE. Un exemple de technologie IoE comprend l'utilisation de capteurs intelligents, communs à d'autres applications de la technologie IoT, qui permettent des mécanismes facilités par l'IoE tels que la surveillance de l'alimentation, le stockage distribué et l'intégration des énergies renouvelables.
La mise à jour des infrastructures électriques permet à l'énergie de circuler efficacement, en maximisant son potentiel et en réduisant le gaspillage d'énergie. Lorsque l'énergie est transmise sur des lignes qui ne peuvent pas la conduire efficacement, une grande partie de cette énergie est perdue en cours de route. Les lignes n'ont tout simplement pas la capacité de transporter toute l'énergie envoyée.

Alors que les pays du monde entier investissent davantage dans l'énergie verte et les ressources renouvelables, les inefficacités des infrastructures électriques existantes dans le monde sont souvent négligées. Cela signifie que les énergies renouvelables ne peuvent pas être fournies à leur niveau d'efficacité optimal car le réseau ne peut pas le supporter complètement. Par exemple, la Chine est l'un des plus grands producteurs mondiaux d'énergies renouvelables, mais elle connaît toujours des pénuries et des crises énergétiques car elle ne peut pas fournir cette énergie à un niveau qui puisse répondre aux besoins de sa population. Cela entraîne des pannes de courant et des interruptions. L'énergie existe mais l'infrastructure non. De même, le pays produit un nombre considérable de véhicules électriques, mais ne dispose pas de suffisamment de stations de recharge pour que les véhicules puissent fonctionner. En 2014, les pertes d'énergie en Chine dues à l'inefficacité des infrastructures étaient plus de 25%. Toutefois, selon le Bureau national des statistiques de Chine, les niveaux d'efficacité énergétique du pays se sont améliorés au cours 5 dernière années, la quantité d'énergie utilisée pour produire une unité du produit intérieur brut (PIB) de la Chine ayant chuté de 5% en 2016, selon les données les plus récentes disponibles en janvier 2018[81].

1.3.5 Le développement exponentiel de l'internet de l'énergie (IOE)

Une solution potentielle au problème de l'inefficacité énergétique est le transport à ultra haute tension (UHV), un système permettant à l'énergie d'être transmise rapidement sur de longues distances. L'UHV résout le problème de la production d'énergie trop éloignée des centres de charge. La Chine a d'abord mis en place l'UHV en 2009, et son développement est en expansion constante pour répondre à la demande.
La Chine s'emploie à automatiser la distribution et à ajouter davantage de ressources pour répondre à la demande, y compris un plus grand nombre de stations de recharge pour voitures électriques. Elle construit également des sites de stockage, en particulier dans les villes qui consomment le plus d'énergie, afin de stocker efficacement l'énergie excédentaire et à proximité de l'endroit où elle sera nécessaire. Cela aura des avantages économiques supplémentaires pour les entreprises fournissant des énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire et éolienne, du fait qu'une plus grande quantité d'énergie sera conservée et vendue, en plus de coûts de stockage relativement bas.
Dans les années à venir (Voir figure 64), alors que le monde s'emploie à utiliser et à exploiter les sources d'énergie renouvelables, l'utilisation de ressources non renouvelables devrait diminuer, ce qui réduira la nécessité de disposer d'infrastructures obsolètes gérant des ressources telles que le charbon et le pétrole[82].

[81] James CHEN, *Internet of Energy (IoE)*, https://www.investopedia.com/terms/i/internet-energy-ioe.asp, consulté le 15 juillet 2020.
[82] *Ibid.*

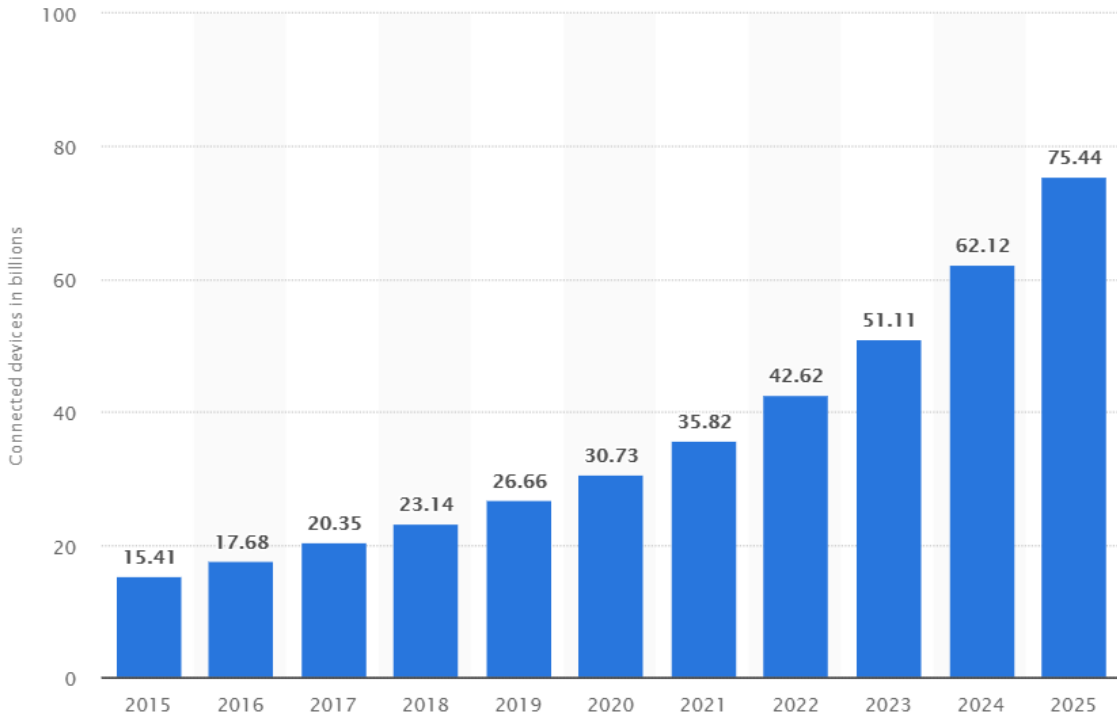


Figure 35. L'internet des objets (Internet of Things - IoT) connectés installés dans le monde de 2015 à 2025 en milliards[83]

1.3.6 Exemple de IoE

Diverses sociétés ont commencé à implémenter la technologie IoT dans la manière dont elles produisent, transmettent ou consomment de l'énergie.
General Electric associe les technologies Big Data, Machine Learning et IoT pour créer un Internet de l'énergie. Des capteurs sont utilisés pour collecter des données, qui sont ensuite envoyées à l'analyse d'un algorithme d'optimisation. Cela permet une surveillance en temps réel de leurs équipements et a apporté de nombreux avantages, notamment une réduction de 5% des temps d'arrêt et de 25% des coûts de maintenance et d'exploitation.
Les hôtels Marriott ont relié une unité de commutation aux refroidisseurs d'air climatisé situés sur le toit. Lorsque la demande est sur le point d'augmenter, le système envoie un message à Marriott pour lui demander s'il est disposé à subir une panne de courant. Si l'hôtel accepte, les refroidisseurs sont éteints à distance. Si le système était mis en œuvre sur l'ensemble de la chaîne hôtelière, les économies réalisées seraient de 700 000 £ par an et les clients ne remarqueraient même pas la légère hausse de température due à la mise hors tension.

1.3.7 L'impact de l'internet de l'énergie sur le lissage production/consommation

Deux révolutions technologiques forment l'aube du XXIe siècle : le développement d'Internet et la transition vers un système énergétique mondial sans carbone (Voir figure 65).
La décarbonisation, la décentralisation et la numérisation transforment le secteur de l'énergie. Ces trois tendances mondiales modifient notre façon de produire, de distribuer et de consommer de l'énergie.

1. Flambée de la demande mondiale d'énergie propre

[83] *L'internet des objets connectés en 2020, Source : Statista. https://fr.statista.com/statistiques/584481/internet-des-objets-nombre-d-appareils-connectes-dans-le-monde--2020/*

2. Les réseaux centralisés ne sont plus adéquats
3. Des réseaux plus intelligents garantissent un approvisionnement plus fiable
4. Faire face à des montagnes de données
5. L'intelligence artificielle et l'informatique quantique transforment le secteur de l'énergie[84].

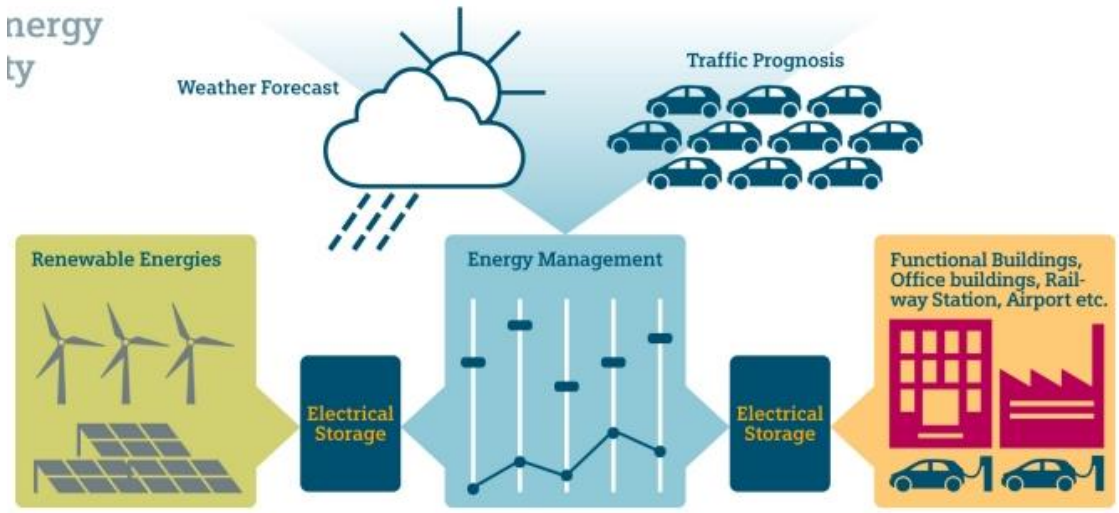


Figure 36. L'exemple de l'internet de l'énergie pour les nouvelles mobilités urbaines [85]

1.3.8 Vers la « SMART CITY »

Une **ville intelligente** est une zone urbaine qui utilise différents capteurs de collecte de données électroniques pour fournir des informations permettant de gérer efficacement les ressources et les actifs. Cela comprend les données collectées auprès des citoyens, des dispositifs mécaniques, des actifs, traitées et analysées pour surveiller et gérer les systèmes de circulation et de transport, les centrales électriques, les réseaux d'approvisionnement en eau, la gestion des déchets, les systèmes d'information, les écoles, les bibliothèques et les hôpitaux (Voir figure 66).

Le concept de ville intelligente intègre les technologies de l'information et de la communication (TIC) et divers dispositifs physiques connectés au réseau (l'Internet des objets ou IoT) pour optimiser l'efficacité des opérations et des services urbains et se connecter aux citoyens.

La technologie des villes intelligentes permet aux représentants municipaux d'interagir directement avec les infrastructures communautaires et urbaines et de surveiller la ville et son évolution. Les technologies de l'information et de la communication (TIC) sont utilisées pour améliorer la qualité, la performance et l'interactivité des services urbains, réduire les coûts et la consommation de ressources et accroître les contacts entre les citoyens et le gouvernement.

Les fonctions des villes intelligentes sont développées pour gérer les flux urbains et permettre des réponses en temps réel. Une ville intelligente est donc mieux préparée à répondre aux

[84] *5 problems the internet of energy can solve | Greenbiz*, https://www.greenbiz.com/article/5-problems-internet-energy-can-solve, consulté le 15 juillet 2020.

défis qu'une ville qui entretient une relation seulement « transactionnelle » avec ses citoyens. Pourtant, le terme lui-même reste peu clair et est ouvert à de nombreuses interprétations[86].

Le groupe de consulting Frost & Sullivan utilise 8 "smart" categories pour définir cette entité: smart buildings, smart energy, smart information technology, smart mobility, smart city planning, smart business, smart governance, and smart citizenry[87].

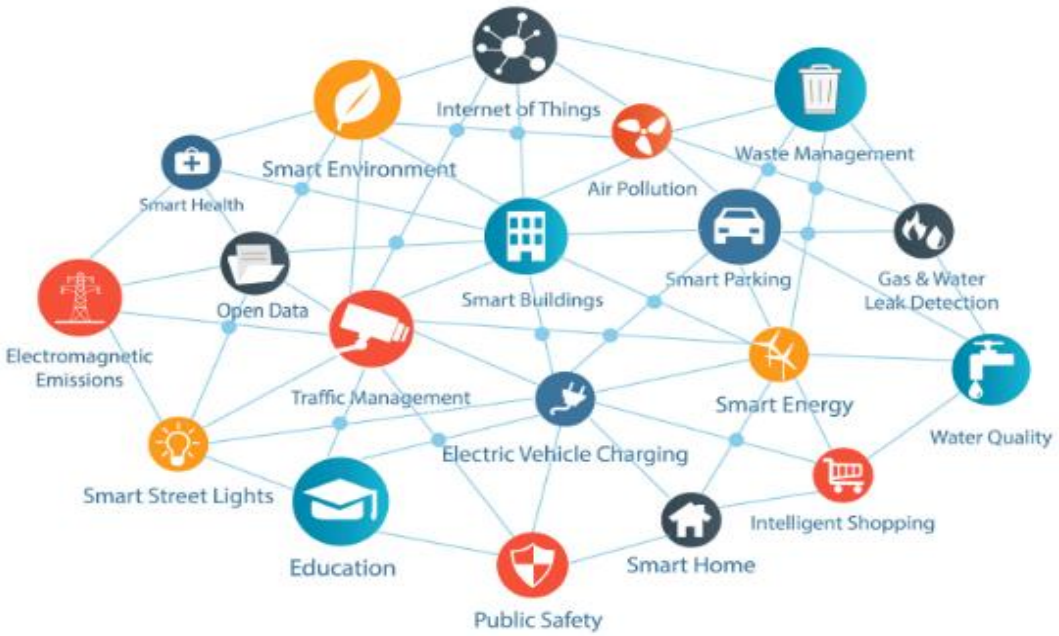


Figure 37. Exemple de modèle de Smart city, MIT Senseable City Lab, Carlo Rati

La mise en réseau numérique génère un volume de données considérable et en augmentation constante qui est collecté et traité dans les « centres de données des villes intelligentes ». Des milliers de capteurs et de données des villes intelligentes fournissent toutes sortes d'informations. Ces développements améliorent la sécurité publique, car les nouvelles technologies de communication facilitent de plus en plus la coordination entre les agences gouvernementales et sociales et les particuliers. Par exemple, quand une tempête est prévue, toutes les données pertinentes sont collectées, analysées et évaluées. Une chaîne d'informations en cascade prédéfinie transmet les conclusions aux fournisseurs d'énergie, aux hôpitaux, aux opérateurs de transport et aux gestionnaires d'installations en temps réel, afin qu'ils puissent prendre les précautions appropriées. Les services en réseau permettent la création de systèmes de gestion de la ville utilisant de manière optimale les ressources et aidant à minimiser les dommages potentiels. Cette capacité de réaction est souvent appelée résilience. En d'autres termes, les villes résilientes[88] peuvent gérer de manière flexible des situations potentiellement dangereuses (Voir figure 67).

[86] MCLAREN, DUNCAN, AGYEMAN et JULIAN, « Ville intellegente », *in Sharing cities*.

[87] *Grid edge – where the energy system of the future takes off, https://new.siemens.com/global/en/company/stories/infrastructure/grid-edge-where-the-energy-system-of-the-future-takes-off.html, consulté le 15 juillet 2020.*

[88] *Dans le cadre de l'aménagement du territoire ou de l'urbanisme est appelée **ville résiliente,** la **ville** qui a la capacité de s'adapter aux événements afin de limiter les effets des catastrophes naturelles et de retrouver un fonctionnement normal le plus rapidement possible.*

Barcelone est également considérée comme une ville pionnière dans ce domaine. La ville a créé un département administratif pour gérer tous les problèmes de résilience urbaine. Un système d'information géographique combine des données de l'infrastructure municipale avec des informations collectées sur des domaines tels que l'administration publique, l'environnement, les espaces publics et la population. L'objectif est d'évaluer plus efficacement l'impact des événements planifiés et non planifiés et d'améliorer la capacité de la ville à y répondre[89].

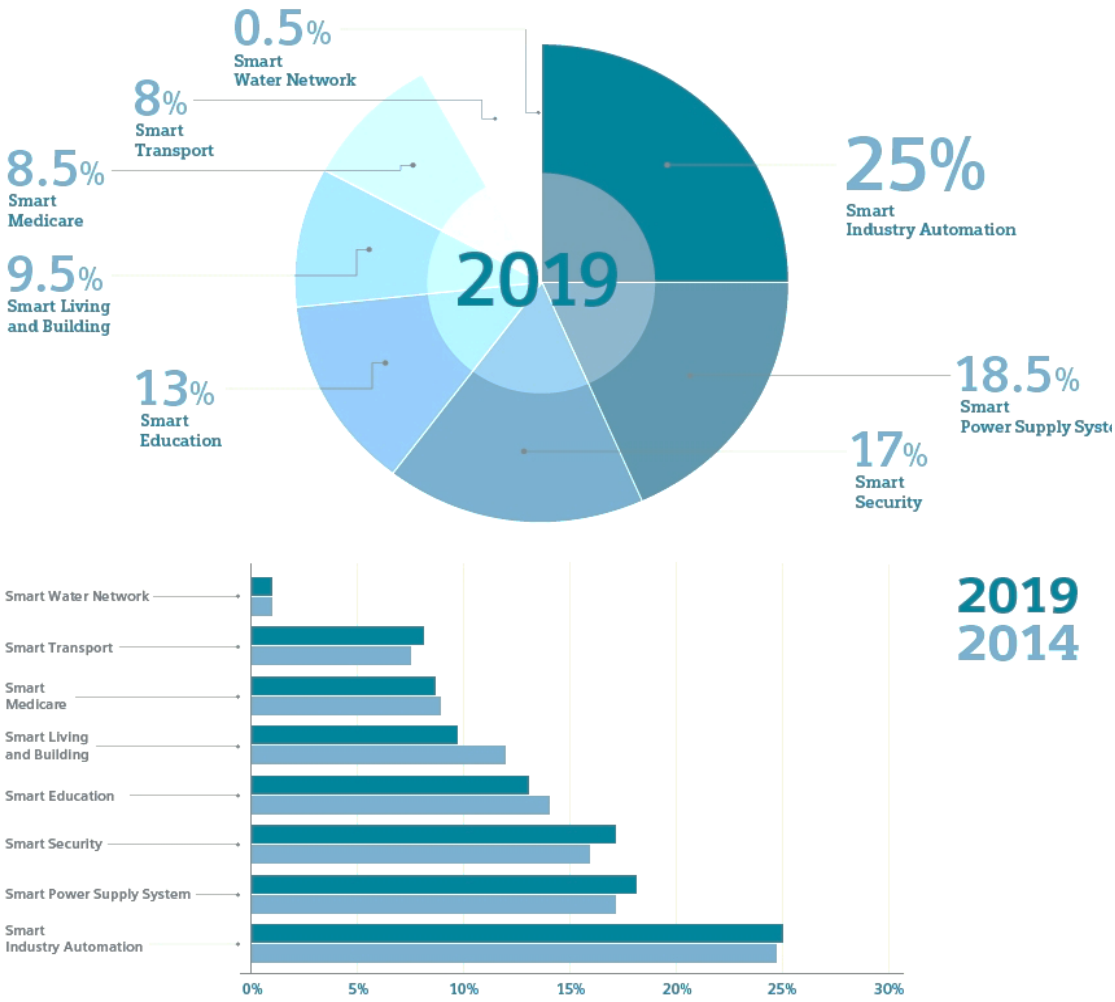


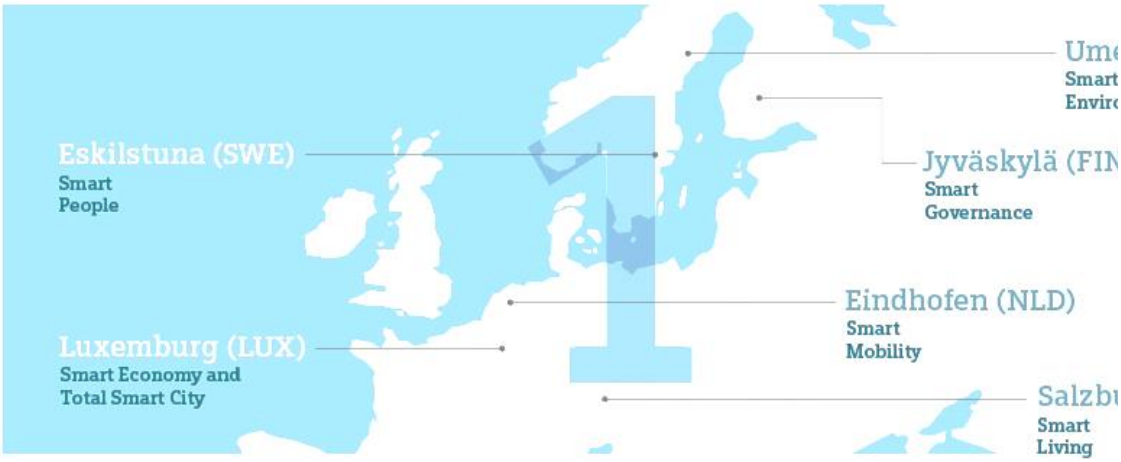
Figure 38. Répartition des marchés globaux des smart cities, 2014 – 2019, MIT Senseable City Lab, Carlo Rati

1.3.9 Des Investissements croissants dans les technologies de la ville intelligente

Ces exemples illustrent comment des villes combinant des données provenant de diverses infrastructures peuvent améliorer leur efficacité, économiser de l'argent, réduire les nuisances environnementales et offrir à leurs habitants une meilleure qualité de vie. De telles mesures vont aboutir à la création d'un réseau complexe d'informations couvrant les technologies d'approvisionnement, les structures d'information et de communication et les réseaux sociaux, ouvrant ainsi la voie à des services de plus en plus intelligents à tous les niveaux. Selon l'OCDE, l'investissement annuel global nécessaire pour tous les projets d'infrastructure entre 2010 et 2030 sera d'environ 1 800 milliards de dollars et une grande partie de ce total sera investie dans les villes.

[89] « Grid edge – where the energy system of the future takes off », *op. cit.*

Ce vaste investissement crée de nouveaux segments d'activité. Une étude réalisée par l'Association allemande des technologies de l'électricité, de l'électronique et de l'information (VDE) indique que le segment des technologies de la ville intelligente se développe rapidement. Les deux tiers des 1 300 entreprises membres de l'association s'attendent à voir un nombre économiquement significatif de villes intelligentes d'ici 2030. La société d'études de marché Technavio s'attend à ce que le marché mondial des villes intelligentes augmente de 16,6% par an entre 2014 et 2019. L'Amérique du Nord et du Sud, sont en avance depuis 2014 sur ce sujet, avec l'Amérique du Nord clairement en tête[90] (Voir figure 68).



	Smart Economy	Smart People	Smart Governance	Smart Mobility	Smart Environment	Smart Living	Total Smart
1	Luxemburg, Luxembourg	Eskilstuna, Sweden	Jyväskylä, Finland	Eindhoven, the Netherlands	Umeå, Sweden	Salzburg, Austria	Luxem Luxen
2	Aarhus, Denmark	Tampere, Finland	Umeå, Sweden	Salzburg, Austria	Jönköping, Sweden	Graz, Austria	Aarhu Denm
3	Cork, Ireland	Aarhus, Denmark	Jönköping, Sweden	Aarhus, Denmark	Eskilstuna, Sweden	Innsbruck, Austria	Umeå, Swed
4	Regensburg, Germany	Oulu, Finland	Odense, Denmark	Luxemburg, Luxembourg	Montpellier, France	Luxemburg, Luxembourg	Eskilst Swed
5	Eindhoven, the Netherlands	Umeå, Sweden	Aalborg, Denmark	Leicester, Great Britain	Jyväskylä, Finland	Brügge, Belgium	Aalbo Denm

Figure 39. Classement de l' « intelligence » des villes de taille intermédiaire en Europe, basé sur IESE Cities in Motion Index, 2018

1.3.10 Transformer Singapour grâce à la technologie

La révolution numérique est en cours et les progrès des technologies numériques transforment notre façon de vivre, de travailler et de communiquer. Singapour est île-pays, une nation intelligente dotée d'une innovation numérique et d'une ville de classe mondiale dotée d'un gouvernement qui offre à ses citoyens le meilleur chez-soi possible et qui réponde à leurs besoins différents et changeants.

Au niveau le plus large, l'économie est le plus grand moteur de la croissance et de la compétitivité de Singapour. Il est soutenu par le gouvernement, qui s'efforce de catalyser la croissance et l'innovation dans tous les domaines, y compris le secteur public. Ces efforts visent essentiellement à faire en sorte que tous les segments de la société puissent exploiter les technologies numériques et en tirer profit.

[90] *Ibid.*

1.3.11 Projets nationaux stratégiques

Pour favoriser l'adoption généralisée des technologies numériques et intelligentes dans tout Singapour, la ville a identifié des projets nationaux stratégiques clés, qui sont des catalyseurs de l'action Smart Nation. (Voir figure 69).

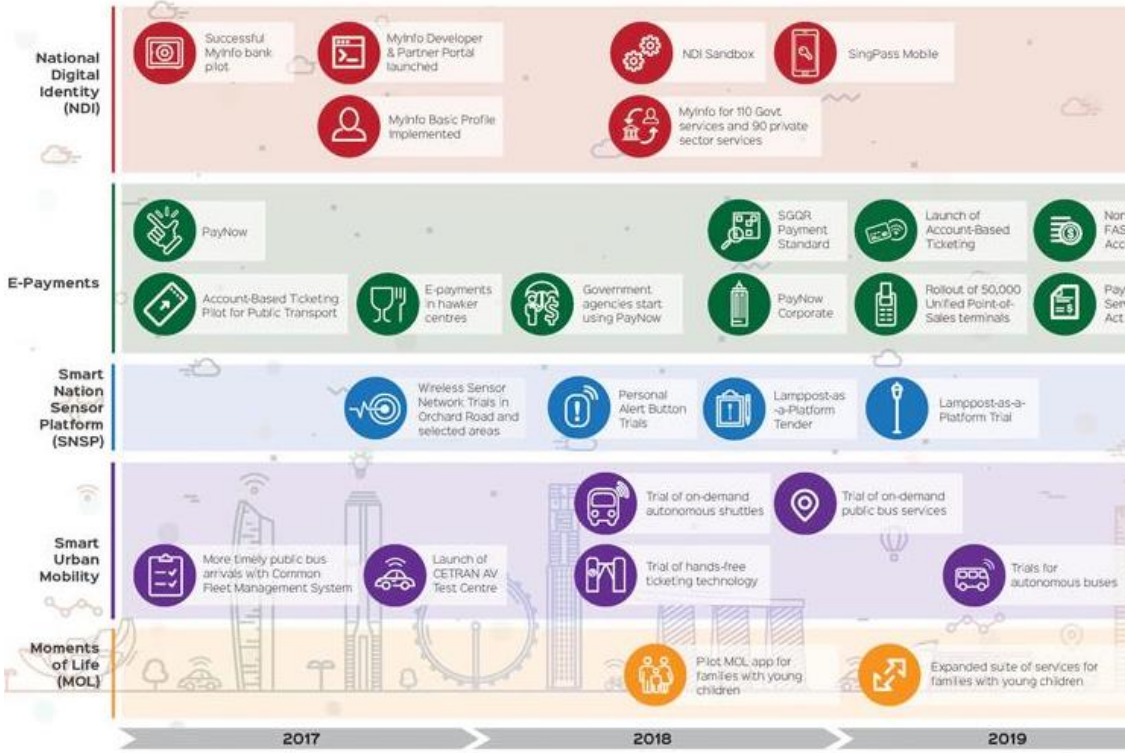


Figure 40. Les projets nationaux stratégiques pour Singapour par Institute Smart Nation, un organisme de transformation de la relation entre citoyens et la gouvernance.

- **Données ouvertes :** Les ensembles de données collectés par les agences publiques sont désormais disponibles et accessibles au public via des portails en ligne afin que tout le monde puisse participer et co-créer des solutions centrées sur le citoyen.

- **Laboratoire vivant :** Singapour reste déterminée à investir dans la recherche et l'innovation pour catalyser les percées émergentes et stimuler de nouveaux domaines de croissance économique. Ces initiatives comprennent les projets Recherche, Innovation et Entreprises 2020 (RIE2020) et IA Singapour.

- **Écosystème de l'industrie et de la start-up :** Des accélérateurs de start-up, tels que JTC Launchpad, une forte présence de capital-risque et de multinationales, et la création de SGInnovate, soutiennent l'écosystème des start-ups de Singapour en mettant en relation des technopreneurs et des mentors du secteur, tout en constituant un pont entre innovation et entreprise.

Le district numérique de Punggol (PDD) est un exemple d'environnement développé pour attirer les meilleurs talents et sociétés du secteur de la technologie et favoriser leur croissance. En regroupant les secteurs en croissance, le gouvernement de Singapour a rassemblé des services numériques de grande valeur dans le PDD et à créer un écosystème avec des environnements de bancs d'essai propices à la prospérité de nos entreprises et de la communauté dans une économie numérique.

- **Capacités de calcul et inclusion numérique :** Les efforts de Smart Nation sont soulignés par le recyclage et la promotion de l'apprentissage du codage et de la pensée informatique, afin que tous les segments de la population en bénéficient, quel que soit leur âge ou leur savoir numérique. Des ressources sont également en place pour aider les entreprises et les PME à rechercher des opportunités dans l'économie numérique.

- **Collaboration transfrontalière :** Il est important que les villes se rassemblent pour partager leurs bonnes idées et leurs meilleures pratiques. Explorez les collaborations et testez des solutions intelligentes centrées sur les personnes. Singapour reste ouverte au partage de nouvelles idées et à l'apprentissage des autres. Cela nous permettra d'adopter des idées et des pratiques optimales susceptibles de profiter non seulement à Singapour, mais également à la région et au monde[91].

Nous étudions, dans le chapitre suivant, les typologies des ilôts de la ville de Paris afin de comprendre comment les formes urbaines génèrent des surfaces propices à la captation d'énergie et à l'intégration d'éléments actifs en toiture ou en façade.

1.4 ANALYSE DES TYPOLOGIES DE BATIMENTS EN SITE URBAIN : L'EXEMPLE DE PARIS

1.4.1 Introduction

Notre recherche pose la question du rapport entre les bâtiments et le vent. La ville, de par sa densité, constitue un sujet d'étude intéressant et complexe. Nous avons donc étudié des typologies d'ilots urbains afin de comprendre leur impact cumulé sur le mouvement du vent en ville.

Nous avons choisi de développer une étude de cas de la ville de Paris pour 2 raisons :

1- La première est liée à la proximité et la facilité d'accès entre les lieux de travail et d'enseignements et la ville de Paris
2- La deuxième raison est que, la stratification historique et urbaine de cette ville, constitue un bon exemple de la diversité des situations urbaines que nous pouvons rencontrer dans une ville.

En parallèle du travail que nous avons réalisé de relevés de mesures sur le vent à Paris, nous avons étudié les typologies urbaines de bâtiments anciens et modernes dans cette ville. Les

[91] *Transforming Singapore*, https://www.smartnation.gov.sg/why-Smart-Nation/transforming-singapore, consulté le 15 juillet 2020.

technologies de construction, les matériaux utilisés, les types de toiture, les édicules d'accès, les différentes de hauteurs et les cours ouvertes dans les îlots urbains sont autant d'artefacts non visibles depuis la rue.

Pour aborder cette analyse, nous avons identifié différentes typologies de bâtiments basées sur leurs périodes de construction. L'APUR [92] offre une source intéressante pour identifier les familles d'immeubles construits à Paris. Cette approche permet de relever les formes, les hauteurs de bâtiments, les différences d'alignements dans l'îlot urbain, permettant d'anticiper les zones d'accélération ou de ralentissement potentiels du vent en ville.

1.4.2 Avant 1800[93]:

On estime aujourd'hui à 6% les logements parisiens construits avant 1800 (Voir figure 35). L'ensemble des bâtiments construits avant 1800, constituent un patchwork relativement hétérogène du point de vue architectural.

Les bâtiments de logements collectifs datant de cette période se retrouvent surtout dans les arrondissements du centre (I^{er} au XI^{ème} arrondissement), le long des anciennes voies N/S et E/O de la capitale, le long de quelques extensions radiales dans les anciens faubourgs (Saint-Antoine, Mouffetard), dans des lotissements (Odéon, île Saint-Louis, Palais-Royal, place des Vosges) ainsi que dans quelques anciens noyaux villageois (La Villette, Vaugirard, Saint Blaise...). Leur répartition montre également une dissymétrie entre la rive gauche et la rive droite, avec une forte concentration de bâtiments datant d'avant 1800 dans le quartier du Marais.

Dès le début du XVIIe siècle, les règlements de voirie interdisent toute construction en encorbellement au-dessus des voies, impose la mitoyenneté et oblige à l'alignement sur rue. Les façades des immeubles parisiens resteront plates jusqu'au milieu du XIXe siècle.

Le tissu urbain hérité de l'Ancien Régime est dense, avec un réseau de voies étroites au tracé irrégulier, dépassant rarement les 10 mètres de large. Les îlots sont de petite dimension, à l'exception des quartiers qui ont fait l'objet de réaménagements postérieurs à leur création. Les parcelles sont généralement étroites et profondes, de 4 à 6 mètres de large et entre 10 et 20 mètres de profondeur, mais peuvent être de plus grande dimension et plus régulières dans les lotissements (par exemple place Dauphine). (Voir figure 36)

L'implantation des bâtiments à l'alignement sur rue est la règle générale mais les volontés d'élargissement des voies ont rendu ses limites mouvantes, sauf dans les lotissements, où elles sont rectilignes. Les emprises libres en cœur d'îlot sont souvent très fragmentées, de forme irrégulière et de taille très réduite. Pour les parcelles les plus denses, elles se limitent à de simples puits de lumière.

[92] L'Atelier Parisien d'Urbanisme

[93] Dominique ALBA, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens*, https://www.apur.org/fr/nos-travaux/analyse-performance-thermique-logements-parisiens, consulté le 6 octobre 2020.

Figure 41.Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris avant 1800, source : Apur

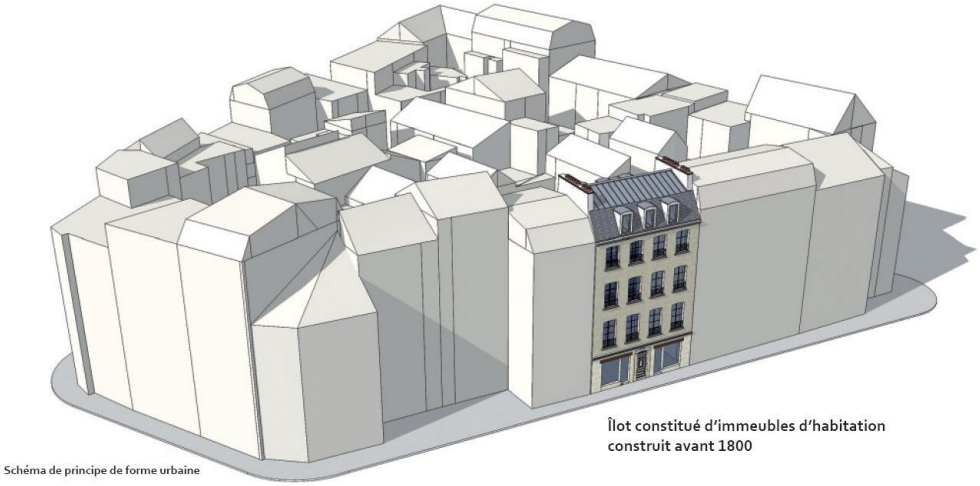


Figure 42. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construit avant 1800, modélisation D. Serero

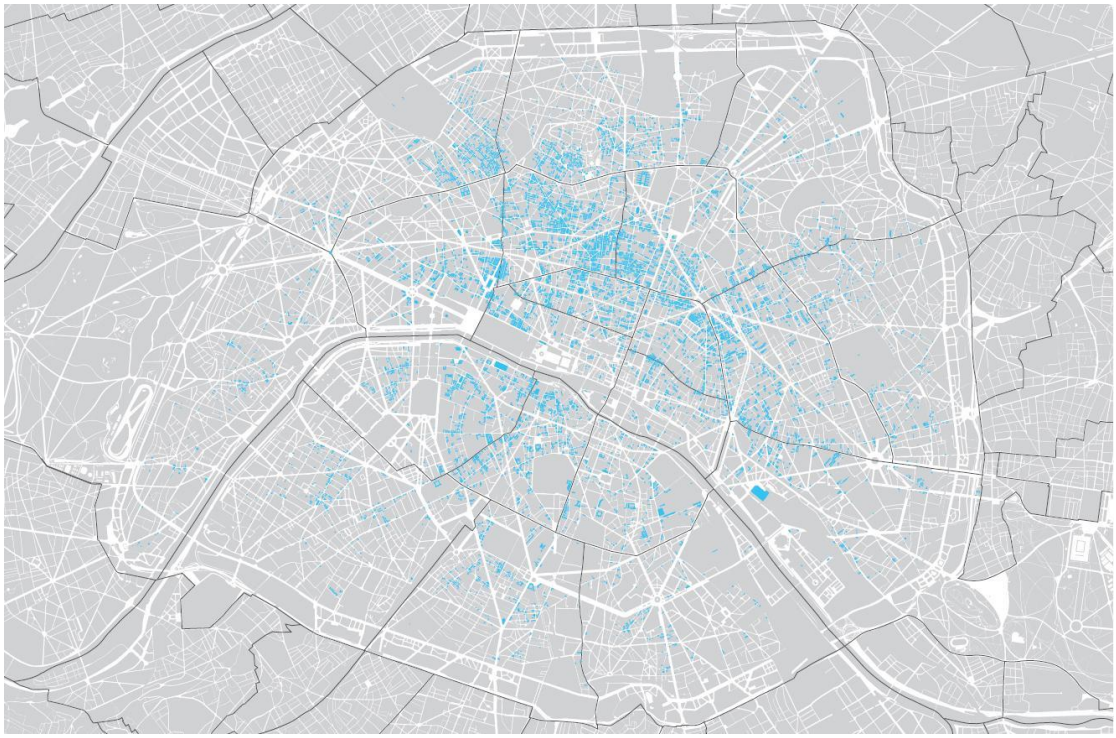
Figure 43.Immeubles construits avant 1800, rue Saint-Martin, 1er arrondissement, source : Apur

1.4.3 Entre 1801 – 1850 :

Les bâtiments de logements collectifs datant de cette période sont majoritairement situés en rive droite. (9 % des logements parisiens), On les trouve surtout dans un croissant est-ouest qui contourne le quartier du Marais et passe entre les Grands Boulevards et l'ancienne enceinte des Fermiers Généraux. C'est le cas des lotissements de la Chaussée d'Antin ou de la « nouvelle Athènes ». Ils sont également situés dans les anciens faubourgs du nord de Paris, autour des portes (quartier des Batignolles), ou bien dans quelques opérations plus ponctuelles à l'intérieur des Grands Boulevards (rue Rambuteau).

La forme urbaine héritée de la première moitié du 19eme siècle résulte principalement de nombreuses opérations de lotissement, souvent juxtaposées (Voir figure 38). Le réseau de voies présente des rues relativement larges et rectilignes, qui distribuent un parcellaire régulier. Il faut noter que depuis 1783, il est interdit d'ouvrir des rues dans Paris de moins de 10 m de large. Les îlots sont de forme géométrique et découpés en un parcellaire régulier. Les séries de parcelles relativement larges peuvent atteindre 18 mètres, en particulier dans les opérations de lotissement.

À l'échelle de l'îlot, les bâtiments forment un ensemble généralement très compact et minéral. Les volumétries sont homogènes et continues en bordure de rue, de R + 4 + C à R + 5 + C. Dans les opérations de lotissement, les bâtiments s'implantent de manière rationnelle, avec un bâtiment sur rue, un autre en fond de parcelle, et souvent des cours et courettes généralement mises en commun d'une parcelle à l'autre. L'implantation des bâtiments à l'alignement et en mitoyenneté limite les déperditions énergétiques, en multipliant les adossements. Les apports solaires pour les façades sur cour sont faibles, en particulier pour les îlots les plus densément bâtis[94](Voir figure 39).



94

Dominique ALBA, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1801 et 1850*, 2011.

Figure 44.Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1801 et 1850 (https://www.apur.org/fr)

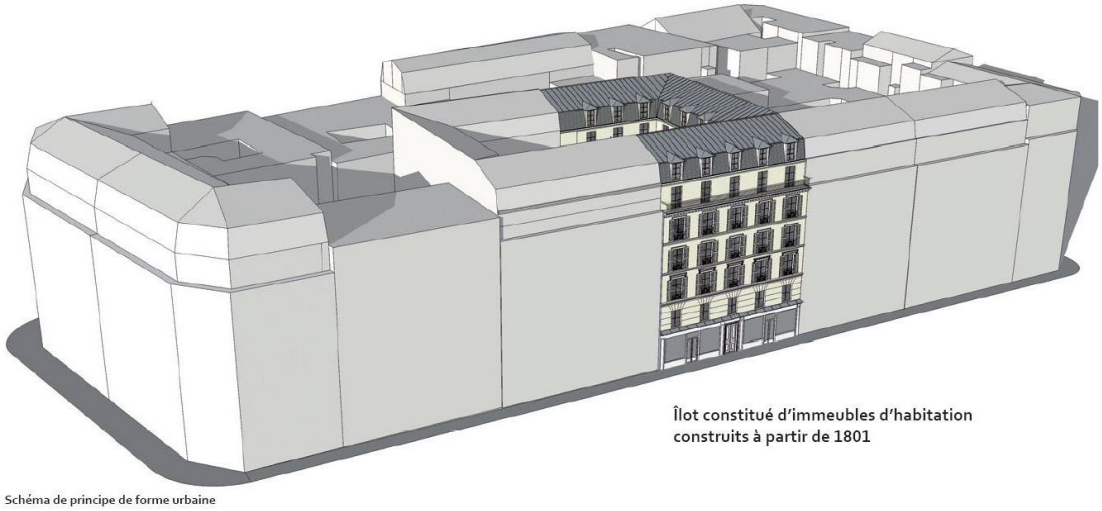


Figure 45. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construits à partir de 1801, modélisation D. Serero

Figure 46.Immeubles construits entre 1801 et 1850, rue de Trévise, Paris, 9e Arrondissement, Source : Apur

1.4.4 Entre 1851 – 1914 :

On estime aujourd'hui à 29% les logements parisiens construits entre 1851 et 1914. Les bâtiments de logements collectifs datant de cette période se retrouvent aussi bien dans les quartiers centraux que dans les secteurs périphériques de Paris, avec une forte présence dans l'ouest. Ils sont situés principalement le long des grandes avenues percées à cette époque (boulevards Sébastopol ou Saint-Michel...), autour des trois grandes gares du nord de Paris, dans les lotissements dont la construction a commencé durant la première moitié du XIX^{e} siècle (quartiers de l'ouest du parc Monceau, de l'Europe, du Champ de Mars-Invalides...) et le long des nouvelles voies principales ouvertes dans les territoires annexés (Voir figure 41).

La forme urbaine issue de la seconde moitié du XIXe siècle représente une part considérable du paysage du territoire parisien. Elle découle d'une vision globale de l'aménagement de Paris, avec un intérêt particulier apporté à l'aménagement des voies publiques.

Dans les percées comme dans les lotissements, les voies sont larges (rarement inférieures à 5 mètres) et rectilignes, et s'inscrivent dans un réseau hiérarchisé. La forme géométrique des îlots est assujettie au tracé des voies.

Le découpage parcellaire est très étudié pour offrir une occupation maximale et homogène du sol. Les parcelles sont généralement de forme régulière, avec un minimum de 5 mètres de large sur la rue. À l'échelle de l'îlot, les bâtiments forment un ensemble généralement très compact, minéral et dense. Les volumétries sont homogènes : de R+5+C pour les immeubles bâtis avant 1902 et jusqu'à R+6+2C ou +3C pour ceux édifiés après 1902, date à laquelle le règlement devient plus permissif et admet une densité de construction plus importante. Les bâtiments sont systématiquement implantés à l'alignement sur rue (Voir figures 41, 42, 43 et 44).

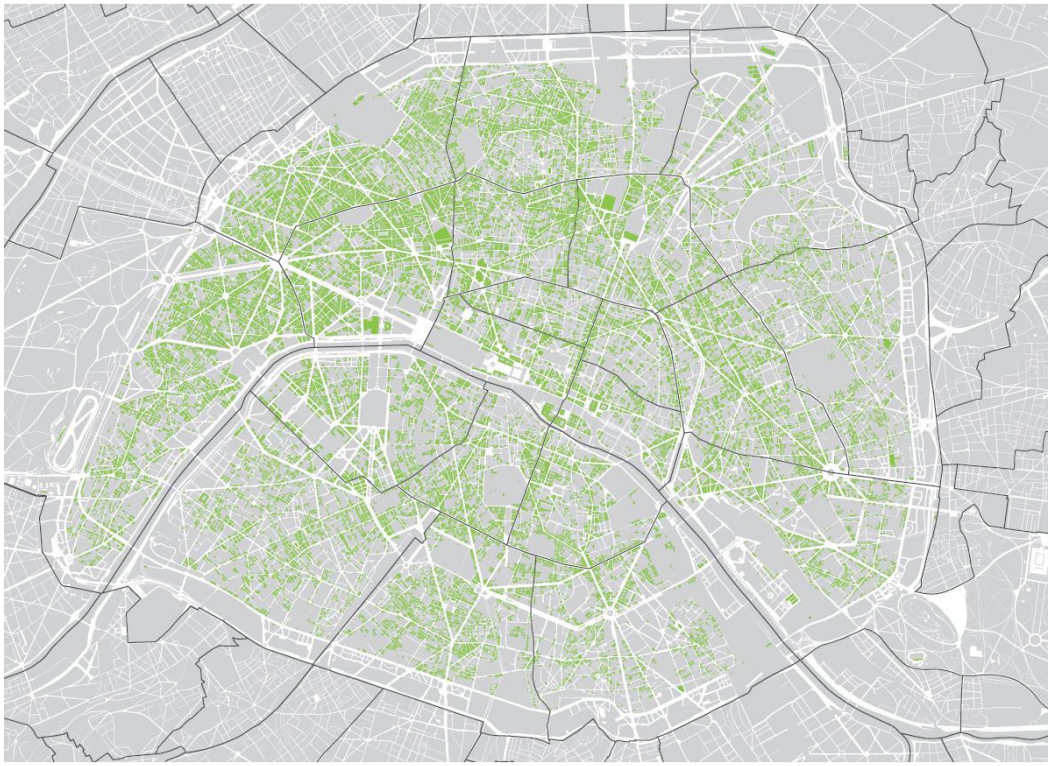


Figure 47. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1851 et 1914 [95]

[95] Dominique ALBA, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1851 et 1914*, 2011.

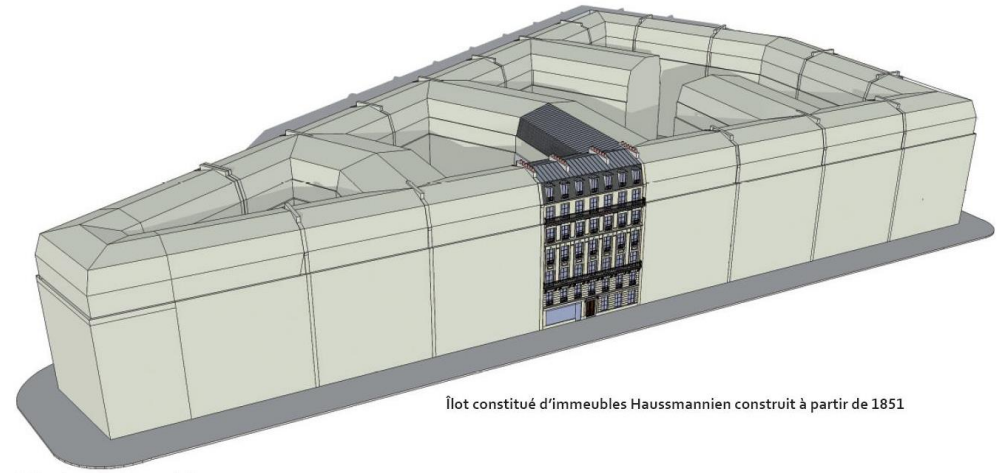


Figure 48. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construits à partir de 1851, modélisation D. Serero

Figure 49.Immeubles de rapport, construits entre 1851 et 1914, rue de Châteaudun, 9e, photo D. Serero.

Figure 50. Rue de Dunkerque et rue de Guérande, 9e arrondissement. Immeubles de rapport, opération de lotissement, Source : Geoportail.

1.4.5 Entre 1918 – 1939[96]:

Environ 17% des immeubles de logements collectifs parisiens ont été construits entre 1918 et 1939. Les bâtiments de logements collectifs datant de cette période sont relativement disséminés dans tout Paris.

Les immeubles résidentiels de l'entre-deux-guerres, accueillant des logements de standing, sont généralement situés dans les quartiers centraux. Les lotissements de maisons individuelles (Hameau Boileau dans le XVI^{ème} arrondissement) se retrouvent plutôt dans les quartiers périphériques. Enfin, les bâtiments de logements sociaux de type HBM sont présents dans les quartiers périphériques, notamment dans la zone des anciennes fortifications militaires, déclassées à partir de 1919. Cette « ceinture » de logements HBM entoure Paris, avec quelques interruptions dans le sud-ouest, dans l'ouest (porte Dauphine) et au niveau des emprises ferroviaires et industrielles de l'est et du nord.

Immeubles de type HBM : que ce soit dans le tissu existant ou le long des boulevards des Maréchaux, la construction de bâtiments de logements collectifs de type HBM a appliqué les principes hygiénistes de l'époque (garantir la ventilation et l'ensoleillement maximal des logements), avec une volonté de rompre avec la forme urbaine de la ville haussmannienne sans s'affranchir encore de la notion d'îlot, ce qui arrivera à la fin des années 50.

Ces ensembles d'habitations génèrent, entre le boulevard des Maréchaux et la « ceinture verte », un tissu urbain très bien délimité. Les îlots sont irrigués par des voies de desserte locale larges et hiérarchisées (entre 14 et 20 mètres de large), soit perpendiculaires soit en diagonal par rapport aux voies existantes. La hauteur de ces constructions atteint généralement 20 m à la corniche, découpée en cinq ou six niveaux surmontés d'une toiture en comble. Les bâtiments sont implantés perpendiculairement ou parallèlement à la voie publique, mais, dans la mesure du possible, disjoints les uns des autres. Ils respectent l'implantation classique à l'alignement sur rue, mais le front bâti est discontinu, ponctué de cours s'ouvrant sur les voies publiques.

Celles-ci étaient initialement minérales, mais ont été progressivement végétalisées et, à l'heure actuelle, peuvent constituer des squares publics. Les corps de bâtiments sont peu épais.

Dans le tissu existant, les bâtiments de logements collectifs peuvent occuper plusieurs parcelles regroupées à l'issue d'un remembrement mais elles entraînent rarement la création de nouvelles voies publiques. Lorsque les parcelles sont suffisamment grandes, elles accueillent de vastes cours intérieures. La volumétrie des immeubles et l'organisation des îlots sont semblables à celle des HBM des boulevards des maréchaux, composées de bâtiments implantés à l'alignement sur rue donnant sur des cours ouvertes sur les voies publiques dégageant ainsi de grands linéaires de façade.

Immeubles résidentiels de standing de l'entre-deux guerres : ces derniers sont présents plus ponctuellement. Ils présentent une forme urbaine plus traditionnelle (îlots compacts, bâtiments implantés systématiquement à l'alignement des voies et en mitoyenneté), malgré une volumétrie (de R + 8 à R + 9) et une largeur de façade un peu plus importantes. Quand les parcelles sont suffisamment grandes, elles sont occupées par des espaces verts de qualité[97] (Voir figures 45, 46, 47 et 48).

[96] Dominique ALBA, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1918 et 1939*, 2011.
[97]

Figure 51. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1918 et 1939 (https://www.apur.org/fr)

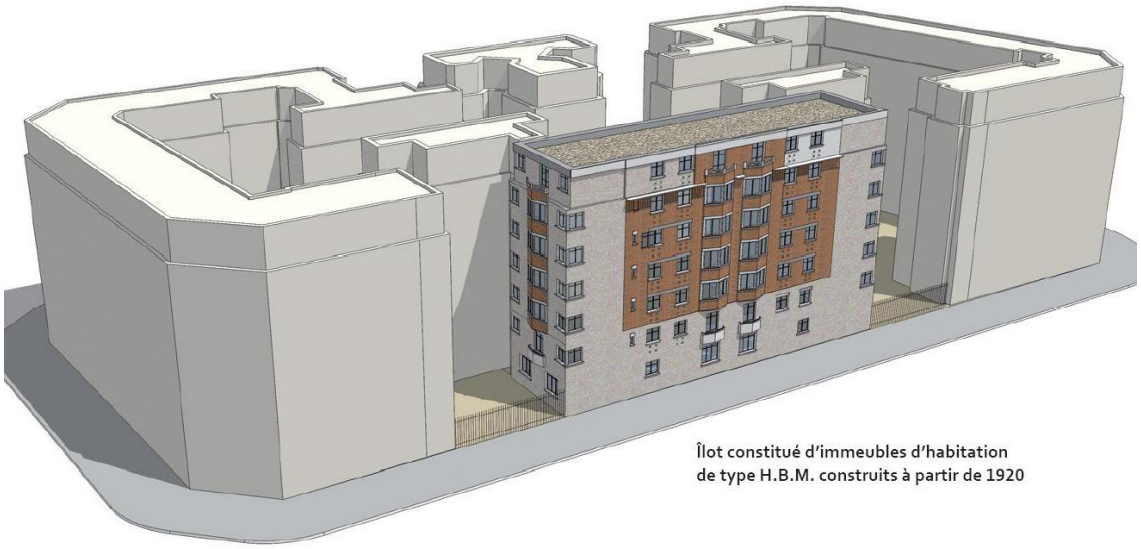


Figure 52. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construits à partir de 1920, Modélisation D.Serero

Dominique ALBA, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1851 et 1914, op. cit.*

Figure 53. Immeuble de logement type H.B.M., 1924-1930, C. Heubès architecte, avenue Simon Bolivar, 19e arrondissement, photo : D. Serero

Figure 54. Immeuble de logement type I.L.M., 1924-1926 boulevard Jourdan, 14e arrondissement. (Https://www.apur.org/fr)

1.4.6 Entre 1945 – 1974[98]:

Environ 21% des immeubles de logements collectifs parisiens ont été construits entre 1945 et 1967. Les bâtiments construits entre 1945 et 1967 sont peu nombreux dans les quartiers centraux de Paris, à l'exception des grands équipements (campus universitaire de Jussieu, siège de l'UNESCO). Les bâtiments de logements collectifs sont à l'inverse largement disséminés dans l'ensemble des quartiers périphériques, en particulier dans le sud et l'est, et à l'exception du nord-ouest. De « grands ensembles » sont alors construits à l'occasion du démarrage de plusieurs opérations emblématiques (« Italie-XIII » dans le 13e arrondissement, « Plaisance » dans le 14e arrondissement, le secteur « Front de Seine » dans le 14e arrondissement) et s'accompagnent de la rénovation de certains îlots insalubres. Dans les quartiers centraux, les opérations de logements sont plus ponctuelles. On trouve également de nouvelles opérations qui démarrent à partir de 1968, par exemple dans le secteur Hauts de Belleville/Place des fêtes (XIXe arrondissement) ainsi que dans des opérations plus ponctuelles (porte de la Chapelle).

Jusqu'au début des années 1960, les bâtiments de logements collectifs construits après la seconde guerre mondiale génèrent une forme urbaine qui s'inscrit dans la continuité de celle de la période précédente : construction à l'alignement sur rue, front bâti discontinu avec des cours ouvertes sur rue, volumétrie faible (de R + 5 à R + 6).

En revanche, l'application par anticipation du PUD, à partir de 1962, favorise la rupture avec la forme urbaine traditionnelle. Le bâtiment n'est plus tributaire de son rapport à la voie, mais à d'autres éléments plus fonctionnels (orientation, prospect...). Dans les petites parcelles, les bâtiments sont systématiquement implantés en retrait d'alignement. Dans les grandes parcelles, ils sont implantés selon des plans-masses libres.

Les plans masses des îlots sont souvent ouverts, avec des petites barres de R + 5 à R + 7 ou des tours de R + 10 à R + 12. L'élévation progressive des hauteurs des bâtiments permet de dégager, au pied des immeubles, des espaces libres souvent très plantés[99] (Voir figures 49, 50, 51 et 52).

[98] Dominique ALBA, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1945 et 1974*, 2011.
[99] *Ibid.*

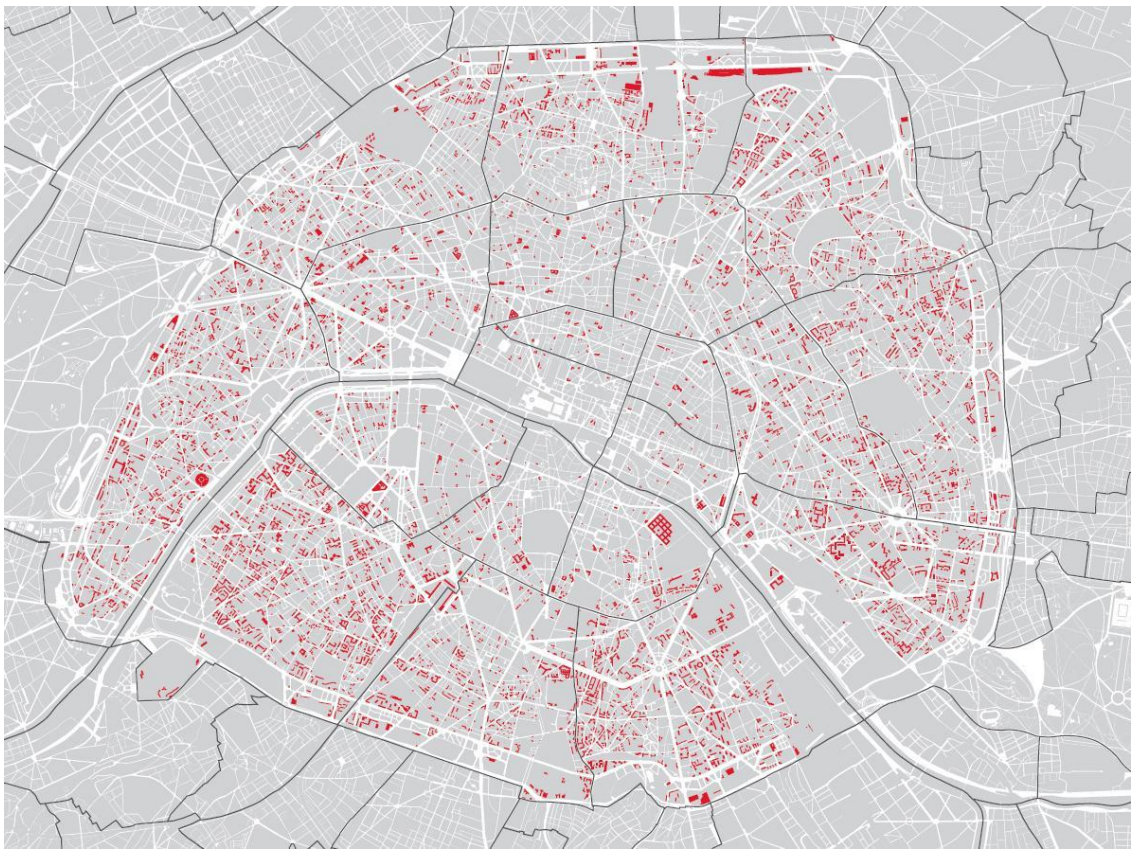


Figure 55. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1945 et 1974. (Https://www.apur.org/fr)

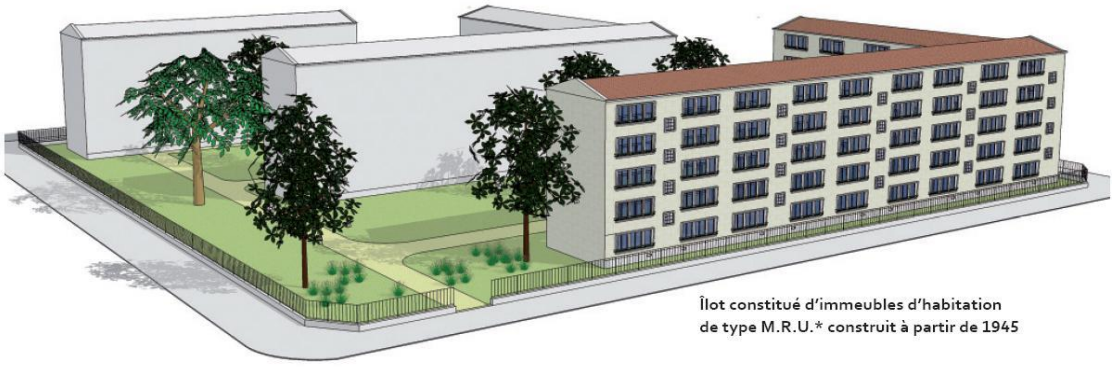


Figure 56. Îlot constitué d'immeubles d'habitation de type M.R.U. construit à partir de 1945, Modélisation D. Serero*

Figure 57. Immeuble de logement, rue Dunois et boulevard Vincent Auriol, XIIIe arrondissement.

Figure 58. Place des Fêtes (XIXe arrondissement) : grand ensemble en cours de construction, effacement de la trame urbaine existante, 1971. (Https://www.apur.org/fr)

1.4.7 Entre 1975 – 2000[100]:

Environ 16 % des immeubles de logements collectifs parisiens ont été construits entre 1975 et 2000. Les bâtiments de logements collectifs datant de cette période sont majoritairement situés :

[100] Dominique ALBA, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1975 et 2000*, 2011.

• soit de façon concentrée dans les grandes opérations (Front de Seine, place des Fêtes) ou les grandes ZAC (les Amandiers dans le XXe arrondissement, Guilleminot-Vercingétorix dans le XIV[e] arrondissement, Citroën-Cévennes dans le XVe arrondissement, Bercy dans le XIIe arrondissement, Manin-Jaurès dans le XIXe arrondissement),

• soit disséminés dans des opérations de plus petite ampleur dans les arrondissements périphériques formant un large croissant est et sud (dans le cadre de la poursuite du « plan-programme de l'Est »).

Dans le centre, leur présence se limite à quelques opérations emblématiques (quartier de l'Horloge). Enfin, ils sont peu présents dans la partie ouest de Paris. Cette période marque la fin des tours et des constructions verticales à Paris. Ce retour à « l'architecture urbaine » en continuité avec le tissu existant se caractérise par l'implantation systématique des bâtiments à l'alignement et en mitoyenneté sur rue, ce qui multiplie les adossements et limite les déperditions énergétiques. Les îlots sont généralement fermés. Dans la profondeur des terrains, le plus souvent les bâtiments ne s'implantent pas en limite de parcelle, ce qui permet de dégager des espaces libres latéraux mis en commun d'une parcelle à l'autre.

Certaines ZAC importantes (Reuilly ou Bercy, dans le XIIe arrondissement...) concernent plusieurs îlots. Les programmes donnent lieu à des nouveaux quartiers associant équipements, création d'espaces publics et construction de logements.

La volumétrie des bâtiments varie de R + 4 à R + 8. Dans les grandes opérations d'aménagement, une attention particulière est portée à l'unité paysagère de l'ensemble des projets d'une même opération. Cette recherche d'homogénéité s'articule avec des écritures architecturales variées à l'échelle des îlots ou des bâtiments[101] (Voir figures 53, 54, 55 et 56).

Figure 59. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1975 et 2000 (https://www.apur.org/fr)

[101] *Ibid.*

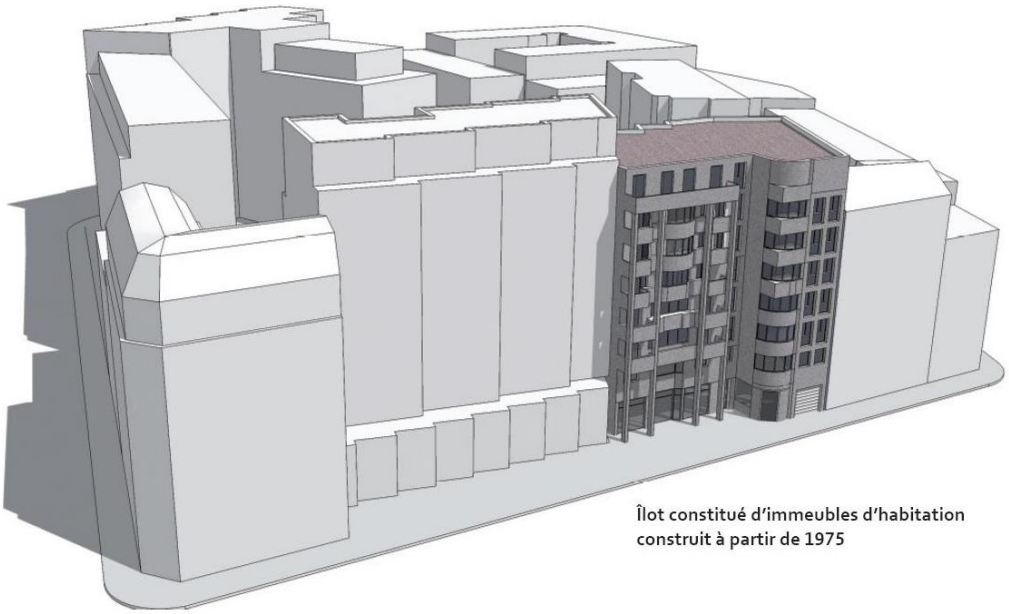


Figure 60. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construit à partir de 1975

Figure 61. Immeuble de logement, 1982, Labro et Orzoni architectes, rue des Écluses-Saint-Martin, 10e arrondissement. (https://www.apur.org/fr)

Figure 62. ZAC Citroën-Cévennes , XVe arrondissement,1989-2006, Source : aménageur SEMEA 15, mission aérienne 2004.

1.4.8 Synthèse des typologies urbaines identifiées

La ville de Paris, de par sa longue histoire constitue un patchwork de typologies urbaines riches et variées (Voir figure 57).

Figure 63. Cartographie des immeubles de Paris basée sur leur typologie et date de construction (https://www.apur.org/fr)

Elles sont caractérisées par :

- Des ilôts homogènes dont le profil urbain est cohérent et homogène

- Des îlots plus fragmentés avec notamment des changements forts d'échelle, de hauteur et d'ouverture de bâtiment qui offre des différences de volumes prononcées dans la ville.

Nous étudierions dans la Partie 4, l'impact que ces typologies sur l'écoulement d'air en site urbain. Leur hauteur, leur profil et leur implantation par rapport à des éléments masquants ou guidants, de la ville ou de ces alentours, constituent des dispositifs d'augmentation ou de ralentissement des mouvements d'air.

Ces différentes typologies de construction en site urbain, la consommation d'énergie est grandement dépendante du facteur d'isolation thermique et de ventilation du logement, ainsi que des usages qui en sont fait. Mais dans le contexte des villes anciennes comme Paris, les performances thermiques sont souvent basses. Pour atteindre l'objectif d'une émission zéro carbone, et celui d'un logement passif, nous avons besoin d'augmenter la performance énergétique, en corrigeant les problèmes rencontrés sur les toitures, les murs extérieurs, les fenêtres en contact direct avec l'extérieur.

Figure 64. Puissance de chauffage nécessaire par unité de surface d'un logement, source Ademe

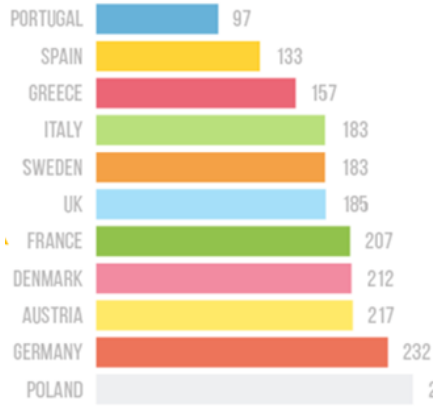


Figure 65. Puissance de chauffage nécessaire par unité de surface d'un logement en Europe en kWh/m2/ , Source Ademe

Les 2 schémas suivants (Figures 58 et 59) montrent la consommation d'énergie moyenne d'un logement, et la comparaison entre la consommation par unité d'espace entre les différents pays européens. La France arrive ici en 7ème position.

1.5 Conclusion

A l'issue de cette première partie, nous avons vu que, dérivée des formes anciennes de moulins, l'éolienne moderne a émergé au cours de la période du XXème siècle sous l'impulsion des recherches alternatives de production d'énergie. Mais ce développement s'est fait dans une course à la grande échelle et avec des implantations en sites isolés, défigurant parfois notre patrimoine paysager et générant de nombreuses formes de pollutions.

Puis nous avons vu comment le paradigme de l'internet de l'énergie ou de la smart-grid permet d'envisager un changement dans la production et la consommation d'énergie. Il permet un raccordement entre eux de millions d'utilisateurs facilitant la gestion de l'intermittence et des variations de quantité d'énergie produite.

Nous avons ensuite étudié les typologies des bâtiments et îlots urbains dans une ville comme Paris. Ces typologies, malgré la volonté des villes de vouloir unifier leur profil, constituent toujours un « collage » d'architectures différentes, qui se sont adaptées aux usages modernes et aux nouveaux modes de construction.

Pourrions-nous rapprocher les lieux de production d'énergie des lieux de consommation? Nos bâtiments peuvent-ils devenir des supports de capteur d'énergie, et intégrer des micro-éoliennes groupées plutôt que quelques grandes éoliennes ?

Nous étudierons dans la Partie 2 la manière de cartographier les vents, et la méthode que nous avons proposé pour faire des relevés sur des bâtiments.

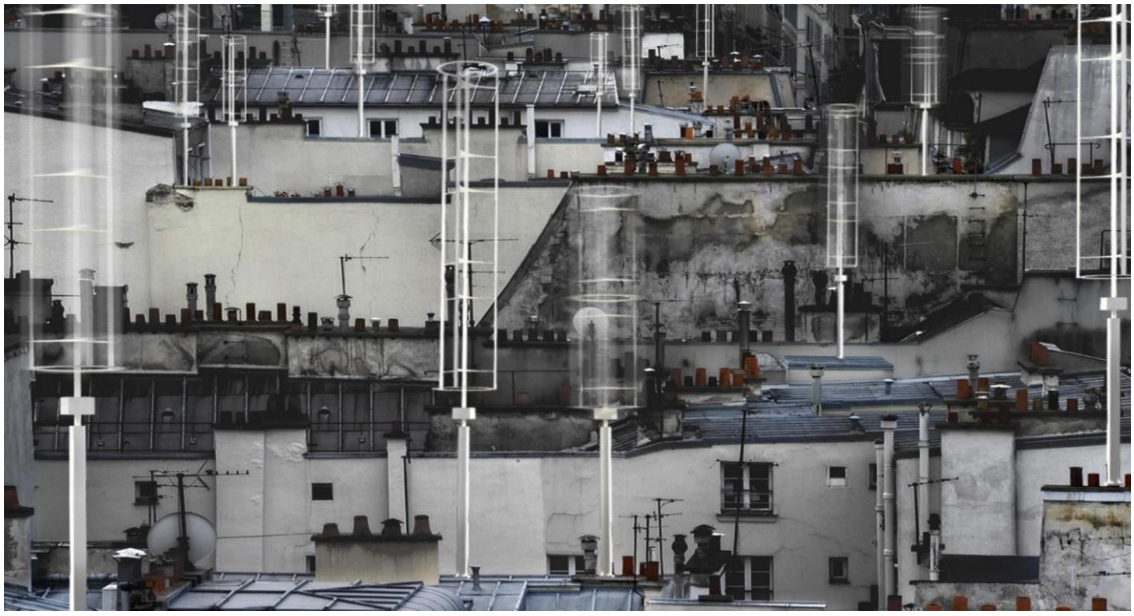
Dans la Partie 3, nous rappellerons les grands principes de la mécanique des fluides et présenterons les modes d'analyse et de simulation du comportement du vent autour des bâtiments.

Dans la Partie 4, nous réaliserons un grand nombre de simulations numériques de ces écoulements sur les bâtiments afin de comprendre le potentiel de l'architecture et des villes à amplifier la force du vent.

Dans la Partie 5, nous présenterons des modes d'intégration architectural de dispositifs éoliens, ainsi qu'un outil d'aide à la conception pour les architectes, afin de faciliter la conception de ces dispositifs en phase esquisse du projet d'architecture.

PARTIE 2

METHODOLOGIE D'ANALYSE ET DE RELEVES DE VENT EN SITE URBAIN



Contenu :

- Energie renouvelable éolien et l'internet de l'énergie
- Cartographie des vents et analyse des potentiels géographiques
- Méthode de relevé de données anémométriques en site urbain
- Typologies de dispositifs éoliens et analyse de leur potentiels et contraintes (axe vertical, axe horizontal, vibratoire, …)

PARTIE 2

2.0 INTRODUCTION 83

2.1 L'INTERNET DE L'ENERGIE 51

2.1.1 Vers l'internet de l'énergie 51

2.1.2 Le développement exponentiel de l'internet de l'énergie (IOE) 54

2.1.3 Exemple de IoE 55

2.1.4 L'impact de l'internet de l'énergie sur le lissage production/consommation 55

2.1.5 Vers la « SMART CITY » 56

2.1.6 Des Investissements croissants dans les technologies de la ville intelligente 58

2.1.7 Transformer Singapour grâce à la technologie 59

2.1.8 Projets nationaux stratégiques 60

2.2 CARTOGRAPHIE DES VENTS ET ANALYSE DES POTENTIELS GEOGRAPHIQUES 85

2.2.1 Cartographies modernes en temps réel ..... **Error! Bookmark not defined.**

2.2.2 Visualisation et cartographie des vents 90

2.2.3 Obtenir les données de vent 87

2.2.4 Déplacement de particules sur le GPU 93

2.2.5 Mise en place d'une méthode pour mesurer les vents urbains 93

2.3 METHODOLOGIE DE RELEVE DE DONNEES ANEMOMETRIQUES EN SITE URBAIN 94

2.3.1 Analyse du comportement du vent en milieu urbain 94

- Description des anémomètres connectés Netatmo 94

2.3.2 Cartographie des stations météo connectées à Paris 97

2.3.3 Carte des anémomètres de mesures de vent 97

2.3.4 Présentation des sites d'étude 98

2.3.5 Méthode d'installation d'anémomètres connectés sur exemple d'immeuble de logements haussmannien 136 avenue Parmentier, Paris XI^{ème} 99

2.3.6 Relevés anémométriques d'une maison en région Parisienne (Arcueil 94) 102

2.3.7 Relevés anémométriques sur un bâtiment-ilot urbain : l'Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine (75013) 105

2.4 ANALYSE COMPARATIVE DES DISPOSITIFS EOLIENS 107

2.4.1 Type d'intégration des dispositifs aux bâtiments et façades 107

2.4.2 Profilage du dispositif d'augmentation de la vitesse du vent autour d'un bâtiment 109

2.4.3 Typologie de micro-turbines à axe vertical mis en œuvre dans la recherche 110

2.5 CONCLUSION 113

2.0 INTRODUCTION

Comment mesurer les vitesses de vent sur un territoire ou en périphérie d'un bâtiment ? Une source d'énergie locale peut-elle être distribuée et partager localement ?

Cette partie présente l'état d'avancement des méthodes d'analyse et de cartographie des vents sur un territoire ainsi que les recherches bibliographiques et techniques qui ont nourri cette recherche. De par la dimension extrêmement variable et fluctuante du vent, beaucoup de zone géographique, et en particulier les villes ne font pas l'objet de relevés précis ou de cartes synthétiques de vents. Les sciences du climat, les relevés météo et les simulations de modèles météorologiques permettent cependant d'extrapoler et de modéliser le comportement global des vents.

Afin d'établir des informations précises pour notre étude, nous avons utilisé des anémomètres à ultrasons connectés qui ont été implantés sur 3 sites d'étude. Les données sur les vents, fournies en continu, à chacun de ces points sont ensuite comparées avec les données de la soufflerie numérique que nous avons paramétrée.

De cette manière, nous pouvons catégoriser les différents types de vent en zone urbaine. Ces éléments, et en particulier l'identification du spectre des vents minimum et maximum, permettent de définir le choix et la performance des dispositifs de captation d'énergie. Le mode de fixation en toiture ou en façade du bâtiment, le type de vent, l'altimétrie du dispositif par rapport aux niveaux des toitures, les nuisances potentielles alentours. Nous avons aussi mis en relation de ces informations avec des spécifications techniques d'éoliennes, de leur prix et de leur performance énergétique. (Voir Annexe 1). Ceci définit les caractéristiques d'éoliennes pour maximiser leur performance en site urbain et dans un régime de vent turbulent.

Cette méthode permet précisément d'étalonner la simulation à partir des relevés de points précis et réels sur site, puis de développer le modèle volumétrique complet du comportement du vent sur une zone de toiture, ou un îlot urbain dans son intégralité.

Dans un premier temps, nous présenterons un aperçu du rapport énergie produit/énergie consommée à large échelle, en comparaison avec les autres pays.

Puis, il nous a semblé important dans le cadre de cette recherche d'introduire la notion *d'internet de l'énergie*, qui met en place un changement de paradigme dans la collecte et la distribution d'énergie. La production intermittente de sources d'énergie peut être partagé par un réseau de pair à pair, sans besoin de réseaux d'énergie centralisés. Cette technologie émergente est basée sur le principe de la Smart city, qui se définit comme un ensemble de systèmes et d'objets interconnectés les uns aux autres. Ce réseau améliore la résilience des villes et leur capacité à s'adapter à des changements brusques ou inattendus.

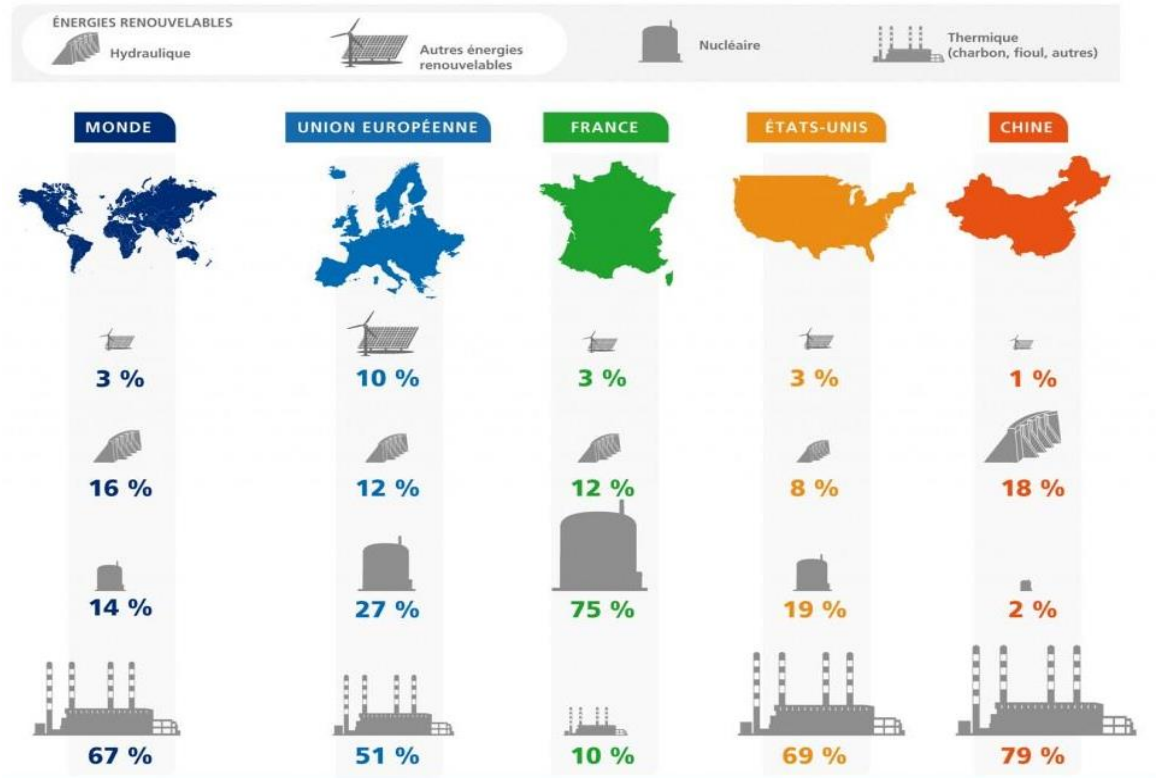


Figure 66. Synthèse de la production d'électricité dans le monde (source : EDF/IEA 2013)

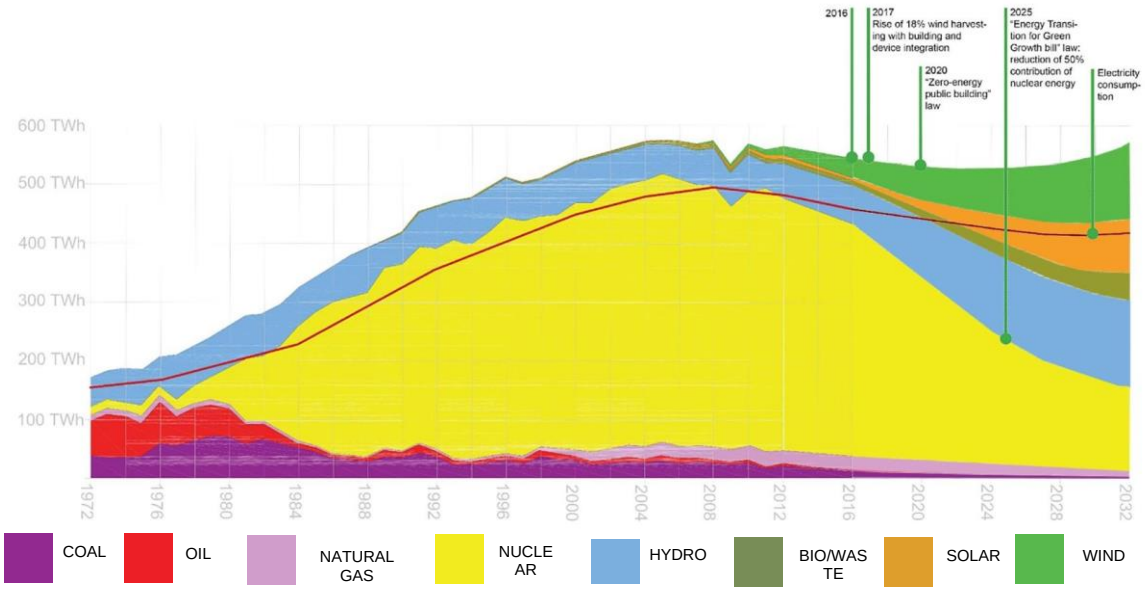


Figure 67. Sources de génération électrique en France et projection jusqu'à 2050 (source : OECD/IEA 2014)

La figure 60 montre la quantité d'énergie produite par type de source en France. Dans la figure 61, nous avons l'évolution des sources de production de 1972 à 2016 avec la projection de l'estimation de la production d'énergie par secteur basé sur les décisions gouvernementales, de 2018 à 2032. Nous avons aussi sur le schéma des annotations qui précisent le plan de réduction des émissions de carbone et les objectifs de réduction d'énergie non renouvelable utilisé pour la production d'électricité. Nous notons que la France est à 75% dépendante de l'énergie nucléaire dans son bilan global, et que les sources de production faisant appel aux énergies renouvelables sont tout à fait marginales (de l'ordre de 3%), alors que plusieurs pays de la Communauté Européenne ont très largement entamé leur transition énergétique.

Quels sont les leviers, que nous pouvons activer afin d'accélérer cette transformation ? La mise en place de dispositifs de capture d'énergie sur des bâtiments-supports, ne permettrait-elle pas de rapprocher les lieux de production d'énergie des lieux de consommation ?

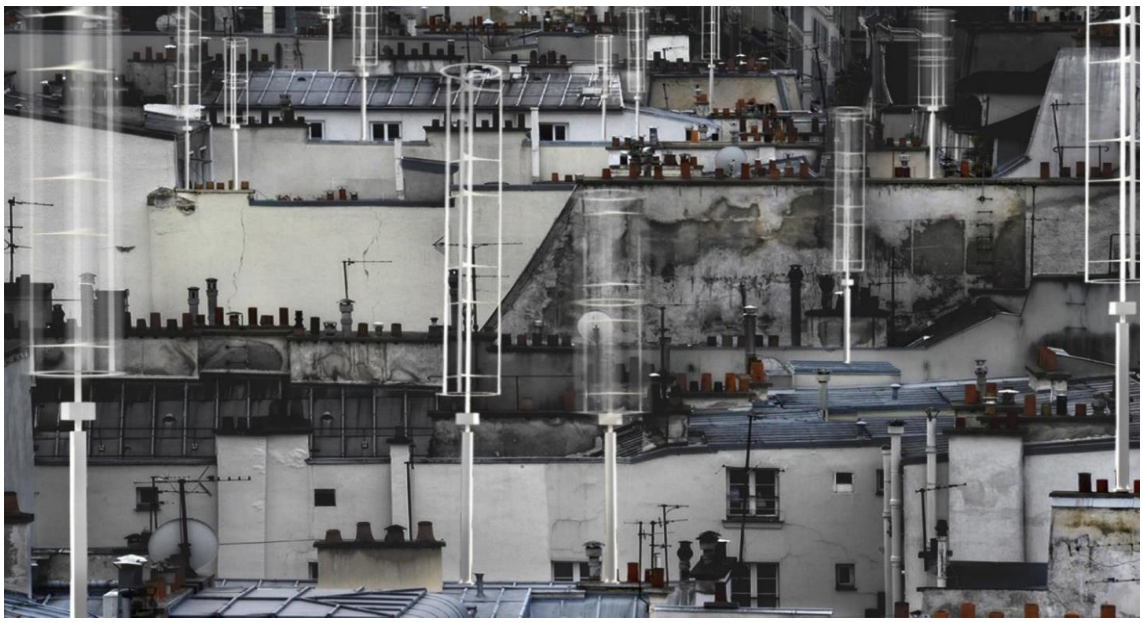


Figure 68. Visualisation d'une réappropriation possible des toits parisiens avec des micro-générateurs, Photomontage : D. Serero

Afin de comparer l'énergie produite par la ville et l'énergie consommée, nous pourrions comparer la surface totale des toitures parisiennes exposées au vent et le rendement possible d'énergie éolienne (Voir calcul réalisé le chapitre 5.4). Cette estimation nous montre qu'en greffant des dispositifs de captation d'énergie sur un bâtiment sur 4 d'une ville comme Paris permettrait de produire l'énergie consommée par toute cette ville.

2.1 CARTOGRAPHIE DES VENTS ET ANALYSE DES POTENTIELS GEOGRAPHIQUES

La carte figure 70 est un exemple exceptionnellement rare de l'une des plus anciennes et des plus significatives cartes aérographiques ou rose des vents apparus au XVII^{ème} siècle. Cette carte inhabituelle représente un point de transition dans la perception de la direction ou, plus précisément, la transition de la rose des vents à la carte des vents. Les premiers marins en Méditerranée ont défini la direction par les noms des différents vents et des points d'où ils ont

soufflé. Cette idée tire ses racines de la Grèce antique. Homère identifia quatre vents cardinaux, mais à mesure que la navigation et la cartographie se développaient, de plus en plus s'ajoutaient. Ce graphique représente trente-deux vents nommés et une multitude de systèmes de vents différents. Chacun des vents est identifié par plusieurs noms différents en grec, latin, français et néerlandais.

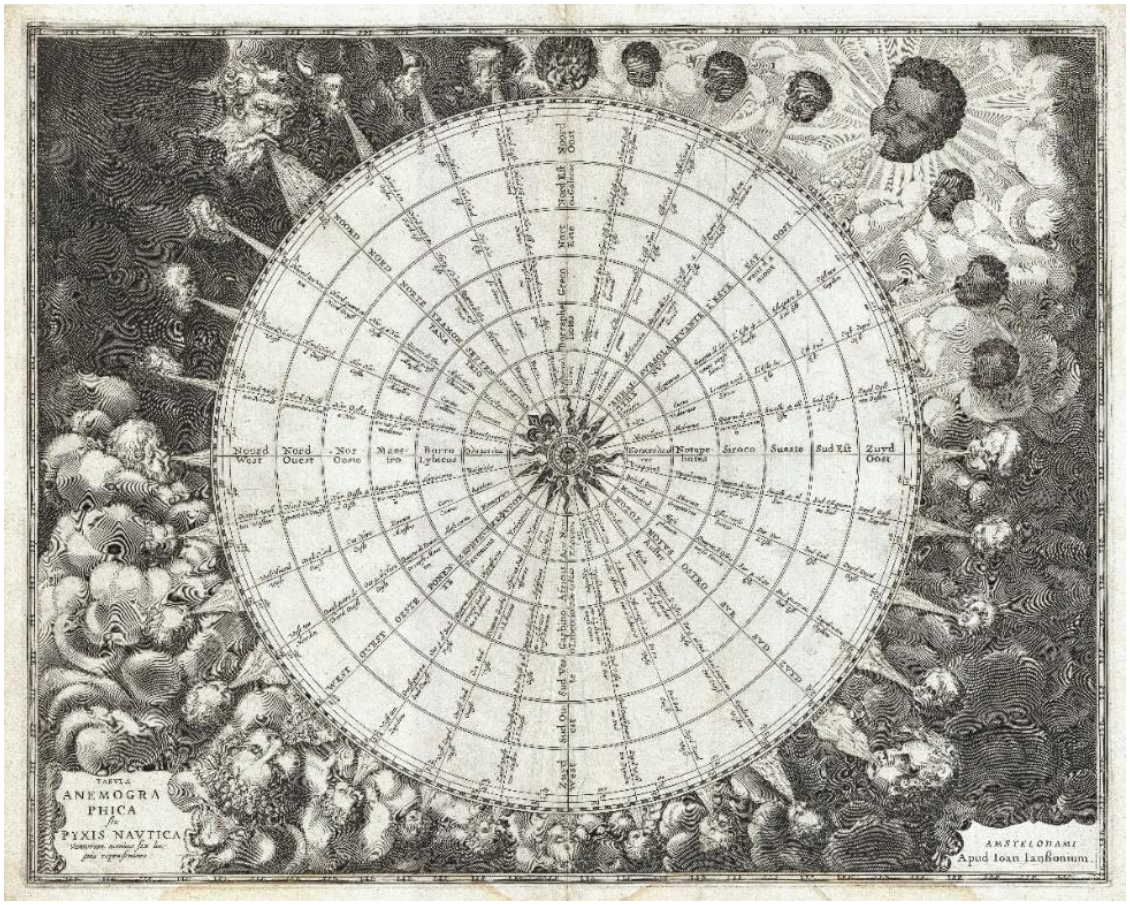


Figure 69 . Cette carte des vents a été publiée en 1650 dans l'Atlas Maritime, ou le volume 5 de l'Atlantis Majoris, de Jansonnius, source : Geographicus.com

Dans les zones entourant la sphère, chaque vent est personnifié par une figure portant les caractéristiques raciales associées à la région ou à la direction représentée. Le quadrant supérieur gauche, représentant le nord, représente des Allemands barbus ou des Scandinaves. La partie supérieure droite, représentant l'est, montre des visages à la peau sombre et sans barbe. Les personnages imberbes et à la peau pâle en bas à gauche et à droite, représentant l'ouest et le sud, sont moins distinguables, mais peuvent être destinés à représenter des Américains autochtones et des Grecs. Les cartes anémométriques, comme celle-ci, étaient des objets fonctionnels et des outils de référence précieux.

Les premiers navigateurs, se référant aux directions comme des vents, pourraient naviguer par le vent du nord. C'était particulièrement pratique lorsque les alizés dictaient le commerce océanique. Un vent chaud du sud, par exemple pourrait suggérer que certains itinéraires, fermés pour une partie de l'année, sont maintenant ouverts. Un navigateur aurait utilisé ce tableau pour comparer différents noms pour les directions. Ainsi, il utilise peut-être une carte réalisée en Grèce qui identifie les vents sous le nom de dieux grecs, mais qui a lui-même été entraîné à utiliser une nomenclature différente, par exemple catalane ou anglaise.

Avec cette carte, il pouvait comprendre à quoi faisaient référence différents journaux de navigation et carnets de navigation. Même si les cartes marines existaient dans les années 1600, la navigation s'effectuait principalement à l'aide de « Pilot Books », qui demandaient à ce type de suivre le vent du sud pendant 3 jours avant de tourner avec le vent de l'est, etc. Cette carte a été publiée sous la planche 1 de 1650 Atlas Maritimus de Jansonnius ou dans le volume 5 de son Atlantis Majoris[102].

2.1.1 Obtenir des données du vent en temps réel

Plusieurs jeux de données sur le vent existent à l'échelle locale ou globale. Elles sont consolidées soit par des organismes météorologiques nationaux, soit par des réseaux locaux, ou encore par des passionnés du vent. De plus en plus de dispositifs permettent un accès en temps réel à ces données ou à des archives.

Ces données sont dans la grande majorité des cas extrapolées à partir de mesures faites ponctuellement au niveau du sol ou dans l'atmosphère. Des grandes surfaces de territoire sont ainsi globalement décrite . Cependant, dans le cadre de notre recherche nous avons besoin de données en site urbain à un niveau de granularité plus fin. Un partie de ce travail a visé à créer des données encore plus locales, avec le minimum d'extrapolation de manière à obtenir des informations qui prenne en compte les spécificités urbaines et architecturales du contexte de chaque étude. Nous présentons ici quelques un de ces jeux de données.

Toutes les 6 heures, le **National Weather Service** américain publie des données météorologiques pour l'ensemble du globe, connues sous le nom de GFS, sous la forme d'une grille de latitude / longitude avec les valeurs associées (y compris la vitesse du vent). Il est codé dans un format binaire spécial appelé **GRIB**, qui peut être analysé en **JSON** lisible par l'homme avec un ensemble spécial d'outils (Voir figure 78).

[102] *1650 Jansson Wind Rose, Anemographic Chart, or Map of the Winds*, https://www.geographicus.com/P/AntiqueMap/Anemographica-jannson-1650, consulté le 15 juillet 2020.

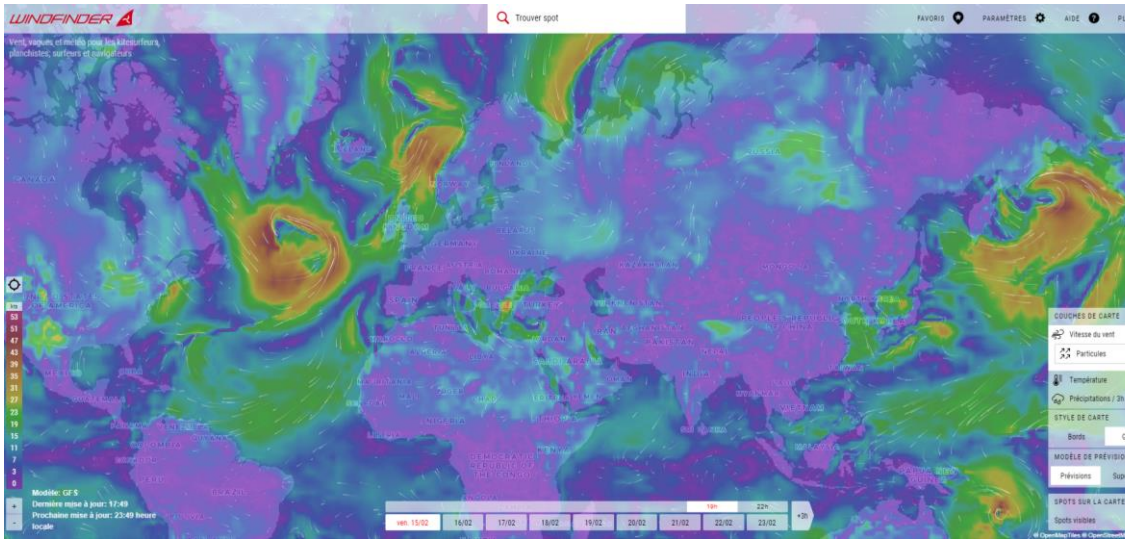


Figure 70. Le site internet Windfinder.com présente une cartographie en temps réel de la Vitesse du vent sur l'entièreté du globe

Windfinder propose des prévisions de vent et des prévisions météos pour plus de 45000 endroits (« spots ») à travers le monde, lesquelles sont pertinentes pour les kite surfeurs, les windsurfers, les surfeurs, les marins et les parapentistes. La plupart de ces endroits sont des sites de pratique de ces sports, ainsi que des marinas ou des sites de décollage ou d'atterrissage. Ils proposent un réseau global unique de stations météo. La vitesse actuelle et la direction du vent, la température et la pression de l'air, ainsi que d'autres valeurs de ces sites peuvent être visualisées en temps réel[103](Voir figure 74).

Figure 71. Le site Windfinder est multiplateforme, Source : windfinder.com

Figure 72. Le site est dédié à la visualisation et la prédiction de vent en temps réel pour les afficionados des sports de glisse

[103] WINDFINDER.COM, *Windfinder - wind, wave & weather reports, forecasts & statistics worldwide*, https://www.windfinder.com, consulté le 15 juillet 2020.

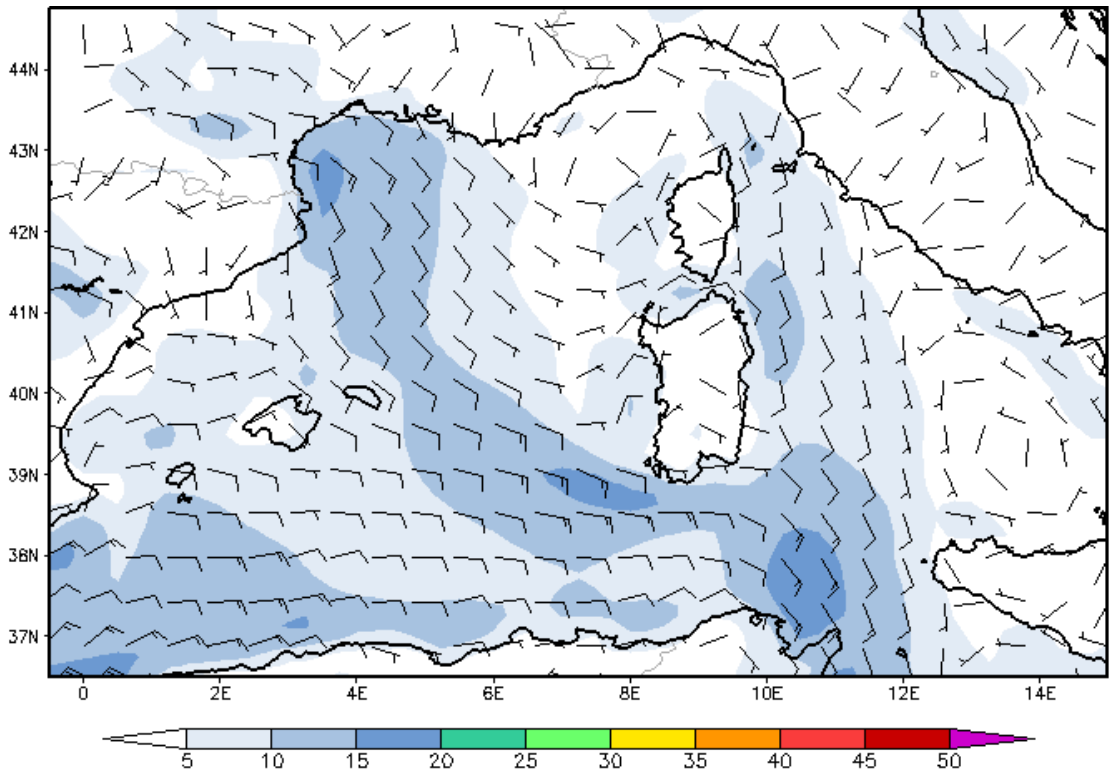


Figure 73. Vent de la surface par 18 heures en Février 18, 2019, Source : Météo France

Un réseau de données EPW (EnergyPlus Weather Data) existe et peut être utilisé par les architectes et ingénieurs. Ces données sont faiblement existantes en France et doivent être partagées d'avantage ; D'autre part, les fichiers EPW utilisés par Ladybug ou Dynamo contiennent des informations de vents extrapolées à partir de relevés sur des points de références dont la liste est donnée. Nos tentatives d'imports de fichiers EPW dans Dynamo ont montré beaucoup d'instabilité.

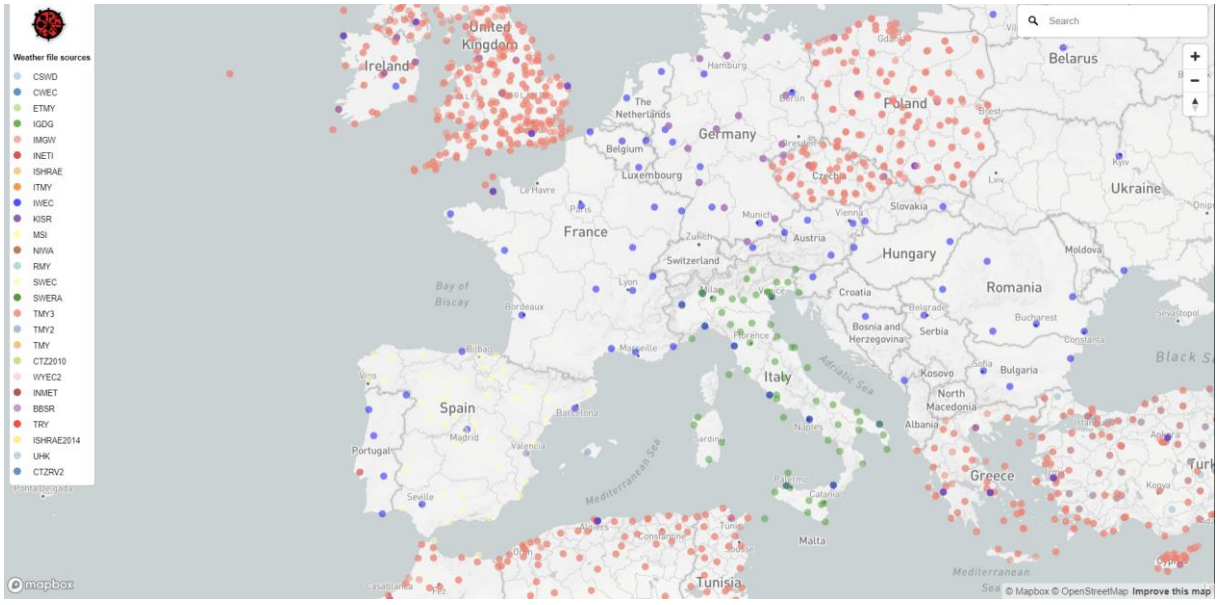


Figure 74 Cartes des données climatiques disponibles dans Ladybug

Il faut noter la difficulté d'utiliser ces informations hyperlocales au vu des directions et forces de vent très différentes relevés qui montre une trop large variation des directions et puissances de vent en site urbain.

Nous avons précisé les points de relevés de ces données qui sont très loin des zones urbaines denses Ce point est discuté au **2.3.4 Présentation des sites d'études** et évoque le besoin de créer son propre jeu de données afin d'analyser des spécificités locales.

Les relevés réalisées sur ces bâtiments ont été comparés aux stations météo de référence parisiennes à savoir :

- L'aéroport Charles de Gaulle (CDG)
- L'aéroport d'Orly
- La station météo du Parc Montsouris
- La tour Zamansky de l'Université Paris Jussieu

Nous présenterons au chapitre 2.2.1 un réseau de stations météo amateur remarquable pour obtenir des relevés précis des vents autour des bâtiments fonctionnant en wifi à partir d'anémomètres connectés.

2.1.2 Visualisation et cartographie des vents

Il existe de nombreux exemples de visualisation de l'énergie éolienne en ligne, mais un projet qui a fait référence dans ce domaine est **earth.nullschool.net**, un projet créé et piloté par Cameron Beccario (Voir figure 75). Ce n'est pas un logiciel ouvert, mais une ancienne version open source sur laquelle la plupart des autres implémentations ont basé leur code. Esri Wind-JS est une dérivation open source intéressante. Les services météorologiques populaires qui utilisent cette technique incluent Windy et VentuSky (Voir figure 76).

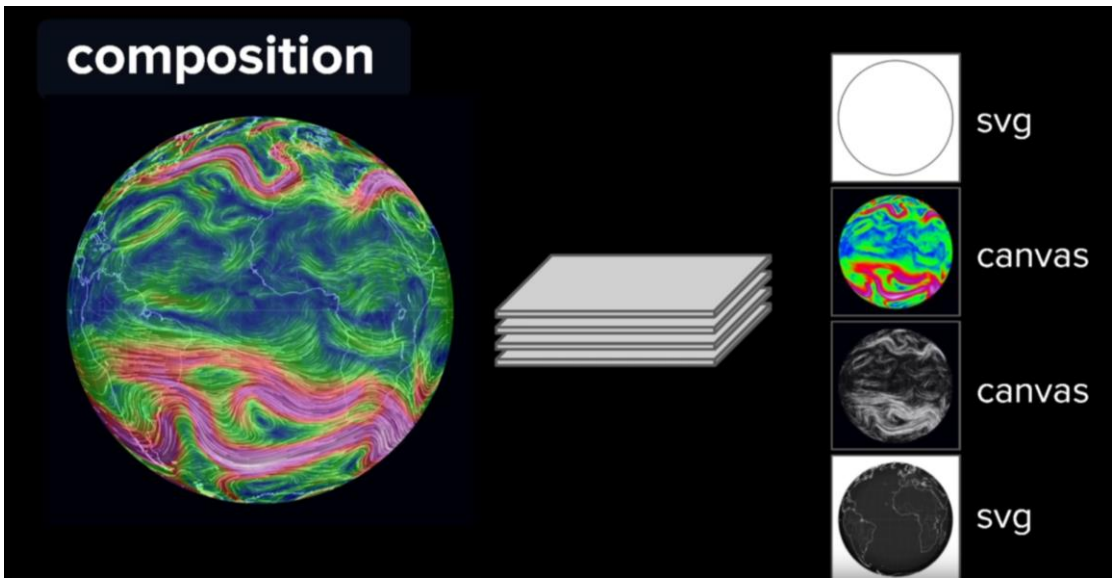


Figure 75.Extraction des couches constituées par les données météo, les supports de projection d'une cartographie en temps réel

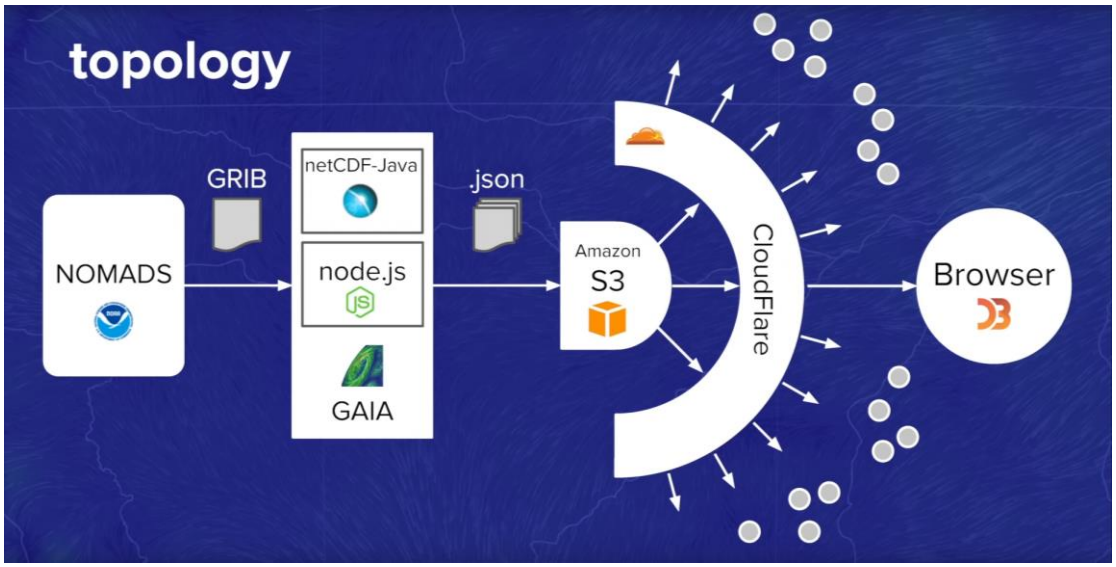


Figure 76. Modèle de liaison des données entre la cartographie des vents et les données satellites.

En règle générale, une telle visualisation dans un navigateur internet repose sur l'API 2D Canvas et fonctionne comme suit :

1. Génération d'un tableau de positions de particules aléatoires à l'écran et dessins des particules.

2. Pour chaque particule, extraire les données de vent pour obtenir la vitesse de la particule à son emplacement actuel et déplacement de la particule en conséquence.

3. Réinitialisation d'une petite partie des particules en une position aléatoire. Cela garantit que les zones sous le vent ne deviennent jamais complètement vides.

4. Effacement sur l'écran actuel et dessin des particules nouvellement positionnées.

Ceci pose des problèmes de limitations de performances comme par exemple :

- Chaque fois que vous mettez à jour les données ou la vue (environ 2 secondes pour la Terre, par exemple), le temps de traitement est long, car le traitement des données est coûteux et est produit par le processeur (Voir figure 77).

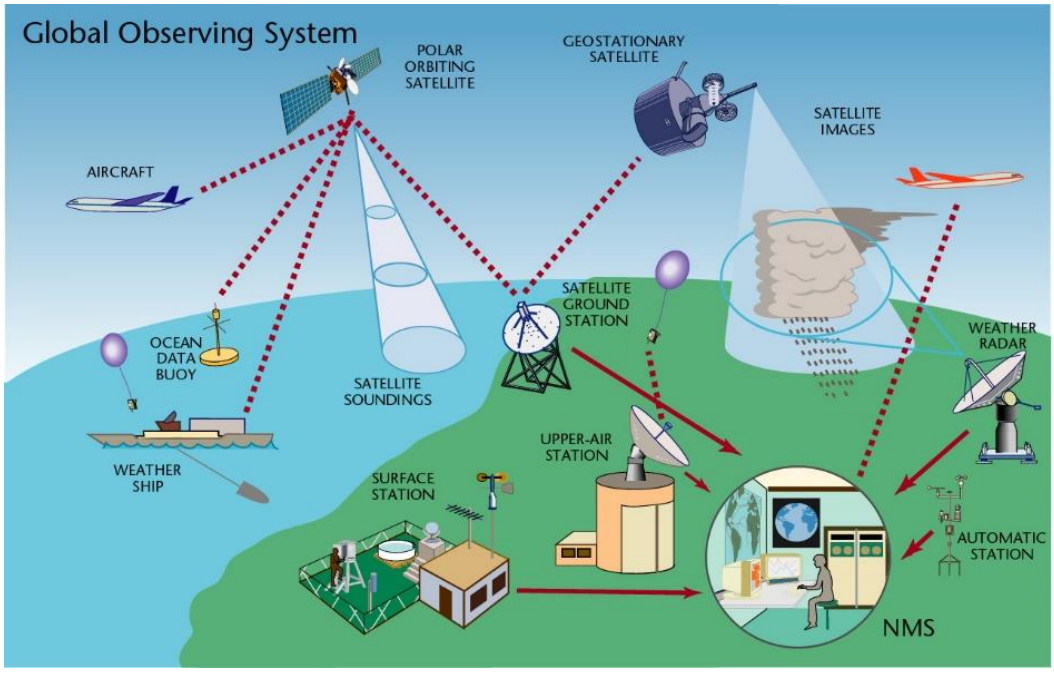


Figure 77 : Système mondial d'observation météo et anémométriques, source : World Meteorological Organisation, 2019

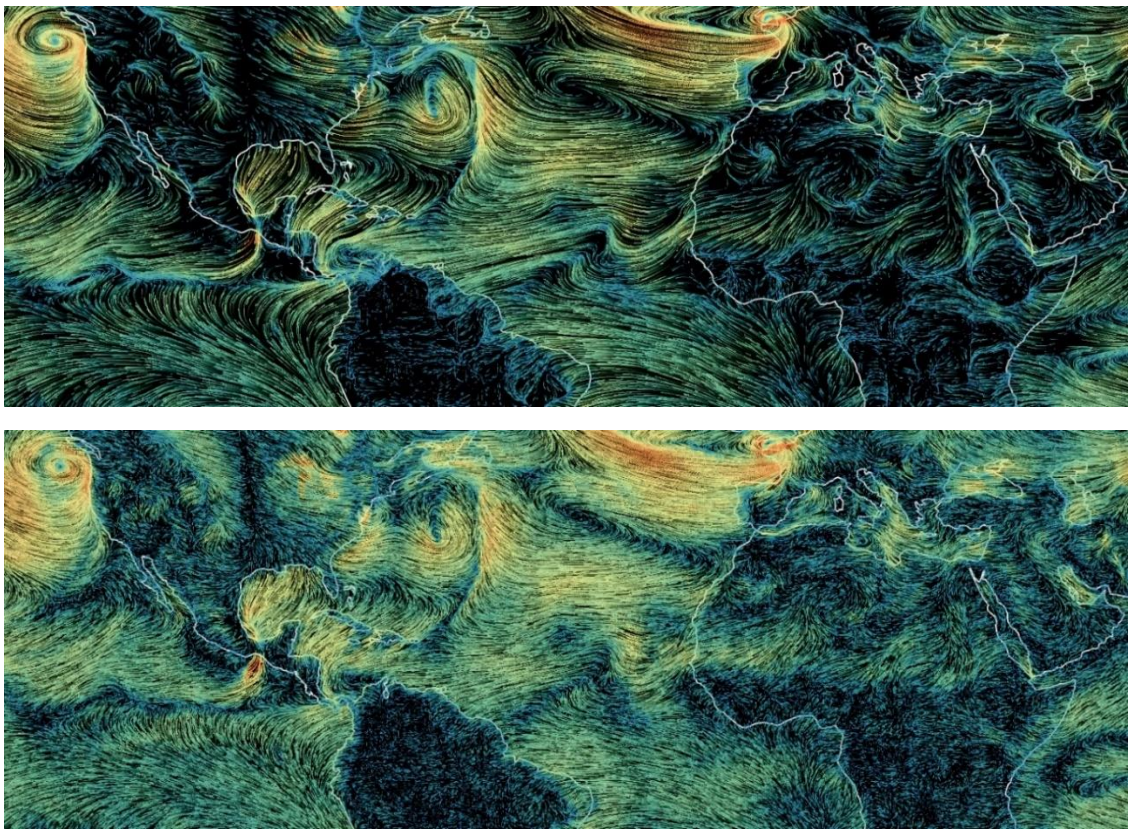


Figure 78. Deux résolutions de cartographie interactive des vents à l'échelle mondiale (source : site mapbox.com)

2.1.3 Déplacement de particules sur le GPU

Les visualisations de vent existantes stockent l'état des particules dans des matrices (tableaux). Comment ces données sont-elles stockées et manipulée par le processeur graphique des ordinateurs ? Une nouvelle fonctionnalité de GL, appelée calcul des shaders (dans OpenGL ES 3.1 et les spécifications WebGL 2.0 équivalentes), permet aux chercheurs d'exécuter du « **code shader »** sur des données arbitraires (sans rendu). Malheureusement, la prise en charge des nouvelles spécifications sur les navigateurs et les appareils mobiles reste toujours peu performante. Le mode d'affichage est donc simplifié par l'utilisation de **« textures ».**

OpenGL permet de dessiner non seulement à l'écran, mais également de générer des texture (via un concept appelé framebuffer). Ainsi, les positions des particules peuvent être codées en tant que couleurs RGBA d'une image, les charger dans le GPU, calculer de nouvelles positions en fonction de la vitesse du vent dans le **« fragment shader »,** les recoder en couleurs RGBA et les dessiner dans une nouvelle image[104].

2.1.4 Mise en place d'une méthode pour mesurer les vents urbains

Nos recherches nous ont permis de détourner un anémomètre de station météo amateur pour en faire un dispositif précis de relevé des vents autour des bâtiments. Ces anémomètres de type NETATMO communiquent par wifi avec un équipement central qui partage les données acquises par des dispositifs très variées tels que la température intérieure et extérieure, la pluviométrie, l'ensoleillement, la vitesse des vents. Tous ces dispositifs sont sans fils, avec une portée de 20 à 50 mètres permettant d'implanter des dispositifs sur le toit, en façade, en haut d'un mat et de déplacer leur implantation si besoin.

[104] Vladimir AGAFONKIN, *How I built a wind map with WebGL*, https://blog.mapbox.com/how-i-built-a-wind-map-with-webgl-b63022b5537f, consulté le 15 juillet 2020.

2.2 METHODOLOGIE DE RELEVE DE DONNEES ANEMOMETRIQUES EN SITE URBAIN

2.2.1 Analyse du comportement du vent en milieu urbain

- *Description des anémomètres connectés Netatmo*

Au fil de l'étude, il nous est apparu indispensable de comparer les résultats des simulations numériques avec des mesures réelles prises sur des bâtiments existants. Ces comparaisons ont servi d'étalonnage aux dispositifs numériques de simulation. La vitesse du vent et sa direction sont mesurées à l'aide d'anémomètres à ultrasons connectés.

Figure 79. Station météo connectée utilisée par D. SERERO

Figure 80. Anémomètre à ultrasons et tablette ou smartphone d'interface de présentation des données en temps réel, source : netatmo.com

L'anémomètre mesure le temps entre le moment où on envoie un signal et celui auquel on le reçoit sur deux directions perpendiculaires. Les vitesses sur les axes N-S et O-E sont alors combinées à l'aide de fonctions trigonométriques pour obtenir la vitesse et la direction réelles.

Mesures affichées[105]**:**

1- Vitesse et direction moyennes sur les 5 dernières minutes. La flèche indique la direction du vent et sa taille est proportionnelle à la vitesse. Des traits en gris clair autour de l'icône indiquent les directions dominantes du vent durant la dernière heure. Une flèche orientée vers le bas indique un vent du Nord (N=0°). Une flèche orientée vers la gauche indique un vent de l'Est (E=90°).

2- Vitesse et direction de rafale sur les 5 dernières minutes.

3- Rafale maximale (vitesse et direction) sur la journée (depuis minuit).

Picto pas de vent : ce pictogramme correspond à une absence de vent.

Picto flèche circulaire : ce pictogramme signifie que le vent est tournant, c'est-à-dire qu'il n'a pas de direction définie. Les courbes vous permettent de naviguer à travers les données historiques des moyennes de vent (vitesse et direction) et des rafales (vitesse et direction)[106].

[105] *Caractéristiques de la Station Météo Intelligente*, https://www.netatmo.com/fr-fr/weather/weatherstation/specifications, consulté le 17 juillet 2020. [2]

[106] *Station Météo Intelligente et ses accessoires - La mesure du vent, comment ça marche? | Netatmo Helpcenter*, https://helpcenter.netatmo.com/fr/station-meteo-intelligente-et-ses-accessoires/mesures-et-calibrations/la-mesure-du-vent-comment-ca-marche, consulté le 17 juillet 2020.

Figure 81. Dispositif de mesure fixé sur un support rigide à 2 m au-dessus du toit.

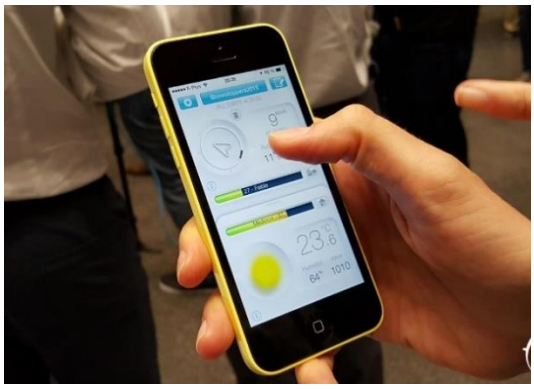


Figure 82. Manipulation des écrans de présentation des données

Figure 83. Schéma de fonctionnement de l'anémomètre à Ultrasons connecté par Netatmo site

Nous présentons ici plusieurs vu de l'interface de récupération des données et des cartographies que nous pouvons réaliser avec cet élément. Aujourd'hui les données d'un grand espace urbain, peuvent être partagées avec d'autres utilisateurs de l'application afin de créer des cartes collaboratives.

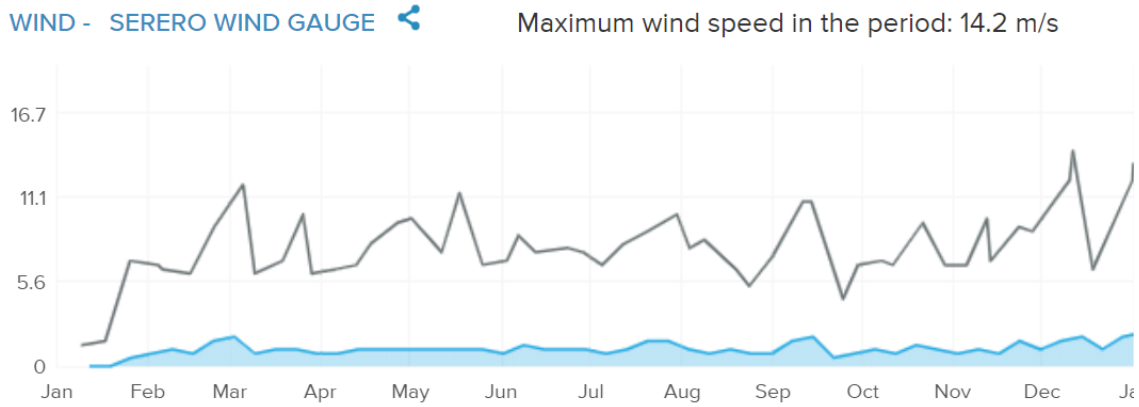


Figure 84. Schémas des vitesses de vent mesurées sur le site 136 avenue Parmentier, 75011 Paris en 2018, Axe vertical : vitesse en M/s. La courbe noir représente la vitesse de vent et la ligne bleu les vents minimaux relevés sur la même période.

Figure 85. Plan, élévation, coupe de l'anémomètre utilisé

Caractéristiques de l'anémomètre	
DIMENSIONS	Hauteur : 110 mm, Diamètre : 85 mm
CAPTEURS ET MESURES	Vitesse du vent : Range : 0 à 45 m/s (160 km/h) Précision : 0,5 m/s (1,8 km/h) Direction du vent : Précision : 5°
UNITÉS DE MESURE	m/s, km/h, mph, noeuds, Beaufort.
CARACTÉRISTIQUES SANS-FIL	Connexion sans fil entre les modules : Longue portée 100 m.
MATÉRIAUX ET DESIGN	Plastique haute qualité. Résistant aux UV, la grêle et les forts vents.

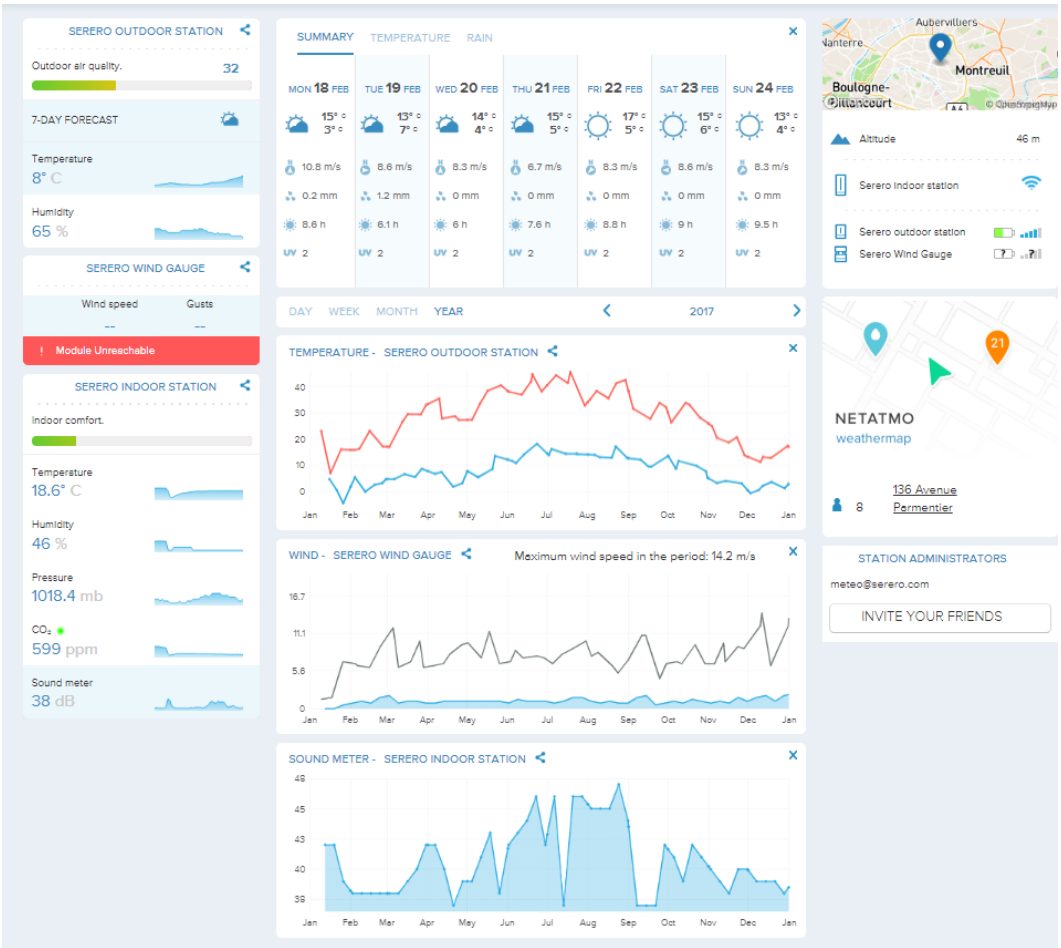


Figure 86. Interface générale de visualisation des données , application Netatmo, station météo

2.2.2 Cartographie des stations météo connectées à Paris

La figure 86 montre les stations météo de type NETATMO qui partagent leurs mesures et données sur cette plateforme collaborative. La densité du maillage en zone urbaine permet de comparer facilement les différences locales dans les mesures liées au contexte immédiat de la station.

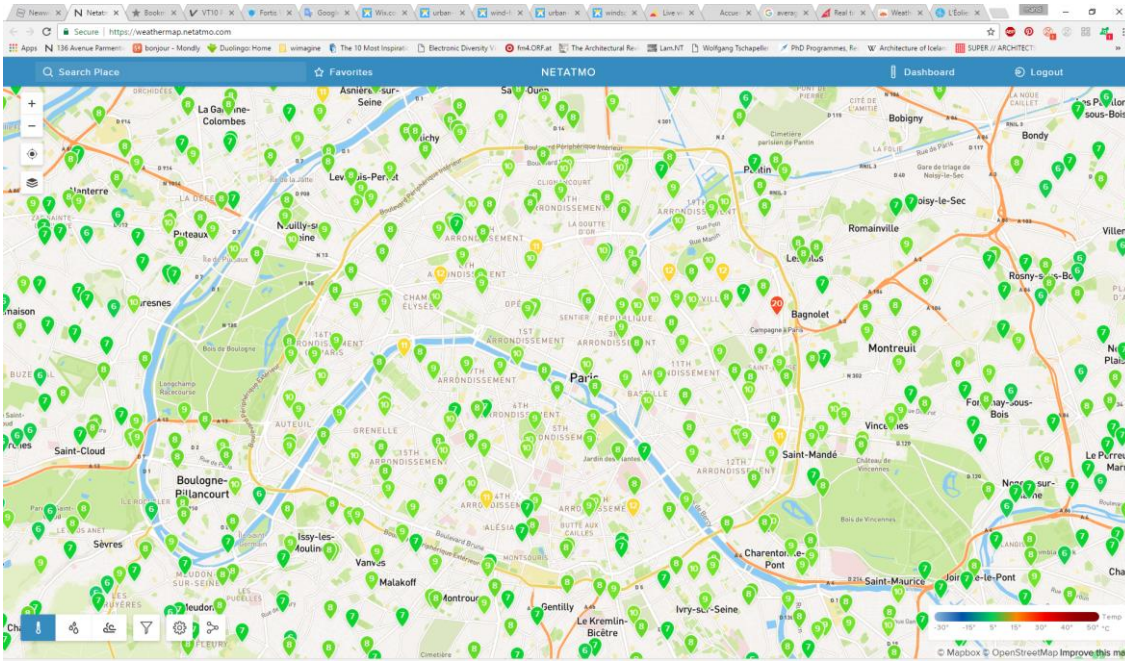


Figure 87. Cartographie des stations météo connectées de type Netatmo à Paris (données en temps réel sur le site *NETATMO)*

2.2.3 Carte des anémomètres de mesures de vent

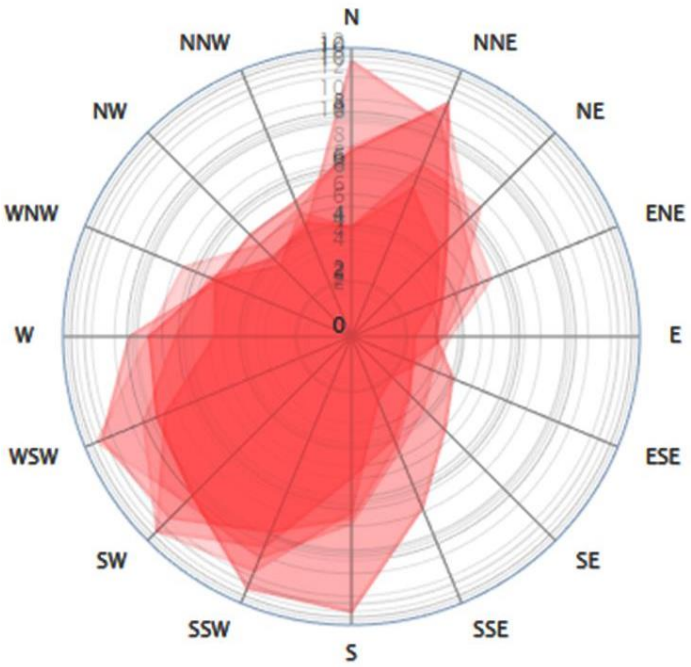


Figure 88 Les stations de mesure de vent montrent les directions principales dans la Ville de Paris, par le site Windfinder.

La figure 87 montre les directions principales relevées par les stations de météo traditionnelles en site urbain parisien.

La figure 88 montre les anémomètres connectés NETATMO accessibles sur cette plateforme collaborative. L'orientation des flèches montre à un instant t la direction du vent à chacune de ces stations. L'orientation omnidirectionnelle montre l'impact de la complexité des turbulences en site urbain.

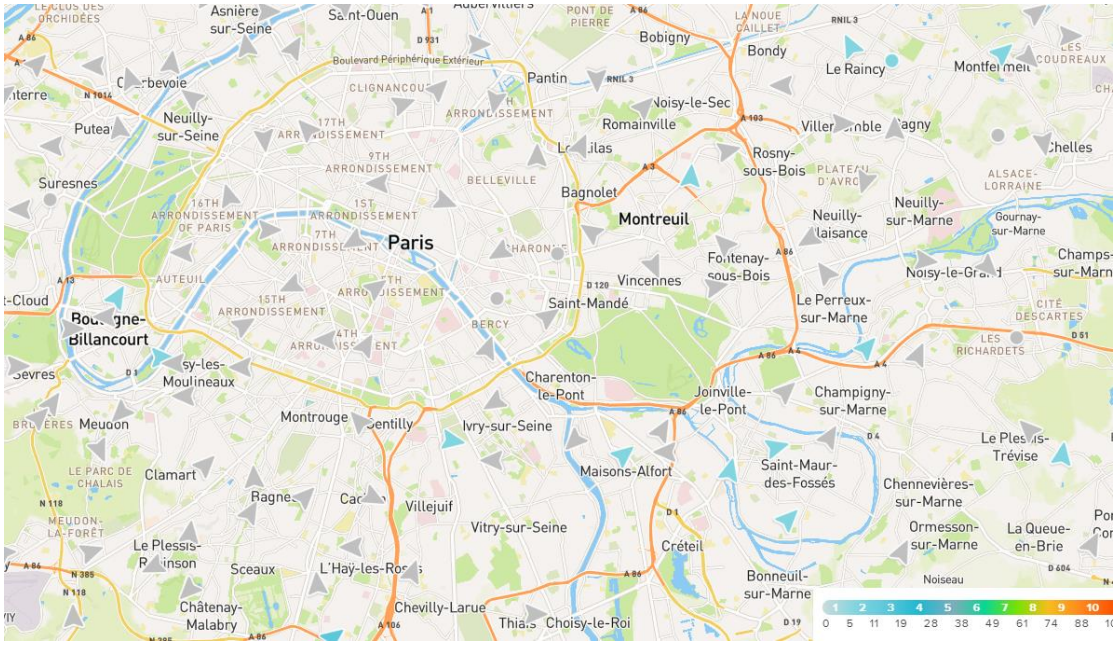


Figure 89 Géolocalisation des anémomètres connectés au 1/12/2017 à Paris sur le site Netatmo

2.2.4 Présentation des sites d'étude

Dans le cadre de cette recherche, depuis 2016, nous avons demandé aux maitre d'ouvrages de nos projets en cours, d'installer des éléments de mesure du vent sur les bâtiments en chantier ou en fin de réalisation.

Nous avons essuyé beaucoup de refus, souvent peu justifiés, mais 7 bâtiments ont pu faire l'objet d'un suivi plus ou moins long de leur impact sur les vents locaux. Les données de vent d'un bâtiment, sans être publiques à ce jour, ont un caractère de confidentialité, car elles sont un indicateur de l'impact environnemental d'un bâtiment dans son contexte.

Nous avons donc sélectionné les sites suivants avec installation des dispositifs de mesures en plusieurs endroits de ces bâtiments (voir figure 88) :

- Une maison à Arcueil (94)
- Un immeuble de faubourg (75011)
- Un bâtiment-ilot, l'école d'architecture Paris Val-de-Seine

Les relevés réalisées sur ces bâtiments ont été comparés aux stations météo de référence parisiennes à savoir :

- L'aéroport Charles de Gaulle (CDG)
- L'aéroport d'Orly
- La station météo du Parc Montsouris
- La tour Zamansky de l'Université Paris Jussieu

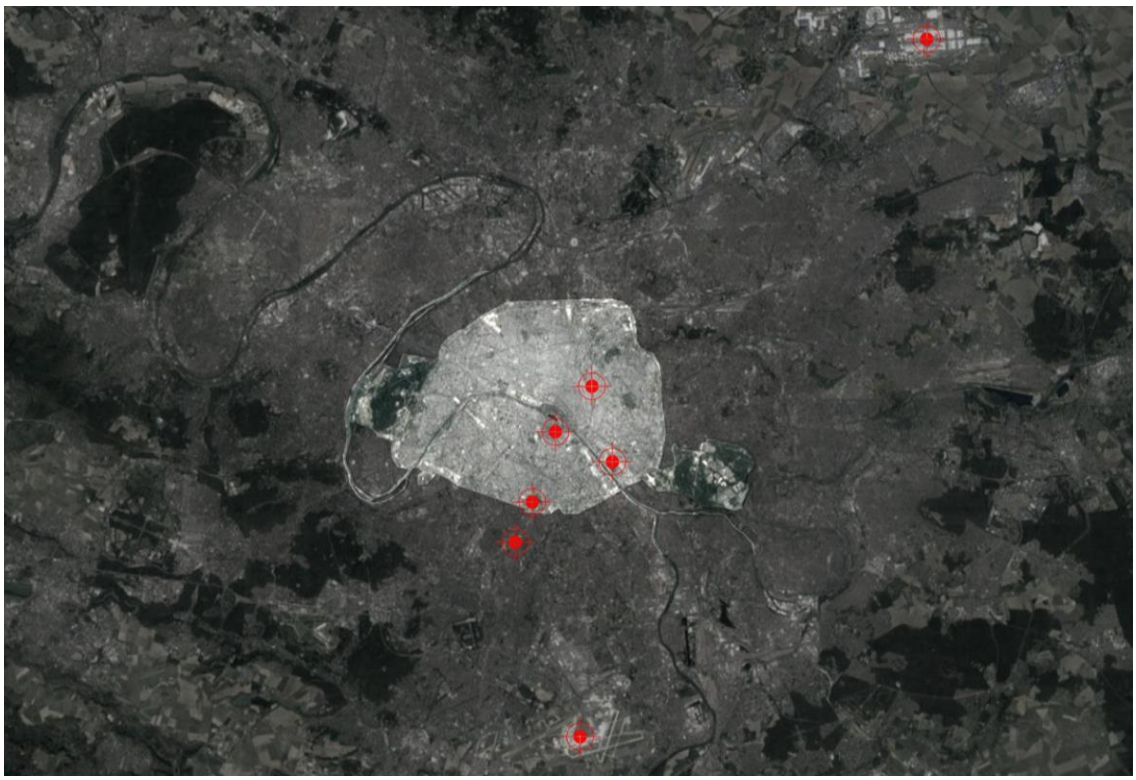


Figure 90. Localisation des Stations météo de relevés du vent, installées par Serero qui sont comparées quotidiennement, 2016-2020

Les données serviront à étalonner les simulations numériques de chacun des sites qui sont présentées à la Partie 4, (chapitre 4.1.1 à 4.6.8).

pour les relevés de vitesse de vent de Février 2017 à décembre 2018, les informations peuvent être téléchargées sur ce lien :

https://drive.google.com/file/d/1aZmkhh1U-4wqAILfeilwOmJjD4BaXo7p/view

2.2.5 Méthode d'installation d'anémomètres connectés sur exemple d'immeuble de logements haussmannien 136 avenue Parmentier, Paris XI^{ème}

La première station météo de relevées a été installée au 136 avenue Parmentier, Paris 11ème, sur le toit de l'immeuble le 24 Janvier 2016. Depuis cette date, la vitesse du vent quotidienne a été relevée toutes les 5 minutes et nous avons un relevé mensuel de ces informations.

En addition à la station de vent de Serero, cette recherche collecte 4 autres sources de données à Paris à savoir de www.windfinder.com et www.infoclimat.fr ; incluant la station météo de Paris CDG aéroport, l'aéroport de Paris Orly, le Parc Montsouris et en haut de la tour Zamansky sur le Campus de Jussieu, Paris 5ème. Tous ces relevés et observations, donnent une analyse expérimentale solide sur des points stratégiques de la ville de Paris.

Figure 91.Installation de l'anémomètre sur le toit du bâtiment 136 avenue Parmentier, Paris 11ème. Une antenne de TV a servi de support de fixation du dispositif.

Le dispositif de mesure a été installé à 1 mètre en retrait de la façade sur rue à précisément 2 m au-dessus du toit en fixant un type acier galvanisé en prolongation d'une antenne TV existante. Cette implantation est basé sur la simulation numérique de vent présenté au chapitre 4.5 à la figure 197.

Figure 92. Localisation de la station de relevé de vent - 136 avenue Parmentier – Paris, D. Serero

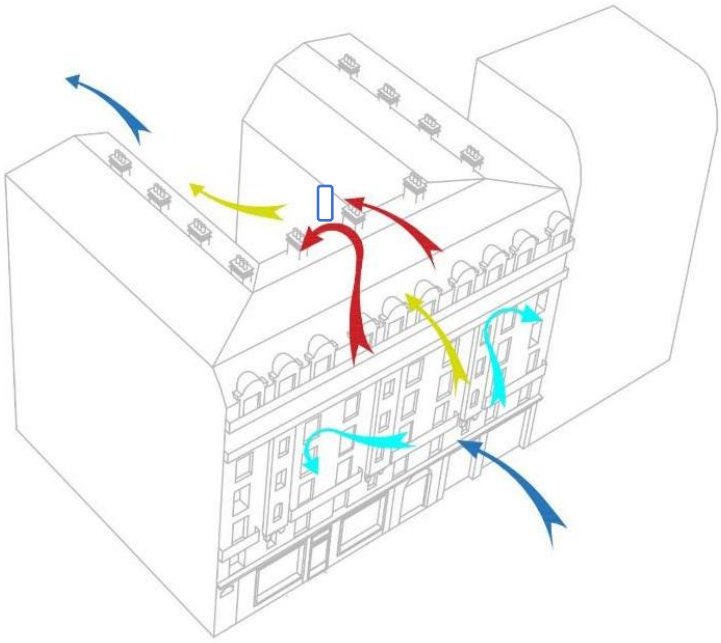


Figure 93. Modélisation 3D du bâtiment Parmentier montrant les flux schématiques de vents et la position de l'anémomètre de mesure, Modèle 3D D. Serero

Vous trouverez ici un tableau de synthèse des données de ces 4 stations de relevés du vent comparée comme indiqué à la date du mois de **Décembre 2018**.

LOCATION	136. AVE PARAMENTIER				CDG AIRPORT			
HOUR	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00
DATE								
01.09.2017	1,1/S	1,4/SSW	3,1/S	5/SW	1/NW	1/WNW	2	5/NE
02.09.2017	2,5/W	2,2/NW	3,6/SW	5/NE	2/NW	2/NW	3/NW	5/N
03.09.2017	1,1/ENE	1,4/SSE	3,6/S	3,3/S	1	2/ESE	3/S	4/SSE
04.09.2017	1,1/SSW	4,7/S	4,7/S	4,7/SW	1/N	2/S	6/SSW	2/W
05.09.2017	3,6/SW	2,5/S	5,3/SSW	5,8/S	3/SW	4/S	6/SW	5/SW
06.09.2017	5,6/SW	5,3/SW	5,3/SW	6,9/SW	6/W	5/W	7/W	7/W
07.09.2017	4,4/SSW	3,6/SW	3,9/SSW	6,9/SSW	2/W	3/S	5/WSW	5/W
08.09.2017	3,6/S	5,3/S	6,9/S	5,8/S	5/WSW	6/SSW	8/SW	6/SW
09.09.2017	3,6/S	5,3/SW	5,3/SW	6/SW	5/SSW	5/WSW	7/WSW	5/WNW
10.09.2017	ND	2,2/SSW	2,8/SW	6,9/S	3/SW	4/WSW	5/SW	9/SW
11.09.2017	10,8/S	5,3/SW	8,1/SW	8,9/SW	9/SW	7/WSW	10/WSW	10/WSW

Figure 94. Comparaison de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly), et des anémomètres connectés à 22 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment de type "Faubourg". (en m/s, comparé sur 4 créneaux horaires journaliers.)

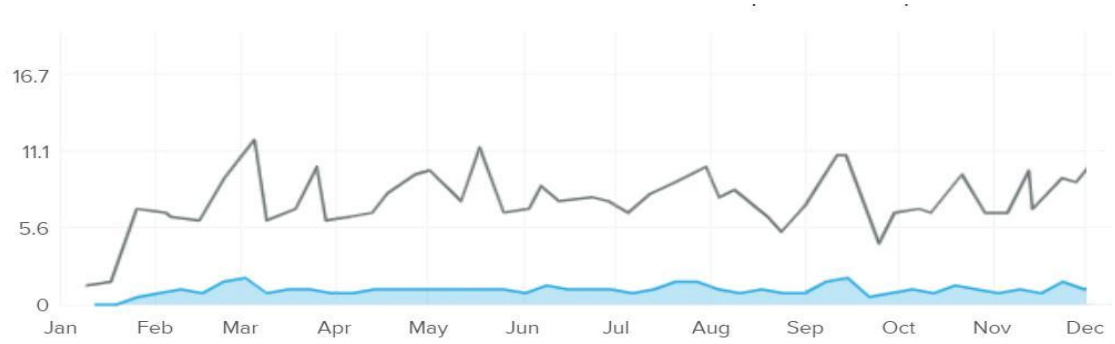


Figure 95. Relevé de la station météo Parmentier (moyenne mensuelle des vents en 2018) à 22m de hauteur depuis la rue dans un environnement urbain dense de type "Faubourg."

2.2.6 Relevés anémométriques d'une maison en région Parisienne (Arcueil 94)

La seconde station météo de relevées a été installée au 39 rue de Chinon à Arcueil, sur le toit d'une maison à 9 mètres de haut dans un secteur résidentiel dégagé, P30 mars 2017. Depuis cette date, la vitesse du vent quotidienne a été relevée toutes les 5 minutes et nous avons un relevé mensuel de ces informations. Les figures 95 à 97 montrent le contexte de cette installation.

Figure 96. Plan de situation de la maison dans le quartier Maison des examens à Arcueil, D. Serero

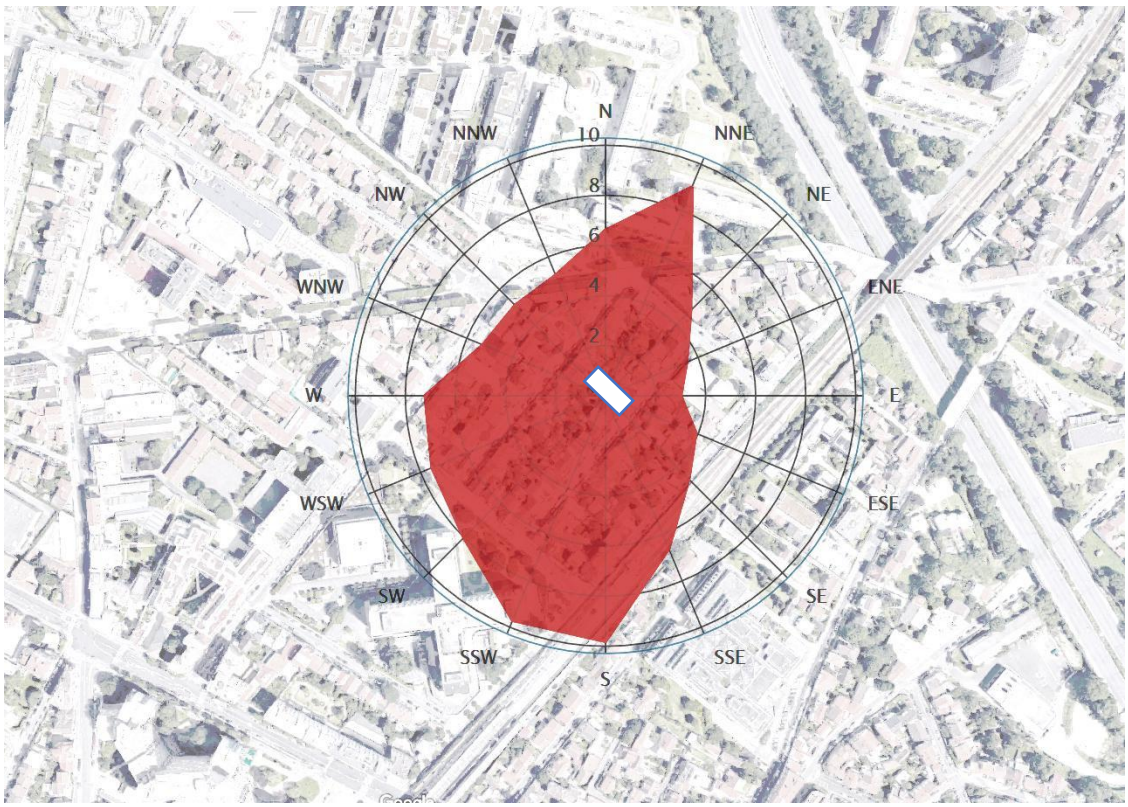


Figure 97. Distribution de la direction du vent en pourcentage annuel, site 39 rue de Chinon, Arcueil 94110

Figure 98. Vue du nouvel anémomètre à une hauteur de 8 mètres au-dessus du sol de la maison Roméra à Arcueil

LOCATION	RUE DE CHINON, ARCUEIL				CDG AIRPORT			
HOUR	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00
DATE								
01.05.2018	3,9/SSE	4,7/S	6,7/SW	3,3/SSW	5/W	2/SW	3/S	5/SSE
02.05.2018	3,6/S	1,7/S	1,9/NNE	4,7/NNE	6/W	5/WSW	4/WSW	7/W
03.05.2018	3,6/NW	2,5/NW	1,7/NE	3,1/NE	3/SW	3/SW	5/SSW	4/W
04.05.2018	1,7/NE	2,2/NNE	2,8/NE	4,7/NNE	3/S	2/ESE	3/ENE	5/E
05.05.2018	2,5/NNE	3,1/NE	3,6/NNE	3,9/ENE	3/ENE	2/E	4/ESE	2/W
06.05.2018	3,9/NE	4,2/NE	1,4/ENE	2,2/SSW	1/WSW	5/WNW	5/NNW	5/NW
07.05.2018	3,3/SW	4,7/WNW	4,2/NW	3,9/W	1/N	2/WNW	2/N	4/NNE
08.05.2018	3,1/NW	2,2/NW	5/N	4,7/NNW	3/N	2/NE	5/ENE	6/ENE
09.05.2018	3,1/N	4,4/NE	5/NE	4,4/NE	4/NE	3/ENE	9/ESE	6/ESE
10.05.2018	3,1/ENE	2,2/NNE	4,2/NE	3,6/ENE	5/ESE	3/E	2/SSW	3/NNW
11.05.2018	1,4/ENE	1,7/S	3,3/SSW	3,9/S	5/NNE	3/NNE	3/ENE	4/NE
12.05.2018	1,7/SSE	2,5/S	4,4/S	4,2/S	4/S	5/S	5/SSW	3/NE
13.05.2018	3,1/S	3,3/SSE	4,2/SW	4,7/S	4/SSW	4/S	6/WSW	3/WSW
14.05.2018	2,8/SSE	ND	5,3/S	6,4/SW	3/SSW	3/SSW	4/SW	5/WNW

Figure 99. Extrait d'une feuille de relevé de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly), et des anémomètres connectés à 8 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment de type individuelle, D. Serero. (en m/s, comparé sur 4 créneaux horaires journaliers.)

La comparaison de relevés de vents sur les sites des 2 aéroport CDG et Orly montrent une grande variation de direction de vent au même instant en site urbain. La densité du milieu urbain génère des perturbations dans l'écoulement d'air et ceci peut expliquer les augmentations de vitesse, les changements de direction par rapport aux vents dominants.

2.2.7 Relevés anémométriques sur un bâtiment-ilot urbain : l'Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine (75013)

La troisième station météo de relevées a été installée au 3 quai Panhard Levassor, 75013 Paris, sur le toit d'un immeuble de grande hauteur (IGH) de l'école d'Architecture Paris Val-de-Seine. Positionné en front de Seine et à proximité d'un grand boulevard, ce site est intéressant de par son ouverture sur 2 corridors à vent.

Le bâtiment occupe partiellement une ancienne usine sur toute la largeur de l'ilot entre la Seine et la rue Albert Einstein au Sud-Ouest. Depuis cette date, la vitesse du vent quotidienne a été relevée toutes les 5 minutes et nous avons un relevé mensuel de ces informations. Les figures 99 à 101 montrent le contexte de cette installation.

Figure 100. Localisation du nouvel anémomètre à l'ENSAPVS bâtiment (Paris 75013)

Figure 101.Vue du dispositif inséré sur le toit du

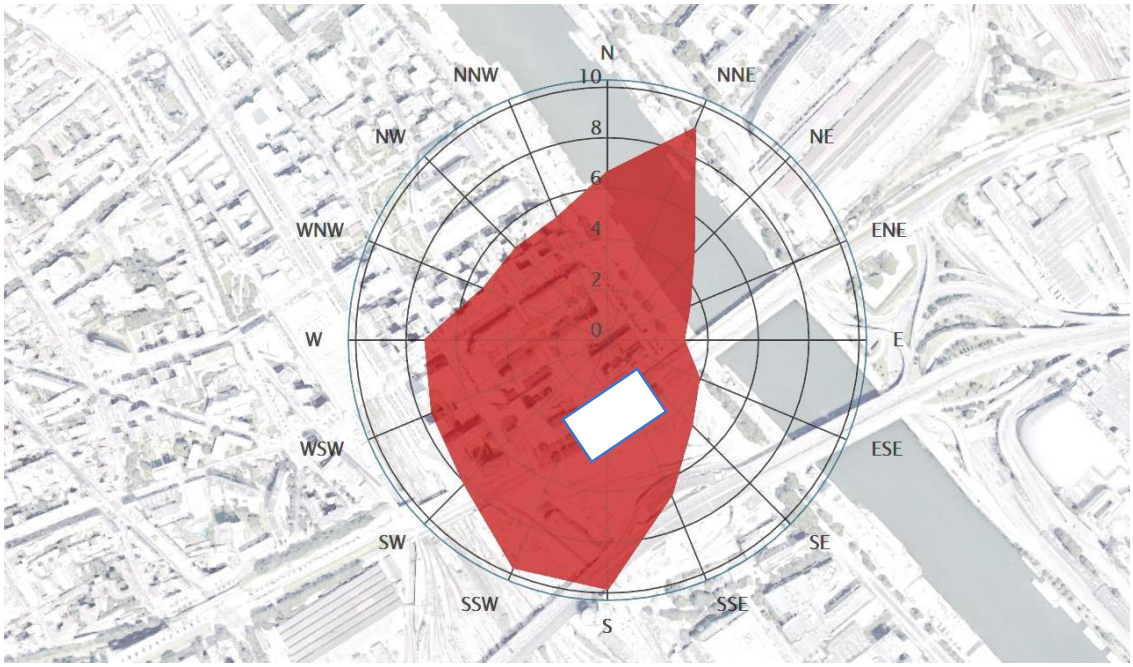


Figure 102. Distribution de la direction du vent en pourcentage annuel, Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine. Paris 75013

Les données mesurées sur ces différentes implantations montrent une grande variation de vitesse et de direction en site urbain. En région parisienne, la direction principale du vent est SSO et NNE, qui nous donne une première information d'implantation de dispositif de capture d'énergie sur les toits et façades des bâtiments. Nous présentons ici un extrait du relevé sur le site ENSAPVS en comparaison avec les stations météo de CDG et de Orly.

LOCATION	ENSAPVS					CDG AIRPORT			
HOUR	00:00	06:00	12:00	18:00		00:00	06:00	12:00	18:00
DATE									
30.01.2018	4.1/SSW	5.9/S	4.2/SSW	4.8/SSW		5/S	6/SSW	1/N	2/SSW
31.01.2018	4.5/SSE	2.8/SSW	3.4/WSW	3.1/ENE		1/N	1/NNE	2/NNW	1/N
01.02.2018	3.1/E	4.5/SSE	5.3/S	ND		1/N	3/SSE	4/S	6/SSW
02.02.2018	2/N	1.9/SSW	4/S	1.9/S		1/N	1/N	5/SSE	1/N
03.02.2018	4.9/S	3.2/S	4/SE	7/SE		6/SW	6/SW	7/S	9/SSE
04.02.1018	4.8/S	4.5/ENE	3.4/WNW	ND		8/SSW	5/SE	1/N	5/WSW
05.02.2018	4.7/WNW	ND	5.5/S	4.5/S		1/SE	1/N	1/NNE	1/ESE
06.02.2018	6.1/N	3.1/NW	3.1/NNE	1.9/WSW		8/NNW	3/NW	4/NNW	0
07.02.2018	ND	3.9/E	2.2/S	4.3/WNW		4/S	4/S	1/N	1/N
08.02.2018	ND	4.2/NW	ND	5.5/NW		2/W	3/WNW	1/N	1/NNE
09.02.2018	4.8/NE	3.6/NE	4.2/NE	1.9/ENE		1/N	1/N	1/NNE	1/N
10.02.2018	2.5/NE	3.1/NNE	5.3/N	4.7/NE		3/NE	4/NE	1/N	3/N
11.02.2018	2.5/NNE	2.8/NW	2.2/NNE	2.2/NNE		1/NNE	1/N	1/N	1/N
12.02.2018	1.9/NE	4.2/NE	3.6/ENE	1.9/NE		1/NNE	1/NNE	1/N	1/N
13.02.2018	4.2/ENE	3.6/ENE	3.6/ENE	1.9/ENE		5/E	6/E	8/E	1/N

Figure 103. Comparaison de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly), et des anémomètres connectés à 30 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment complexe. Chaque relevé indique la vitesse du vent, et l'orientation du vent. (en m/s, comparé sur 4 créneaux horaires journaliers.)

2.3 ANALYSE COMPARATIVE DES DISPOSITIFS EOLIENS

2.3.1 Type d'intégration des dispositifs aux bâtiments et façades

Maintenant que nous avons identifié la vitesse du vent, et les typologies de bâtiments adaptés pour l'intégration de ces dispositifs, notre recherche vise à identifier où et comment placer ces dispositifs de manière à maximiser la vitesse de vent sur des micro-turbines. Comme l'ont précisé les relevés de vents : la vitesse de vent moyenne à Paris est de 5 m/s, avec des journées à plus de 20m/s et des jours à moins de 1m/s. Mais ce que nous recherchons, c'est une mise en œuvre, et une implantation de l'éolienne qui permette de limiter l'impact de turbulences des vents urbains et de lisser la constance de la vélocité du vent entre 5 et 12 m/s afin d'optimiser sa capacité maximale de production d'énergie.

Le tableau de la figure 103 montre quelques-unes des micro-éoliennes disponibles sur le marché actuellement, ainsi que leur dimensions et la puissante maximale d'énergie produite.

Ce tableau montre que les typologies de dispositifs, sont très variées et potentiellement adaptées à des installations spécifiques à un bâtiment ou à un lieu. Nous n'avons pu, dans le cadre de cette recherche, étudier toutes ces typologies dans des simulations, mais elles montrent leur large variété.

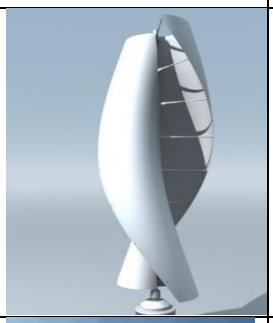
	MICRO TYPE	DROIT	HELICOIDAL	CLUSTER / AGGREGATION
DARRIEUS QR5				
A GODET				
WINDSPIRE				
SAVONNIUS				
WIND LENS				

Figure 104. Tableau de comparaison de la grande diversité des dispositifs éoliens existants à ce jour.

2.3.2 Profilage du dispositif d'augmentation de la vitesse du vent autour d'un bâtiment

En analysant les cartographies de répartition du vent autour du bâtiment, nous verrons dans la Partie 4 (chapitre 4.2) que des zones "hotspots" de couleur rouge-orangé apparaissent sur des points, le long des arêtes du volume du bâtiment. Ceci localise dans l'espace des points "chauds" où la vitesse de l'air est plus rapide que dans la zone autour du bâtiment. L'implantation des dispositifs éoliens à cet endroit permettrait une augmentation de la vitesse du vent de 2 à 2,5 fois, soit selon la limite de Betz, un gain de puissance de plus de 8 fois la puissance de l'air sans bâtiment.

Une manière d'améliorer cette augmentation de vitesse du vent serait de "comprimer" la veine d'air à proximité du bâtiment et donc de proposer des lames, trous, structure permettant ponctuellement d'ajouter un effet d'amplification de la veine d'air (Figures 104, 105 et 106) .

En fonction du volume du bâtiment, de sa typologie historique, notre recherche nous a amené à proposer par étape successives de type "test and learn" des dispositifs d'augmentation de la vitesse de l'air. Nous montrons des vues conceptuelles et schématiques de ces dispositifs dans un immeuble typique parisien. Nous proposons ici une « vision « provocatrice d'un dispositif d'augmentation de la vitesse de l'air qui pourrait être installé en toiture d'un bâtiment ancien. Cette proposition n'en constitue pas un projet architectural, mais simplement une hypothèse de travail.

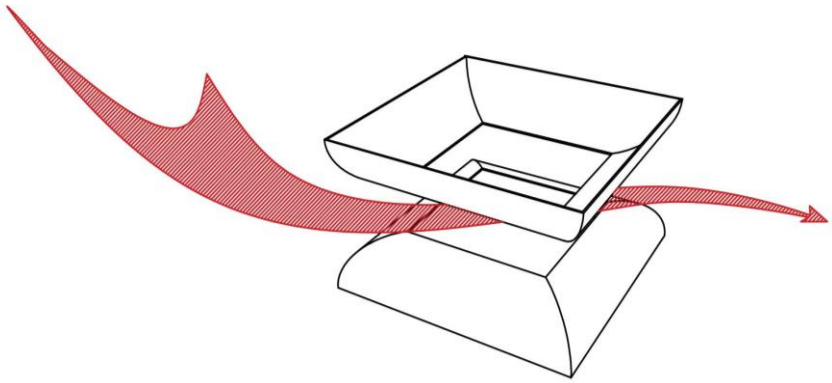


Figure 105. Intégration de dispositifs éoliens dans des ailes en toiture (retournement de la toiture) afin d'accélérer la veine d'air.

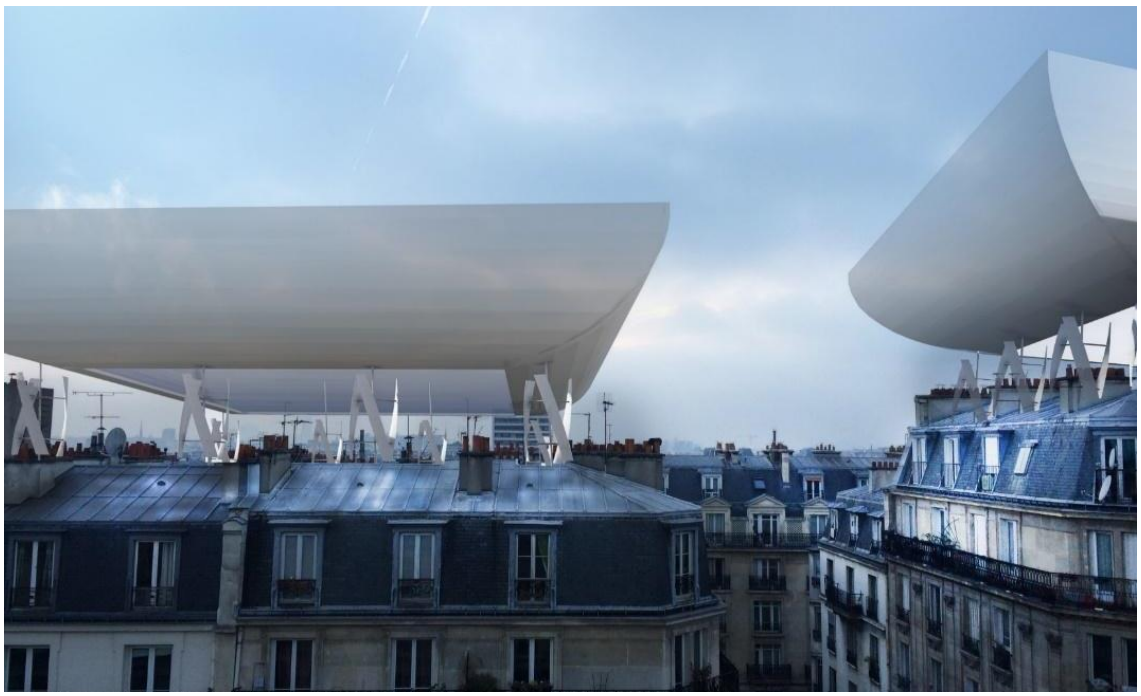
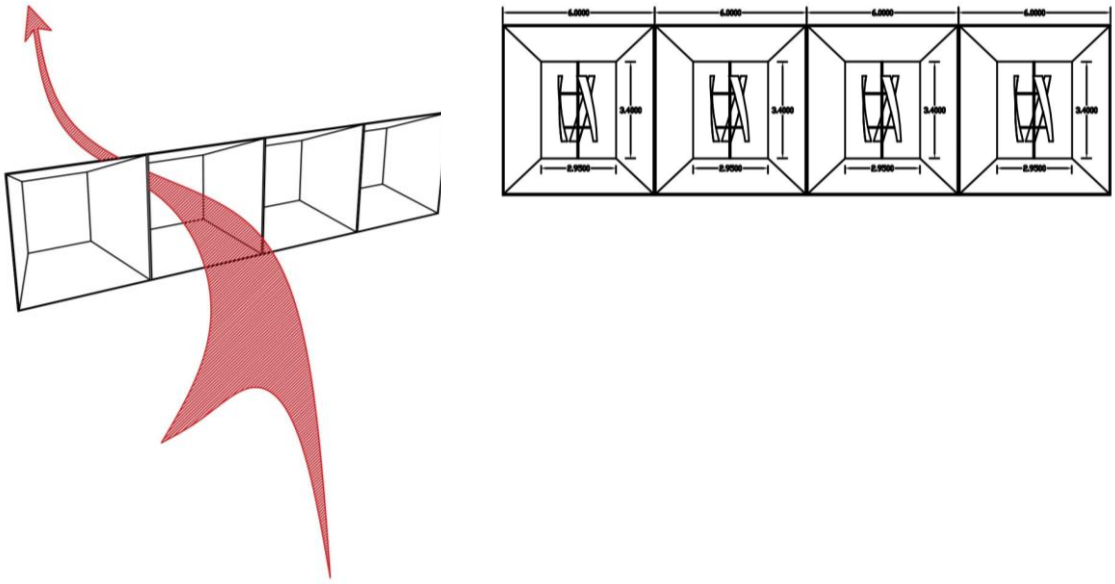


Figure 106. Vision préliminaire pour un bâtiment parisien ancien, rénové avec différents dispositifs étudiés



107. Intégration de dispositif éoliens dans ces cellules de type entonnoir afin d'accélérer la veine d'air.

Ce type de dispositif permet d'envisager une production locale d'énergie, à la fois pour les logements et pour les bureaux de cet immeuble. Ces dispositifs sont inclus dans le volume technique autorisé par la ville de Paris pour la production d'énergie renouvelable ou pour les serres agricoles urbaines.

2.3.3 Typologie de micro-turbines à axe vertical mis en œuvre dans la recherche

Dans le cadre de cette étude initiale, nous avons travaillé sur 4 types d'éoliennes à axe vertical ou horizontal (Voir figure 107 à 110). Le développement de ces éoliennes est réalisé dans la partie 4 et 54, mais l'encombrement de ces dispositifs, leur esthétique, et leur mode de fixation a été étudié afin de projeter une première vision de dispositifs de captation intégré au bâtiment.

Ces micro-turbines (de petits volumes) limitent surtout les turbulences associées au passage de l'air dans la turbine, réduisent les bruits de frottement d'une pale et offrent une vitesse d'enclenchement plus basse.

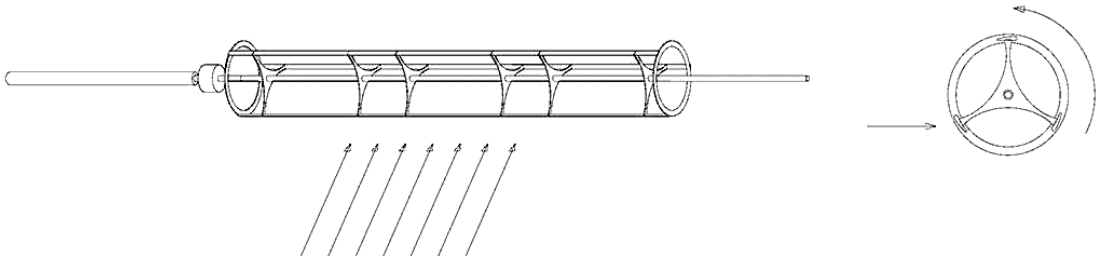


Figure 108. Génération d'électricité par "flèche à vent " à axe horizontal (Windspire) L= 3m, 0.6m de diamètre, dessins D. Serero

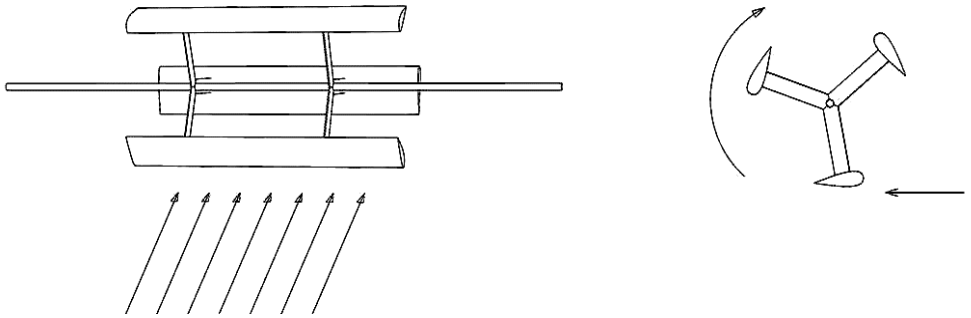


Figure 109. Génération d'électricité par "flêche à vent " à axe horizontal (Windspire) L= 2m, 0.6m de diamètre, dessins D. Serero

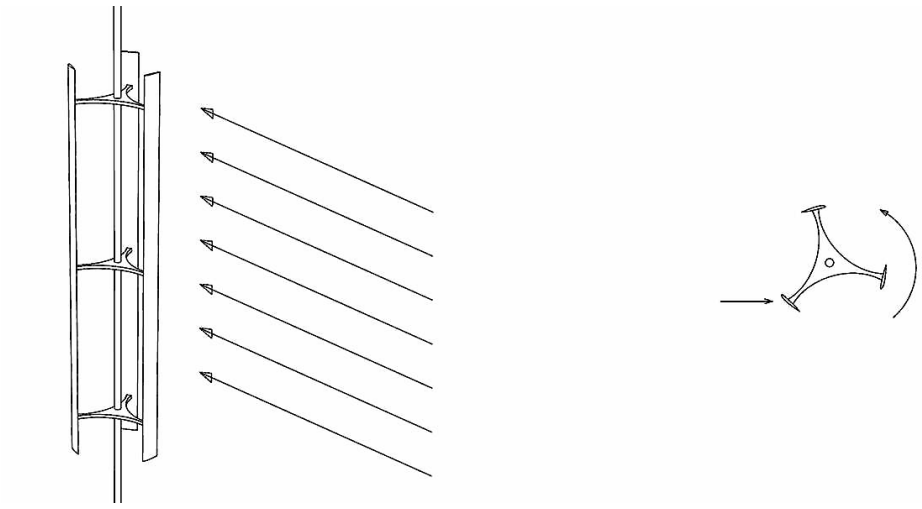


Figure 110. Génération d'électricité par "flêche à vent " à axe verticale (Windspire) H= 3m, 0.6m de diamètre, dessins D. Serero

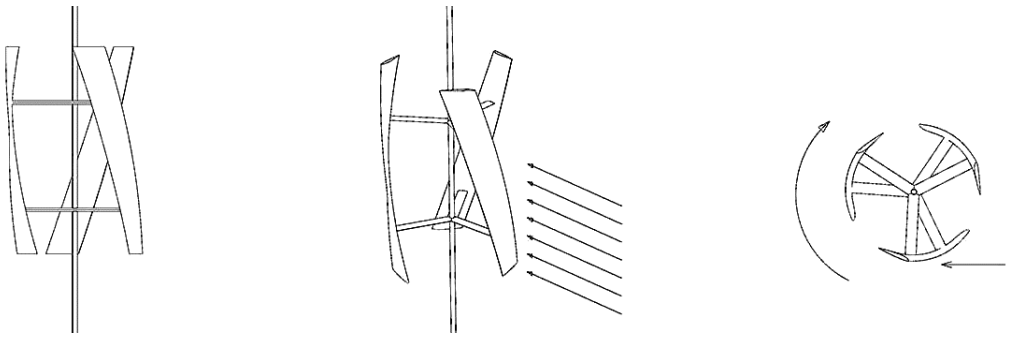


Figure 111. Génération d'électricité micro-éolienne à axe verticale H= 1m, 0.7m de diamètre, dessins D. Serero

La captation d'énergie sur des surfaces architecturales impose de limiter l'impact visuel de ces dispositifs sur l'architecture. Il nous a semblé important de travailler sur des dispositifs non visibles ou largement intégrés à l'architecture du bâtiment. Pour ces raisons, beaucoup des dispositifs que nous allons proposer utilisent plutôt les effets de bord et la distribution des dispositifs sur des linéaires de surface de bâtiment plutôt que sur des points ponctuellement placés au centre du bâtiment.

Ces dispositifs sont concentrés et habillés d'un amplificateur/stabilisateur que nous appellerons « foil » comme définit au chapitre 5.1.1. L'effet de prise d'air sur des surfaces longues de bâtiment permet d'augmenter la performance des systèmes et de proposer un raccordement « en série » des éléments de captation d'énergie. Il nous semble que l'intérêt de cette recherche est de prouver que des éoliennes intégrées à une architecture peuvent être vecteur de performance intéressante et élégamment intégrée à une façade ou toiture de bâtiment.

Pourrions-nous ici développer des systèmes éoliens à profil abaissé et proche de l'architecture ? Des dispositifs sans mouvements apparents, ou dont le mouvement n'est pas visible ? Ou des dispositifs qui participent à l'écriture architecturale du bâtiment. Nous envisageons de donner le nom de « aérofoil » au dispositif de de captation d'énergie éolienne.

Les dispositifs de turbines à axe vertical révèlent plusieurs intérêts dans le cadre de notre étude.

1- Elles permettent facilement une captation d'énergie sur des vents turbulents ou des vents changeants de direction. L'axe vertical s'adapte à tout changement de vent, aussi turbulent soient-ils et permet de limiter les déplacements sur un axe de la turbine.
2- D'autre part les turbines à axes verticaux permettent une captation sur une sur un profil plus bas et plus rapproché du bâtiment
3- Troisièmement les turbines installées en « cluster » limitent les perturbations de la veine d'air à l'arrière de celle-ci et permettent de combiner des éléments de captation d'énergie en série en les rapprochant les uns des autres points (3 à 5mètres) L'étude de l'Université de Stanford montre qu' un cluster de turbines éoliennes de type Spire, ou Darrieus, montre que l'énergie extraite de éolienne à axe vertical peut être multipliée par des assemblages de 10 à 25 éléments espacés tous les 2 mètres sans perte de plus de 10% de l'énergie éolien.

2.4 CONCLUSION

Les relevés de vitesse du vent sur plusieurs bâtiments avec des anémomètres montrent que les bâtiments augmentent la vitesse des vents à leur périphérie et dans l'environnement urbain. Ils sont générateurs par leur simple présence d'un véritable gisement d'énergie éolien.

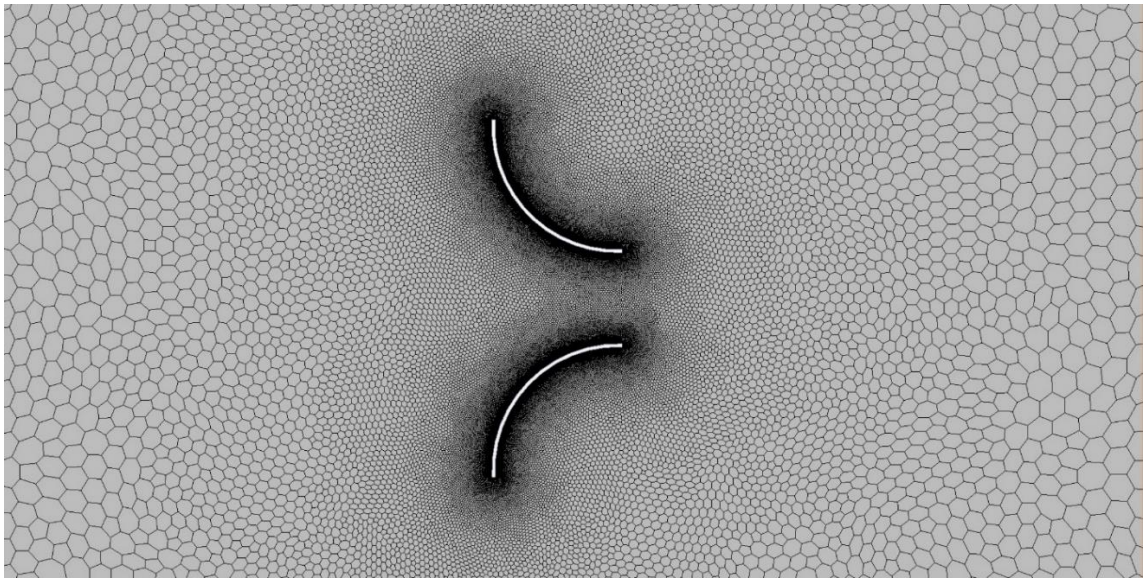
La mise en place de micro-turbines sur les points d'augmentation de la vitesse de l'air en toiture ou en façade des bâtiments constituent une nette amélioration des performances des éoliennes.

L'objectif de la suite de cette recherche est d'analyser les typologies architecturales historiques et modernes du bâtiment et d'étudier dans chaque cas, l'emplacement et le type de dispositif éolien à installer. La simulation en soufflerie numérique, qui sera présentée dans la partie 4, montre que des dispositifs de micro-turbines aident à stabiliser l'écoulement compressé d'air à proximité de leur emplacement.

Nous verrons qu'en calculant l'énergie générée par l'optimisation de l'implantation de ces dispositifs sur le toit, nous pourrions réduire de 20 à 25% la consommation d'électricité d'un logement familial. Au-delà des contraintes liées à la réglementation sur la hauteur maximum des dispositifs, les conditions de vents peuvent faire l'objet de simulations numériques permettant d'améliorer l'orientation, la hauteur et le choix du dispositif pour produire de l'énergie de manière efficace à partir d'une source d'énergie disponible et omniprésente.

PARTIE 3

MODELISATION ET EVALUATION PERFORMATIVE DES DISPOSITIFS



Contenu :

- Présentation des principes physiques de la mécanique des fluides
- Méthode de modélisation et définition des conditions initiales
- Etalonnage des résultats de la simulation numérique sur une soufflerie physique expérimentale
- Simulation numérique d'un dispositif en toiture de bâtiment avec 3 types de conditions initiales

3.1 Introduction 117
3.1 Principes de déplacement d'air en site urbain 117
3.1.1 Vent et bâtiments, localisation de la vitesse maximale du vent 117
- Caractéristiques du vent dans la couche de la canopée urbaine: 118
- Caractéristiques du vent en zones ouvertes (les rivières, le bord de mer, …) 118
- Évaluation de la turbulence urbaine 118
- Calcul de la densité de puissance du vent 119
3.2 Principes physiques de la mécanique des fluides 120
3.2.1 Equations de la mécanique de fluides 120
3.2.2 Équation de continuité 120
3.2.3 État stationnaire ou transitoire 121
- Convergence du maillage 122
3.2.4 Le facteur de similarité pour l'étude à échelle réduite : le nombre de Reynolds 123
3.2.5 Classification des écoulements 125
3.2.6 La mécanique des fluides numérique (CFD – computer fluid dynamics) 127
3.2.7 Méthodologie de travail en mécanique des fluides numériques 128
3.2.8 Notion de maillage pour l'étude numérique 128
- Le volume 129
- Angle de déformation 129
- Maillage Polyhédrique 130
- Maillage Hexaédrique (Trimmer) 130
3.3 Méthode de modélisation et définition des conditions initiales de la simulation 131
3.3.1 Définition et modélisation de la géométrie 131
- La géométrie 132
- Choix du maillage 132
3.3.2 Définition des paramètres du calcul 134
- Gradients 135
- Turbulent 135
- K-Epsilon Turbulence & Realizable K-Epsilon Two Layer 135
- Reynolds-Averaged Navier Stokes 136
- Two-Layer All y+ Wall Treatment 136
- Implicit Unsteady 136
- Two dimensional 136
- Choix des conditions limites et initiales 136

3.3.3 Conditions Initiales 137
- Propriétés du solveur 137
3.3.4 Résultats et analyse 138
- Définition des conditions aux limites 139
- Lancement des calculs 139
3.4 Simulation numérique d'un dispositif en toiture de bâtiment avec 3 types de conditions initiales 140
3.4.1 Définitions des conditions initiales de la simulation 140
- La géométrie 141
- Confection du maillage 141
3.4.2 Simulation N°1 d'un dispositif d'amplification du vent 143
- Choix des conditions physiques retenues 144
3.4.3 Simulation N°2 d'un dispositif d'amplification du vent 146
3.4.4 Simulation N°3 d'un dispositif d'amplification du vent 148
3.5 Conclusion 151

3.0 INTRODUCTION

Nous présentons, dans cette partie, une synthèse des notions de physique de la mécanique des fluides utilisées dans cette recherche et la manière dont elles sont mises à contribution pour la compréhension des phénomènes aérauliques en site urbain. Pour la simulation d'écoulement d'air sur les bâtiments, nous allons brièvement présenter l'outil de simulation et ses paramétrages, expliquer la relation et l'étalonnage (précisé au chapitre 4.0) de ces outils avec une soufflerie physique et les relevés de vent sur site.

L'étude de 3 cas vont permettre de montrer la méthode d'analyse expérimentale, et les résultats sur des profils simples de toitures.

3.1 PRINCIPES DE DEPLACEMENT D'AIR EN SITE URBAIN

3.1.1 Vent et bâtiments, localisation de la vitesse maximale du vent

Le vent est le mouvement de l'air par rapport à la Terre créé par la différence de pression atmosphérique et provoquée par la différence de température due à l'intensité du rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre[107]. Les principales caractéristiques du vent, telles que la résistance de la surface, les échelles et l'intensité de la turbulence, la vitesse du vent et le profil du vent dans les zones urbaines sont fortement affectées (Figure 111) par les propriétés de rugosité des zones urbaines[108].

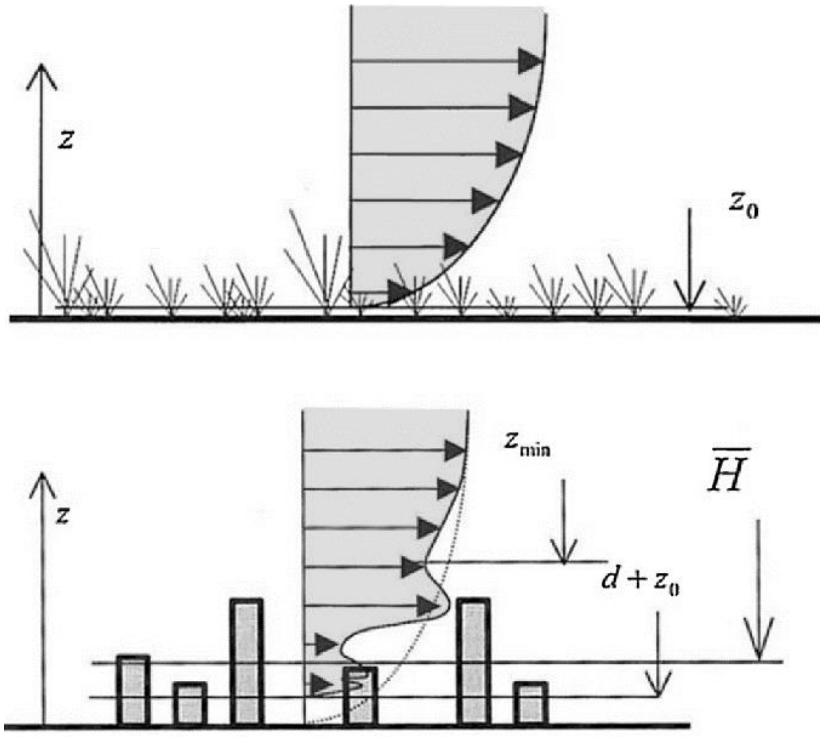


Figure 112. Modifications de l'écoulement du vent en ville, liées aux volumes architecturaux

[107] Ibrahim AL-BAHADLY, « Building a wind turbine for rural home », Energy for sustainable development 13.3, 2009.
[108] NG EDWARD, « Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong », 2011.

La rugosité de la surface qui résulte en une zone de forte turbulence, comme indiqué sur la figures 112 et 113, influence considérablement la vitesse et la direction du vent, d'où sa puissance extractible[109].
Lorsque l'air frappe des bâtiments et d'autres obstacles en milieu urbain, il se forme un tourbillonnement d'air complexe ou des vagues, comme indiqué dans la figure 114. La combinaison de la forme, de la hauteur et de la distance des bâtiments affecte la direction et l'intensité du vent et peut affecter la quantité d'énergie produite dans l'environnement urbain[110].

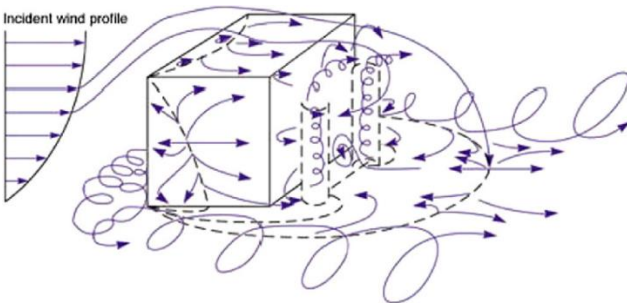


Figure 113. Différentes typologies de turbulence dans l'écoulement du vent

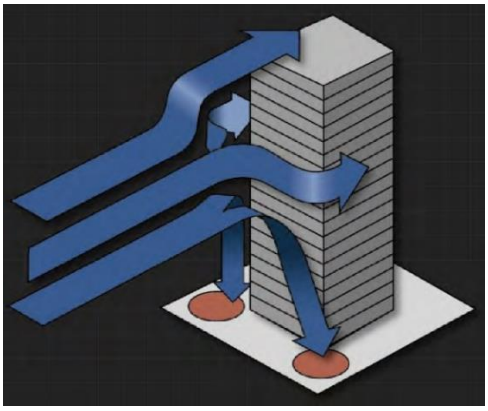


Figure 114. Effets du vent sur des bâtiments de grande hauteur

- *Caractéristiques du vent dans la couche de la canopée urbaine:*

Dans la couche de canopée urbaine, l'écoulement est presque entièrement régi par la géométrie de la rue ou des canyons (rapport de longueur et rapport longueur / profondeur) et par la distribution de la hauteur des bâtiments, en particulier dans les secteurs urbains où les bâtiments sont étroitement espacés et où un écoulement rasant a lieu.[111]

- *Caractéristiques du vent en zones ouvertes (les rivières, le bord de mer, …)*

En milieu urbain, la vitesse du vent est généralement maximale lorsque le vent est parallèle au fleuve. Cependant, des vitesses de vent relatives inférieures peuvent être trouvées lorsque le flux d'air d'approche est perpendiculaire à la rivière en raison du changement de traînée aérodynamique. L'air traversant le fleuve devient généralement moins turbulent après avoir traversé le bâtiment.[112]

- *Évaluation de la turbulence urbaine*

Étant donné que les profils de vent dans les zones urbaines ont tendance à être plus turbulents en raison de la présence de bâtiments, d'arbres le long des rues et d'autres obstacles[113], la technologie éolienne numérique (CWE) a récemment été développée pour évaluer l'interaction

[109] RICCIAR DELLI F, POLIMENO S. JWIND ENG IND AERODYN, « Some characteristics of the wind flow in the lower urban boundary layer », 2006.
[110] ROY DENOON, BRAD COCHRAN, DAVID BANKS, GRAEME WOOD, *Harvesting Wind Power from Tall Buildings*, 2008.
[111] ABD RAZAK, HAGISHIMA et TANIMOTO, « Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment », *Building and Environment*, 2013.
[112] Curtis R WOOD, « Wind observations above an urban river using a new lidar technique, scintillometry and anemometry », *The Science of the total environment*, 2013.
[113] ELIASSON et OFFERLE, « Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon », *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, n° 1, pp. 1‑16.

entre le vent et les bâtiments. Un certain nombre de techniques différentes ont été utilisées dans les simulations CFD avec divers modèles de turbulence. Le choix est généralement effectué en fonction des détails du flux à obtenir et des ressources informatiques disponibles[114]. La modélisation CFD est utilisée dans nos recherches pour déterminer les effets du bâtiment aux endroits où une turbine pourrait être intégrée.

- *Calcul de la densité de puissance du vent*

L'énergie produite par un dispositif intégré au bâtiment (BID) est une information importante pour le développement de la recherche. La puissance extractible par le vent est estimée à l'aide de l'équation suivante :

$$PUISSANCE = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times v^3 \times cp$$

Où les variables sont définies par :

$\boldsymbol{\rho}(densité\ de\ l'air) = 1.23\ [\frac{kg}{m^3}]$

$\boldsymbol{A} = \pi \times r^2 = \frac{1}{4}\pi \times d^2$ (surface de fonctionnement de l'éolienne)

D [m²]= Diamètre de l'éolienne

V= Vitesse de l'air

$\boldsymbol{cp_{max}} = 0.59$ (un coefficient de performance du vent sans unité/ Limite de Betz)

Nous utilisons généralement la limite de Betz pour évaluer la puissance extractible par le vent à partir d'un ensemble spécifique de conditions. Pour une éolienne à axe horizontal, elle est définie par l'équation suivante :

$$PUISSANCE = 0.12 \times d^2 \times v^3$$

Étant donné que le dispositif de production d'énergie à partir du vent est identique (diamètre constant de la turbine), la puissance extractible du vent est uniquement déterminée par la vitesse du vent en entrée.
L'étude en simulation de dynamique des fluides d'une section de bâtiment montre que sa localisation et son profil ont un impact immédiat sur la vitesse du vent autour du bâtiment. Une animation montrant l'évolution de la vitesse du vent dans le temps montre que les points chauds où la vitesse du vent peut être 2 à 3 fois supérieure à la vitesse d'entrée d'air fluctuent vers des zones spécifiques autour du bord et de la peau du bâtiment.
Comment pouvons-nous, en tant qu'architectes, tirer parti de cette situation pour proposer des dispositifs de récolte et des utilisations spécifiques du bâtiment ?

La figure 114 est une simulation en coupe d'un bâtiment de 3 niveaux sur pilotis qui montre l'effet multiplicateur d'un bâtiment sur la production d'énergie éolienne extractible en utilisant le calcul de la limite de Betz.

[114] UCHIDA et OHYA, « Micro-siting technique for wind turbine generators by using large-eddy simulation », *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, pp. 2121‑2138.

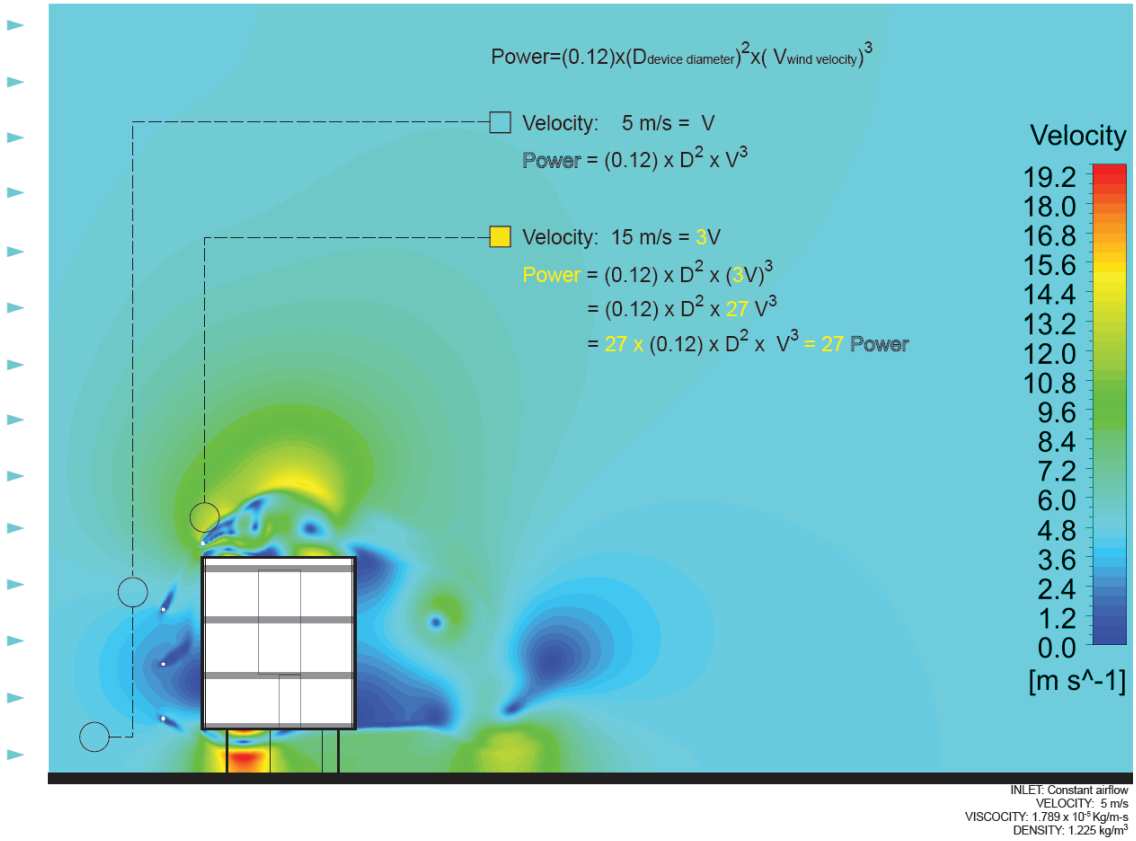


Figure 115. Simulation aéraulique dynamique du vent sur une coupe d'un bâtiment sur pilotis. Simulation de D. Serero

3.2 PRINCIPES PHYSIQUES DE LA MECANIQUE DES FLUIDES

3.2.1 Equations de la mécanique de fluides

La mécanique des fluides est un domaine de la physique consacrée à l'étude du comportement des fluides (liquides, gaz et plasmas) et des forces internes associées. C'est une branche de la mécanique des milieux continus qui modélise la matière à l'aide de particules assez petites pour relever de l'analyse mathématique mais assez grandes par rapport aux molécules pour être décrites par des fonctions continues.

Elle se divise en deux parties : la statique des fluides qui est l'étude des fluides au repos et la dynamique des fluides, qui est l'étude des fluides en mouvement.

3.2.2 Équation de continuité

En mécanique des fluides, le principe de conservation de la masse peut être décrit par l'**équation de continuité** sous plusieurs formes différentes : locale conservative (dérivée en temps normale), locale non conservative (la dérivée en temps suit la particule dans son mouvement), ou intégrale. Suivant les problèmes posés, c'est l'une ou l'autre de ces équations qui pourra être retenue, toutes étant équivalentes.

On note ici :

$\rho = \rho(\vec{x}, t)$: la masse volumique du fluide au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ à l'instant t

$\vec{V} = \vec{V}(\vec{x}, t)$: la vitesse d'une particule de fluide se trouvant au point repéré par le vecteur $\vec{x}$ à l'instant t

En prenant φ = 1, on trouve

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0$$

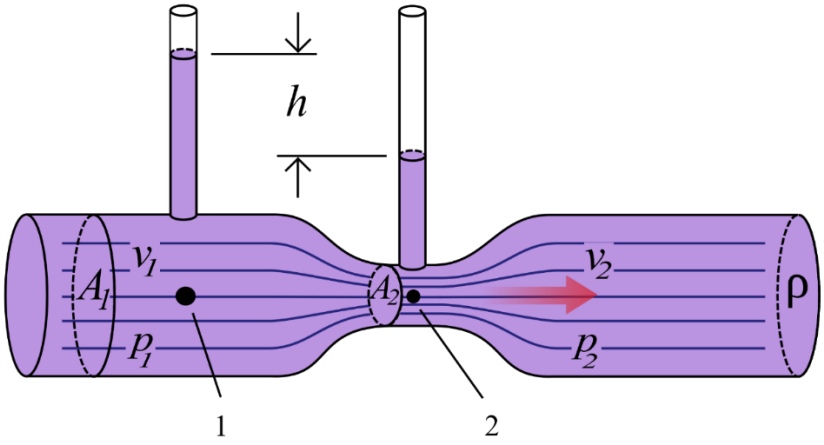


Figure 116. L'effet Venturi

L'effet Venturi illustre ce principe de la conservation de la masse (Figure 115) . Une certaine quantité de matière passe par un orifice en une unité de temps (par exemple en 1 s). Si l'orifice voit sa taille réduite et que la quantité de matière en circulation est à la fois constante dans le temps et dans l'espace (débit), alors la vitesse de passage dans l'orifice augmente pour permettre à ladite quantité de matière de circuler en totalité pendant la même unité de temps.

Cet effet se rencontre dans de nombreuses situations du territoire : augmentation de la vitesse du vent au passage d'un col de montagne, dans une ruelle. Dans toutes ces situations, le fluide air n'est pas compressible, et évolue en circulation forcée dans une conduite inextensible. Ils subissent donc l'effet Venturi.

3.2.3 État stationnaire ou instationnaire

L'objectif est de comprendre les principes et grande tendance.

Un état stationnaire est une situation pour laquelle le terme transitoire est nul ; on néglige donc le premier terme des équations ci-dessus, donc :

$$\frac{\partial \rho \varphi}{\partial t} = 0$$

Il s'agit d'un régime établi, d'un état de fonctionnement « longtemps » après le démarrage du système (ouverture du robinet, démarrage de la turbine); le résultat est

indépendant du temps, il n'y a pas de discrétisation temporelle. Cette situation simplifie grandement les calculs.

Cependant, cela ne permet pas de prendre en compte des fluctuations des conditions d'entrée ou de sortie, ou bien la description d'un remplissage. Dans ces cas-là, il faut faire un calcul transitoire (« instationnaire »), c'est-à-dire à plusieurs instants successifs.

Si le pas de temps est trop grand, on introduit des erreurs numériques qui se propagent. Par ailleurs, cela peut rendre compliqué la convergence à chaque étape. Mais plus le pas de temps est petit, plus le calcul est long et gourmand en ressources. Pour trouver un compromis, on s'attache en général à ce qu'une particule de fluide parcourt moins d'une maille entre chaque pas de calcul, c'est-à-dire à avoir un **nombre de Courant**, appelé dans le milieu CFL (condition de Courant, Friedrichs et Lewy) :

$$nombre\ de\ Courant = \frac{vélocité\ \times pas\ de\ temps}{taille\ d'éléments}$$

Nous avons cependant réalisé une partie de ces calculs en mode stationnaire car c'est un mode de calcul plus rapide au début de la recherche. P

Une fois que les hypothèses ont été précisées, nous avons réalisé par la suite plusieurs calculs en mode instationnaire plus proche d'un écoulement d'air non laminaire.

Le régime stationnaire peut être considéré comme une moyenne temporelle de l'écoulement instationnaire. Mais ce calcul est très long sur le matériel disponible pour cette recherche(Processeurs 4 cœurs) et ceci n'a pas été possible dans les moyens accordés à cette thèse.

Cependant ce type de calcul a surtout un impact sur le calcul de la force de trainée à l'éloignement du bâtiment. Hors cette zone n'est pas notre objet d'étude principal, car nous cherchons plutôt à évaluer les augmentations de vitesse au niveau des « bords » du bâtiment.

Nous nous intéressons aux zones de décollement ou de compression de l'air à proximité immédiate du bâtiment, où le modèle stationnaire est proche du comportement aéraulique en instationnaire.

- *Convergence du maillage*

Lors des simulations éléments finis, un maillage plus dense fournit des résultats plus précis.
D'un autre côté, plus le maillage est important, plus le temps de calcul est long. Le choix du maillage permet d'avoir un bon compromis entre le temps de calcul et une précision satisfaisante, cela à travers une étude de convergence de maillage.
Voici les principales étapes dont nous parlons ici afin de proposer une convergence du maillage manuelle :

- Création d'un maillage en utilisant un nombre raisonnable d'éléments, puis analyser le modèle.
- Recréer le maillage en augmentant la densité de maillage, le recalculer, comparer les résultats avec le premier calcul.

- Continuer à augmenter la densité de maillage, réanalyser le modèle ; puis vérifier que les résultats convergent de manière satisfaisante.

Ce type d'étude de convergence de maillage permet d'avoir une solution précise, avec un maillage suffisamment dense, sans demander des ressources informatiques trop élevées.

3.2.4 Le facteur de similarité pour l'étude à échelle réduite : le nombre de Reynolds[115]

En 1883, les expériences réalisées par l'ingénieur et physicien Osborne Reynolds ont permis de montrer l'existence de deux régimes d''écoulement : le régime laminaire et le régime turbulent. Au cours de ses expériences, O. Reynolds a injecté du colorant en amont d'une conduite cylindrique rectiligne transparente dans laquelle s'écoulait un liquide avec un débit contrôlé par une vanne située en aval, ce qui a permis de visualiser la formation d'un fluide coloré. Il s'est intéressé à divers paramètres comme la viscosité du fluide, le débit et le diamètre de la canalisation (Voir Figure 116) . En faisant varier ces grandeurs, il a pu observer trois principaux comportements du filet de fluide :

$$Re = \frac{résistance\ initiale}{résistance\ visqueuse} = \frac{\rho v \ell}{\eta}$$

Re = Nombre de Reynolds
ρ = Densité du fluide
v = Vitesse relative du fluide
ℓ = Longueur caractéristique du système
η = Viscosité mécanique du fluide

- Comportement A : le filet de fluide coloré adopte un mouvement régulier : les lignes formées sont sensiblement parallèles et se diffusent très lentement. Il s'agit du régime laminaire.

- Comportement B : le filet de fluide coloré a une forme chaotique et instable : les lignes s'entremêlent et se diffusent dans toutes la section de la conduite, ce qui constitue le régime turbulent.

  Le passage du comportement A au comportement B est réalisé par l'intermédiaire d'un autre état, le comportement C, au cours duquel les lignes colorées présentent des oscillations. C'est le régime transitoire.

[115] Glenn ELERT, *Flow Regimes*, https://physics.info/turbulence/, consulté le 20 juillet 2020.

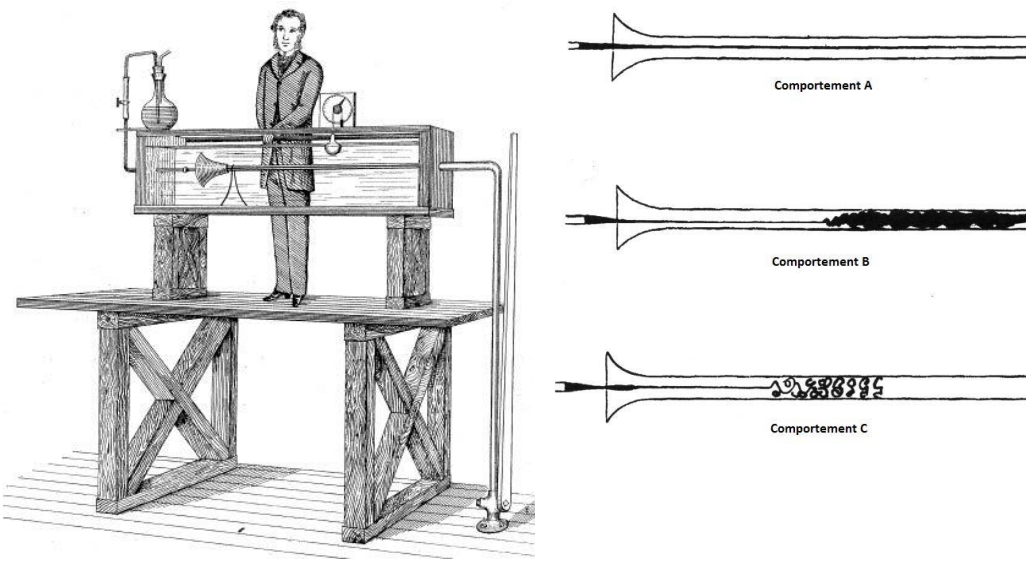


Figure 117. Expérience de O. Reynolds : présentation du dispositif (à gauche) et représentation des principaux comportements A, B et C des filets de fluide colorés obtenus

Dans la conception architecturale ou industrielle, lorsqu'un navire, un avion ou un bâtiment doit être fabriqué, un modèle à l'échelle est construit et testé afin que les performances de l'objet réalisé puissent être calculé à partir des résultats des tests du modèle réduit. Lord Rayleigh a montré que les tests du modèle à échelle réduite n'ont donné des résultats comparables que lorsque le facteur non-dimensionnel du modèle est égal à celui de l'objet réalisé lorsqu'il travaille dans les conditions de conception. En assimilant le facteur non dimensionnel de l'objet réalisé à celui du modèle, on obtient la vitesse de test du modèle. C'est ce qu'on appelle **la vitesse correspondante et la comparaison des deux conditions entre l'objet réel et les résultats du test d'un modèle réduit à sa vitesse correspondante est connue comme le principe de similarité dynamique**.

En 1921, plus d'une vingtaine de souffleries avaient été construites dans le monde. Cependant, toutes celles de taille substantielle fonctionnaient à des pressions atmosphériques normales. Cela signifiait que les résultats expérimentaux obtenus à l'aide de modèles réduits dans les tunnels étaient discutables, car un paramètre spécial appelé le nombre de Reynolds ne correspondait pas à ceux rencontrés lors des vols réels d'aéronefs à grande échelle. En d'autres termes, le nombre de Reynolds de modèles à l'échelle 1/20 testés à des vitesses de vol opérationnelles serait trop faible d'un facteur de 20. Les expériences classiques de Reynolds avaient montré que les conditions d'écoulement de l'air pouvaient être radicalement différentes pour les modèles réduits et les avions à grande échelle. Le nombre de Reynolds étant également proportionnel à la densité de l'air, une solution évidente au problème des effets d'échelle serait de tester 1 / 20 modèles à l'échelle à une pression de 20 atmosphères. Le nombre de Reynolds serait alors le même dans les essais en soufflerie et les vols réels à grande échelle[116].

[116] *Ibid.*

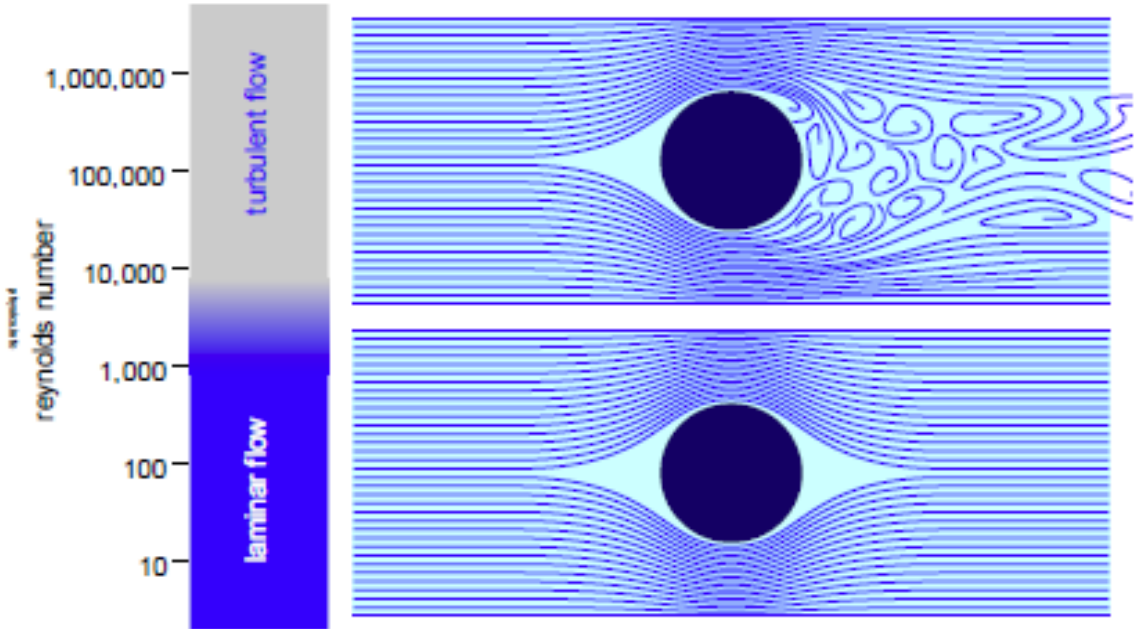


Figure 118. Régimes des flux

3.2.5 Classification des écoulements[117]

Les régimes d'écoulement d'un fluide peuvent être classifiés en fonction du nombre de Reynolds de l'expérience (Figure 117) . Nous pouvons rappeler ici, les régimes d'écoulement autour du cylindre circulaire à parois lisses observés par B. Mutlu Sumer et J. Fredsoe :

Pour Re < 0,5 (Figure 118), les lignes de courant sont symétriques entre l'amont et l'aval du cylindre. L'écoulement est dit **laminaire** et les forces sur le cylindre sont principalement d'origine visqueuse. La séparation de la couche limite a lieu lorsque le nombre de Reynolds est supérieur à 5.

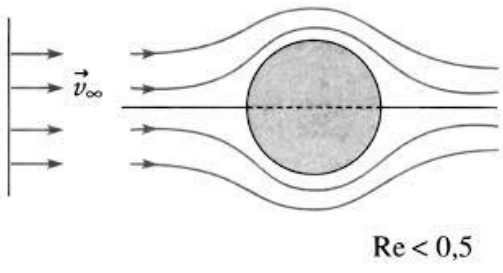


Figure 119. Re < 0,5: Pas de séparation, écoulement rampant

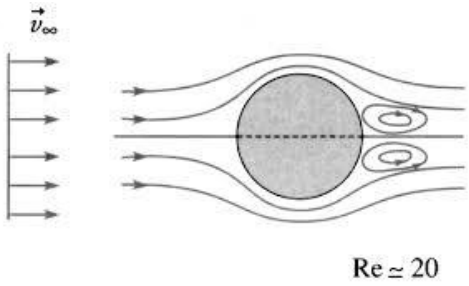


Figure 120. 5 < Re < 40 : Paire de tourbillons de recirculation symétriques

[117] Mme HELOISE, M ALAIN, M BRUNO, Mme VANESSA, M BONIFACE, M STEPHEN et INRIA SOPHIA-ANTIPOLIS, « Simulation numérique d'´écoulements autour de corps non profilés par des modèles de turbulence hybrides et un schéma multirate », p. 210.

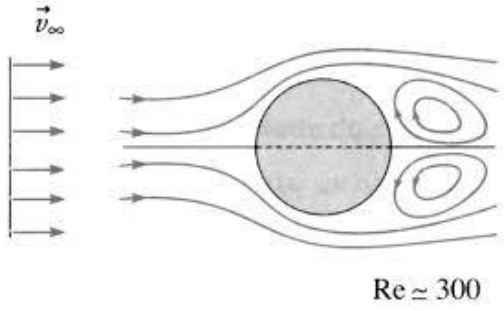


Figure 121. 40 < Re < 180 : Transition vers la turbulence dans le sillage

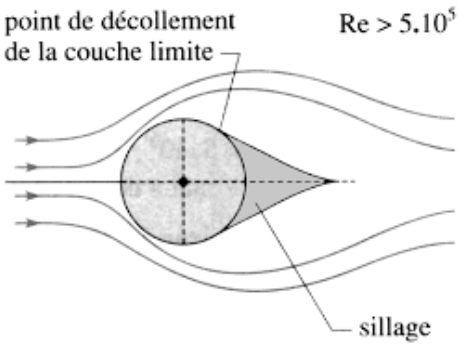


Figure 122. Régime sous-critique : 300 < Re < 3 x 10^5

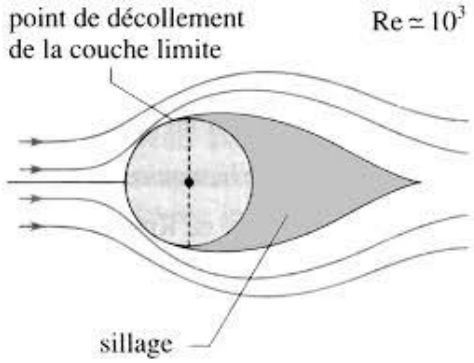


Figure 123. La moyenne du coefficient de portance est non nulle dans le régime critique 3x105 < Re < 3.5 x105

Pour 5 < Re < 40 (Figure 119), les forces d'inerties augmentent ce qui provoque un détachement de la couche limite en arrière de l'obstacle. Ainsi une zone de recirculation stable se forme en aval du cylindre et sa taille augmente avec le nombre de Reynolds s'accompagnant au fur et à mesure d'un déplacement en amont du point de détachement. Cette zone est constituée d'une paire fixe de tourbillons, symétriques par rapport à l'axe longitudinal et attachés au cylindre. L'écoulement est dit **stationnaire décollé**.

Pour 40 < Re < 180 (Figure 120), le sillage de l'écoulement devient asymétrique et instable. Ce qui donne naissance au phénomène de **détachement tourbillonnaire** : des tourbillons se forment de chaque côté du cylindre et sont alternativement convectifs dans le sillage formant une allée de tourbillons laminaire, appelée allée de Von Karman[118]. Ce détachement se fait de manière périodique et bidimensionnelle, c'est à dire que le détachement n'a pas lieu dans la direction transverse.

Pour 300 < Re < 3 x 10^5 (Figure 121), l'écoulement en aval du cylindre devient totalement turbulent, les tourbillons se détachent du cylindre au-delà de la couche limite et se comportent de manière chaotique dans le sillage. La couche limite en amont du point

[118] *Le phénomène de détachement tourbillonnaire a tout d'abord été étudié expérimentalement par Henri Bénard en France, puis théoriquement par Theodor Von Karman en Allemagne. Il est créé au sein de la couche limite et dépend du nombre de Reynolds. Lorsque le nombre de Reynolds est compris entre 48 et 300, les tourbillons créés pour un Re inférieur à 48 deviennent instables.*

de détachement reste toujours laminaire. Cette plage de Reynolds correspond au régime sous-critique.

Pour 3x 105 < Re < 3.5 x 10^5 (Figure 122), le régime critique est atteint. La couche limite reste laminaire d'un côté du cylindre. De l'autre côté, elle est en partie turbulente et se détache plus loin en aval de l'obstacle, ce qui réduit la zone de recirculation et se traduit par une diminution brutale du coefficient de traînée. La portance moyenne du cylindre n'est plus égale à zéro sur cette plage de nombre de Reynolds en raison du caractère asymétrique de l'écoulement. En aval du cylindre, l'écoulement est turbulent et **le nombre de Strouhal**[119] jusque-là égal à 0.2, subit une variation brusque pour Re = 3.5 x 10^5, sa valeur atteignant 0.45.

Pour 3.5 x 10^5 < Re < 1.5 x 10^6, on parle du régime supercritique. La couche limite est turbulente au décollement sur les deux côtés du cylindre et la transition est localisée entre le point de stagnation et le point de séparation.

Pour 1.5 x10^6 < Re < 4 x 10^6, c'est la transition haute. La couche limite est complétement turbulente sur un côté du cylindre et partiellement laminaire et turbulente sur l'autre côté.

3.2.6 La mécanique des fluides numérique (CFD – computer fluid dynamics)

L'étude numérique de la dynamique des fluides (CFD) consiste à étudier les mouvements d'un fluide, ou leurs effets, par la résolution numérique des équations régissant le fluide. En fonction des approximations choisies, qui sont, en général, le résultat d'un compromis en termes de besoins de représentation physique par rapport aux ressources de calcul ou de modélisation disponibles, les équations résolues peuvent être les équations d'Euler, les équations de Navier-Stokes, etc.

La CFD est devenue récemment un outil essentiel dans pratiquement toutes les branches de la dynamique des fluides, de la propulsion aérospatiale aux prédictions météorologiques en passant par le dessin des coques de bateaux. Dans le domaine de la recherche, cette approche est l'objet d'un effort important, car elle permet l'accès à toutes les informations instantanées (vitesse, pression, concentration) pour chaque point du domaine de calcul, pour un coût global généralement modique par rapport aux manipulations expérimentales correspondantes.

[119] Le nombre de Strouhal (St) est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante.
Ce nombre porte le nom de Vincent Strouhal, physicien tchèque. Physiquement, il représente le rapport du temps d'advection et du temps caractéristique de l'instationnarité. Si St < 1, l'écoulement est dit quasi stationnaire3.

3.2.7 Méthodologie de travail en mécanique des fluides numériques

De manière générale, la résolution numérique d'un problème de mécanique des fluides passe par trois grandes phases :

1. La préparation du problème : ceci passe par la définition d'une géométrie, d'un maillage discrétisant le domaine de calcul, du choix des modèles et méthodes numériques employés ;

2. La résolution numérique du problème qui passe par l'exécution d'un programme informatique. Bien des problèmes suscitant un minimum d'intérêt nécessitent des ordinateurs aux très grandes capacités ;

3. L'exploitation des résultats : on vérifie d'abord leur cohérence, puis ils sont examinés afin d'apporter des réponses aux questions posées par le problème de MFN de départ.

L'exploitation des résultats passe le plus souvent par des logiciels de post-traitement scientifique utilisés dans de nombreuses branches de la physique, ou bien par les modules de post-traitement disponibles dans certains logiciels de simulation dynamique de fluides.

3.2.8 Choix de l'outil numérique pour la simulation numérique aéraulique

Un certain nombre de logiciels existent et ont fait leur preuve dans la simulation aéraulique à l'échelle urbaine et architecturale. Nous avons pu tester au démarrage de cette thèse plusieurs outils telles que : ANSIS Fluent, Flow Design, STAR-CCM+, Simscale.

Le code de calcul est spécifique à chaque outil mais les résultats de simulation peuvent être relativement similaires. Leurs différences se jouent dans les modes d'import et d'export des données du calcul, dans leur capacité à adapter le modèle et l'environnement numérique au type de simulation, dans leur niveau de précision, dans leur rapidité de calcul, et surtout dans leur mode d'optimisation des données à extraire en fin d'expérimentation (limiter les temps de calcul)

Nous avons en définitive choisi STAR-CCM+ comme logiciel de CFD (Computational Fluid Dynamic) utilisé pour les calculs de cette thèse. Cet outil est propriété du groupe Siemens depuis 2016. Le point fort de ce code de calcul est qu'il permet de résoudre simultanément les problèmes de flux et d'échange thermique, contrairement à d'autres codes ou ces éléments sont dissociés. D'autre part, au vu de la précision de l'outil et de sa capacité de paramétrage, c'est un outil relativement rapide pour le calcul.

Il est à noter cependant que certains calculs ont pris plusieurs semaines à réaliser et on parfois fait l'objet d'une simplification (par exemple de mode instationnaire à stationnaire ou de simulation d'un modèle 3D à un modèle 2D) afin de limiter les temps de calculs à des durées inférieures à 1 semaine sur l'équipement informatique disponible pour cette thèse.

STAR-CCM+ n'est pas d'un simple solveur CFD. En effet, il fournit une suite de **composants intégrés pour les besoins de modélisation**. Ces composants comprennent :

- Modélisateur 3D-CAD et CAO

- Outil de préparation de surfaces
- Technologie de maillage automatique
- Une variété de modèle physique (turbulence, combustion..)

STAR CCM+ a été choisi pour ce travail de thèse car il est mis à disposition par le co-directeur de cette thèse Jean Denis Parisse, et qu'il a fait ces p**reuves sur ces calculs de bâtiment de grande échelle** telles que l'immeuble « the Shard » à Londres, et celui du World Trade Center de New York .

3.2.9 Notion de maillage pour l'étude numérique[120]

Plusieurs éléments caractérisent le maillage pour l'étude de l'écoulement d'air dans une zone : l'orientation de la cellule, sa forme, son volume, son type de déformation, et son mode de tessellation d'une surface. Précisons ici les critères importants et la cohérence entre eux pour générer un maillage optimal d'une zone d'étude.

- *Le volume*

Le ratio de variation de volume décrit le rapport du volume d'une cellule à celui de son plus grand voisin (Figure 123) . Une valeur de 1,0 indique que la cellule a un volume égal ou supérieur à ses voisins. Comme le volume de cellule diminue par rapport à ses voisins (comme un ruban ou une cellule plate), alors la ration de variation de volume peut être utilisé pour catégoriser cette cellule. Une grande variation de volume de volume d'une cellule à l'autre peut entraîner des inexactitudes potentielles et l'instabilité dans les solveurs. Les cellules avec un changement de volume de 0,01 ou moins sont considérées comme des cellules non adaptées au calcul.

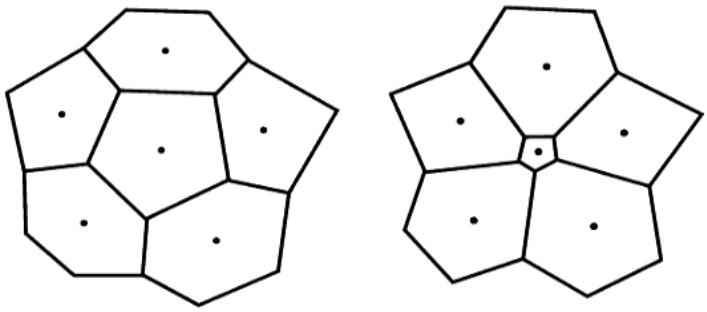


Figure 124. Le schéma de gauche montre une meilleure répartition des changements de volume de cellule

- *Angle de déformation*

Cette mesure d'asymétrie est conçue pour identifier si les cellules de part et d'autre d'une maille sont formées de manière à permettre la diffusion de quantités sans que ces quantités ne deviennent illimitées.

Des angles de déformation égaux ou supérieurs 90°aboutissent typiquement à des problèmes de convergence du solveur. Les problèmes résultent du fait que la formulation du terme de diffusion pour les variables scalaires transportées contient le produit scalaire a.ds dans le

[120] *Notion de maillage dans Star-CCM+*, http://hmf.enseeiht.fr/travaux/beiepe/book/export/html/1108, consulté le 20 juillet 2020.

dénominateur et ce produit de point est nul quand l'angle est 90 (Figure 124) . Même si STAR-CCM+ prend soin d'éviter une telle erreur de division par zéro, la précision du calcul de diffusion est réduite et il y a une perte de robustesse dans de tels cas.

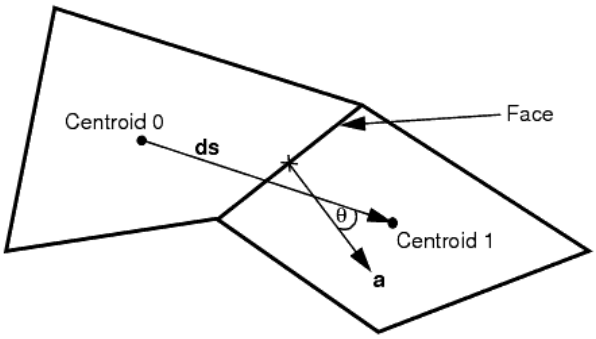


Figure 125. L'angle de déformation de la cellule

- *Maillage Polyhédrique*

Le maillage polyédrique fournit une solution équilibrée pour les problèmes de géométrie complexe.
Ils sont relativement faciles et efficaces à construire, ne nécessitant pas plus de préparation de surface que le maillage tétraédrique. Ils contiennent également approximativement cinq fois moins de cellules qu'une maille tétraédrique pour une surface de départ donnée. Les maillages multi-régions avec une interface maillage conforme sont autorisés.

- En raison du bon comportement de croissance, les polyèdres sont généralement préférés lorsque les coefficients aérodynamiques sont d'une importance capitale.
- En raison de l'orientation pseudo-aléatoire des faces, les polyèdres donnent aussi généralement de meilleurs résultats que les mailles coupées quand on utilise de grands balayages dans la direction de l'écoulement (tels que l'angle d'attaque ou de glissement).

- Les mailles polyédriques typiques contiennent de 2 à 20 millions de cellules, selon la complexité de la géométrie et du champ d'écoulement, et le traitement à proximité de la paroi.

- *Maillage Hexaédrique (Trimmer)*

Par défaut, le modèle de maillage « trimmer », une fonction de STAR CCM+, utilise un maillage construit à partir de cellules hexaédriques, à partir de laquelle on peut sous-diviser le maillage de base.
- Dans une simulation avec un sens d'écoulement, ou seulement une petite variation d'écoulement, le maillage avec les lignes de grille alignées avec le flux fournit souvent l'approche la plus adéquate pour obtenir de bonnes réponses.
- Les mailles créées typiques contiennent de 4 à 40 millions de cellules, selon la géométrie et le champ d'écoulement, et le traitement à proximité de la paroi.

3.3 METHODE DE MODELISATION ET DEFINITION DES CONDITIONS INITIALES DE LA SIMULATION

Notre simulation d'écoulement de vent porte surtout sur des simulations 2D, plutôt que des simulations 3D, afin d'avoir une lecture plus précise des phénomènes en cours. Elles seront basées sur des coupes d'un modèle 3D de bâtiment ou d'un site. Nous identifierons ici les étapes suivantes pour définir les hypothèses dès l'analyse, le modèle de calcul et les conclusions de chaque analyse à savoir :

1- Définition et modélisation de la géométrie
2- Choix du type de maillage et génération
3- Choix des modèles de calcul
4- Définition des conditions initiales et des conditions limites
5- Résultats et analyses

3.3.1 Définition et modélisation de la géométrie

En tant qu'architecte, nous avons une palette d'outil très large pour la modélisation 3D ou 2D de géométrie. L'échelle du bâtiment, le niveau de détail, le type de lignes et de courbes (droites, splines) la définition des surfaces (Nurbs, polygonal), le type de tessellation (triangulations…) sont un univers que les architectes définissent à chaque projet en fonction des résultats recherches, modélisation simple de visualisation, modélisation collaborative pour interopérabilité type BIM, paramétrique, modélisation pour fabrication numérique du projet, sont autant de critère qui rentre dans le choix d'un type de géométrie, d'un logiciel, et d'une fonction générative.

Nous avons cherché, au fil des études et des simulations, à trouver la méthode la plus claire pour comparer les flux et leur impact autour des bâtiments, et pour visualiser ces écoulements assez complexes. Le choix, très vite, a été de laisser la place à de simple coupes qui montre un mouvement d'air dans une section d'air plutôt que dans toute sa complexité spatiale. Cette méthode clarifie les résultats et leur comparaison, réduit les temps de calcul, et impact de la complexité des écoulements sur une surface.

Nous avons donc travaillé à construire un maillage en **2 dimensions** en choisissant un **maillage polygonal plutôt que carré afin d'optimiser les nombres de mailles du modèle.**

Pour analyse, nos bâtiments ou environnements urbains, nous avons été particulièrement attentifs aux éléments suivants :

- Le rapport au sol et aux conditions limites de la géométrie
- Le traitement de la façade et son retour en toiture
- La direction du vent et l'impact du contexte sur cette entrée d'air.
- Le domaine de l'étude (aire)

L'écoulement d'air sur une géométrie est très impacté par ces différents critères qui doivent être ajustés au plus précis (Figure 125).

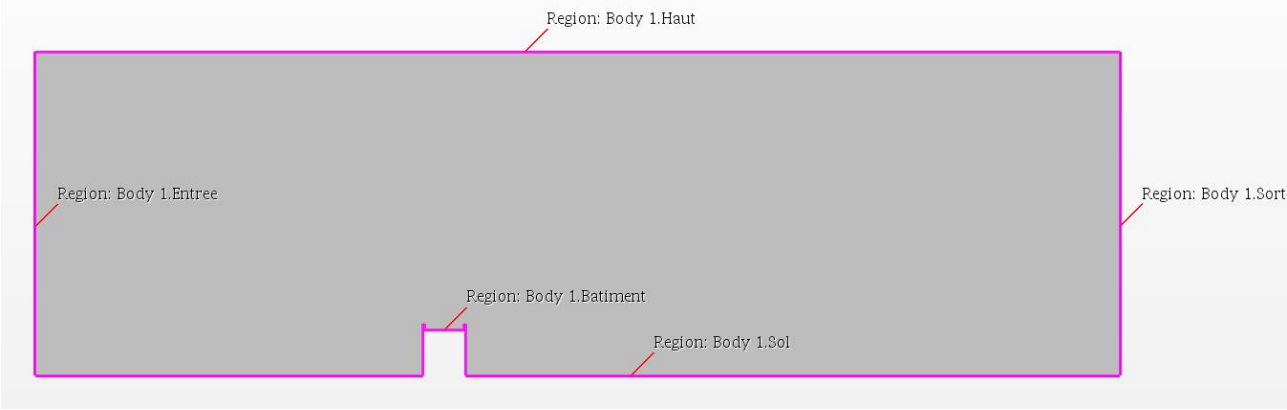


Figure 126. Définition du domaine d'analyse et des conditions aux limites du domaine

- *La géométrie*

1. Nous avons créé un rectangle sous 3D-CAD comprenant un point supplémentaire sur le côté "entrée". Dans notre étude, le carré sera de longueur 100 m et la hauteur d'air de 25 m.

2. Puis son sketch et extrudé sur une petite profondeur (nous travaillerons en 2D). Puis nous avons renommé ensuite les différentes faces de la façon suivante :

- **Air Inlet** : entrée de l'air
- **Bottom** : centre de symétrie de l'enceinte
- **Top** : limite haute de l'enceinte pour l'analyse (selon Y)
- **Outlet** : limite selon X de l'enceinte pour l'analyse

La conversion en 2 dimensions se fera une fois le maillage généré. A ce stade nous avons donc une géométrie 3D à 7 faces différentes.

- *Choix du maillage*

Après avoir créé la géométrie, Il est très important de choisir un maillage adapté pour un calcul court et précis.

Pour illustrer l'importance du maillage nous avons testé trois maillages de résolutions différentes.

Le premier maillage (figure 126) crée est un maillage hexagonal non raffiné, sur tout le domaine. Les mailles sont de longueur 0.0015m pour les plus raffinées et 0.003m pour les plus grossières. Ce qui donne un total de 5200 mailles sur notre domaine. Nous avons créé un bloc volume shapes sur toute la longueur du maillage comme expliqué.

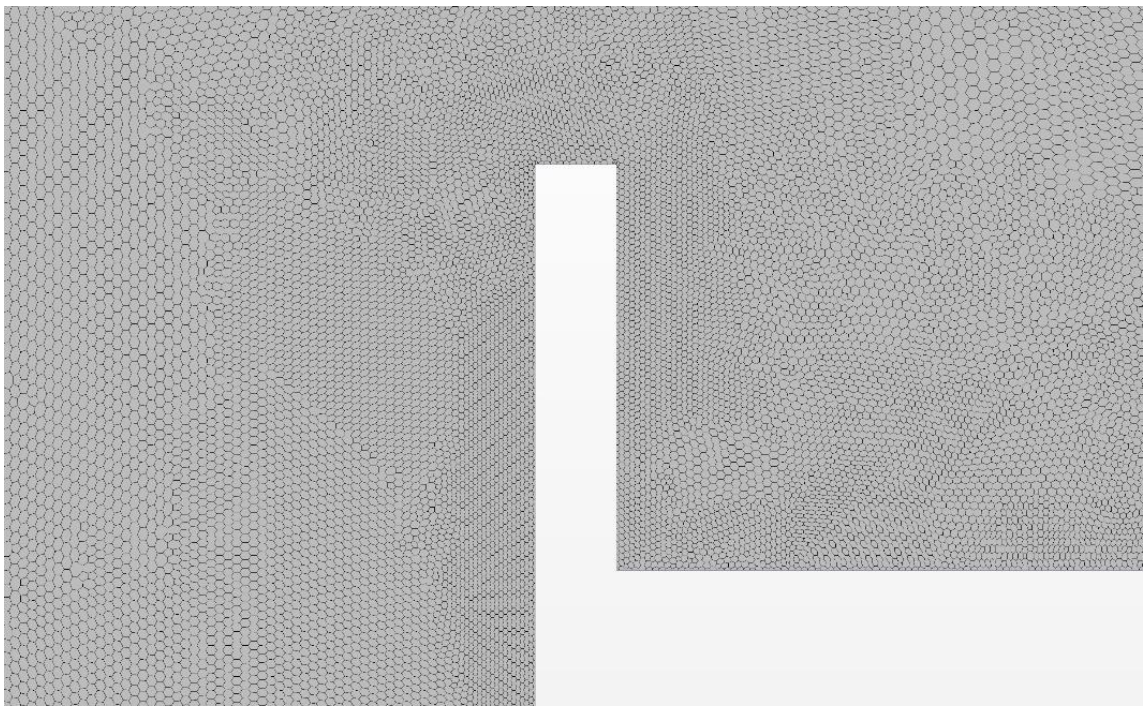


Figure 127 Détail sur un maillage généré autour du bâtiment à étudier

Le second maillage créé est un maillage hexagonal raffiné, sur toute la longueur du volume. Les mailles sont de longueur 0.00015m pour les plus raffinées soit 10 fois plus petites que précédemment. On a donc **572,414 cellules** ; **1,706,838 faces** et **1,138,034 verts**. Sur notre domaine. Ce maillage est moins raffiné sur le haut de mur central. Pour créer ce maillage, nous avons créé un second volume Shape sur la moitié du carré du volume.

Si l'on zoom sur l'intersection des deux rectangles blocs de maillage, on peut voir un peu plus le raffinage de ce second maillage.

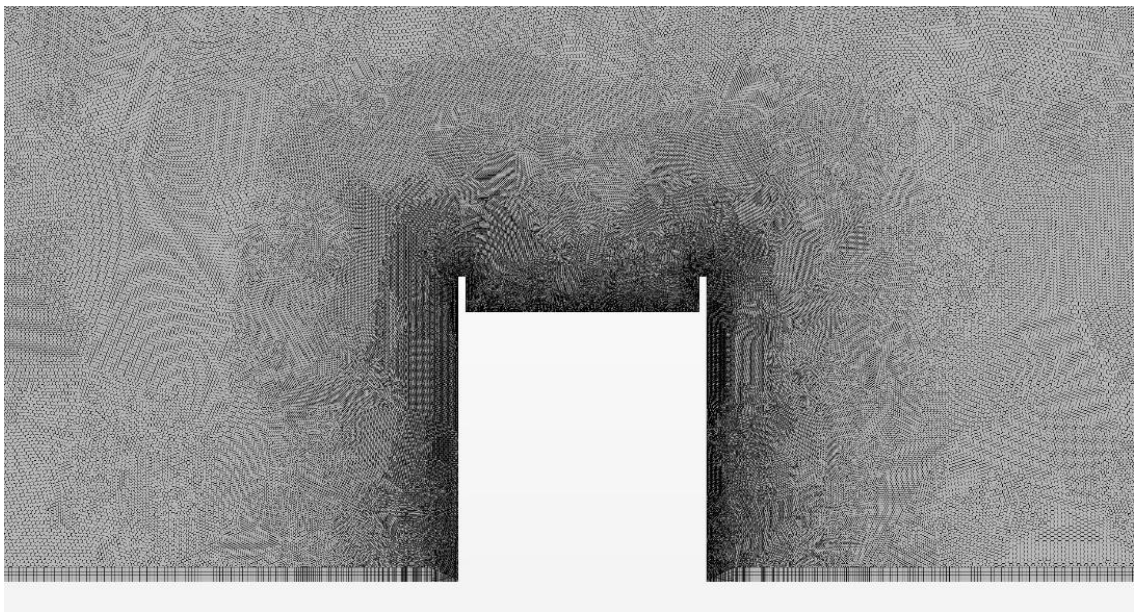


Figure 128 Détail du maillage sur la zone autour du bâtiment

Le dernier maillage a été créé après avoir été confronté à des divergences de calcul dues au maillage trop grossier en sortie. Il est donc indispensable pour notre problème d'avoir un maillage très raffiné sur toute la continuité des acrotères (quelques centimètres au-dessus pour

ne pas voir diverger le calcul). Le raffinement proche de la surface "top" est inutile pour notre calcul, cela économise du temps de calcul d'y associer un maillage grossier.

Pour créer ce maillage, il est nécessaire d'avoir un troisième bloc de raffinements (ou un unique bloc de paramètres différents). Le troisième bloc doit ainsi prendre toute la longueur de la géométrie.

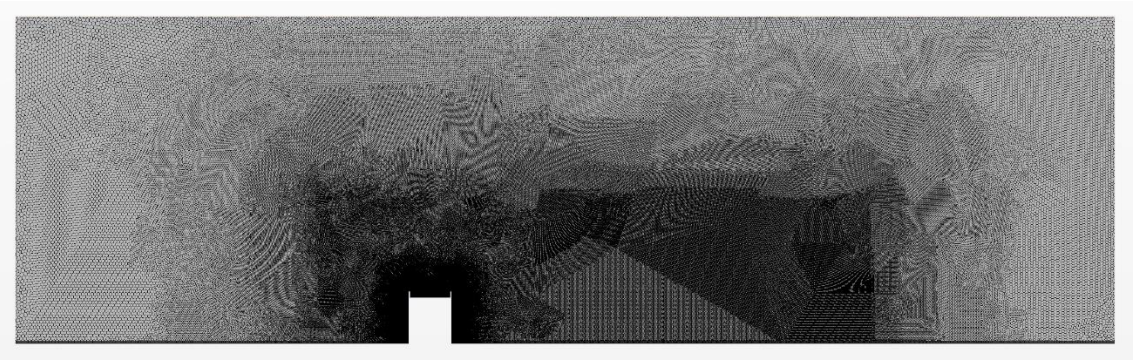


Figure 129 Détail d'un maillage général du domaine

Les temps de calcul des 3 maillages sont très différents (Figures 126, 127 et 128) . Il est évident que le maillage très raffiné prendra beaucoup plus de ressources, de mémoire et de temps CPU pour le calcul. Néanmoins dans notre situation, il est indispensable d'avoir cette précision pour pouvoir visualiser le phénomène. Il s'agira donc de bien choisir ultérieurement les modèles de maillage pour économiser du temps de calcul.

Des problèmes de convergence peuvent intervenir lors du choix d'un maillage grossier. Nous avons utilisé pour la modélisation le maillage raffiné.

Après avoir défini le maillage, pour le générer, nous avons utilisé la fonction **Mesh>badge for 2D meshing**. Il est important de sauver ce fichier pour pouvoir modifier ultérieurement ce maillage si nécessaire, une fois passé en 2D toutes les options ne seront plus disponibles.

Une fois enregistré nous pouvons augmenter le maillage avec **Mesh> automated mesh(2D).** Choisir polygonal mesher et ajouter Prism layer Mesher sur le bottom (sol) avec la valeur de 5

Le maillage est maintenant en 2 dimensions.

3.3.2 Définition des paramètres du calcul

Nous allons maintenant détailler les choix de modèles possibles pour modéliser ce bâtiment.

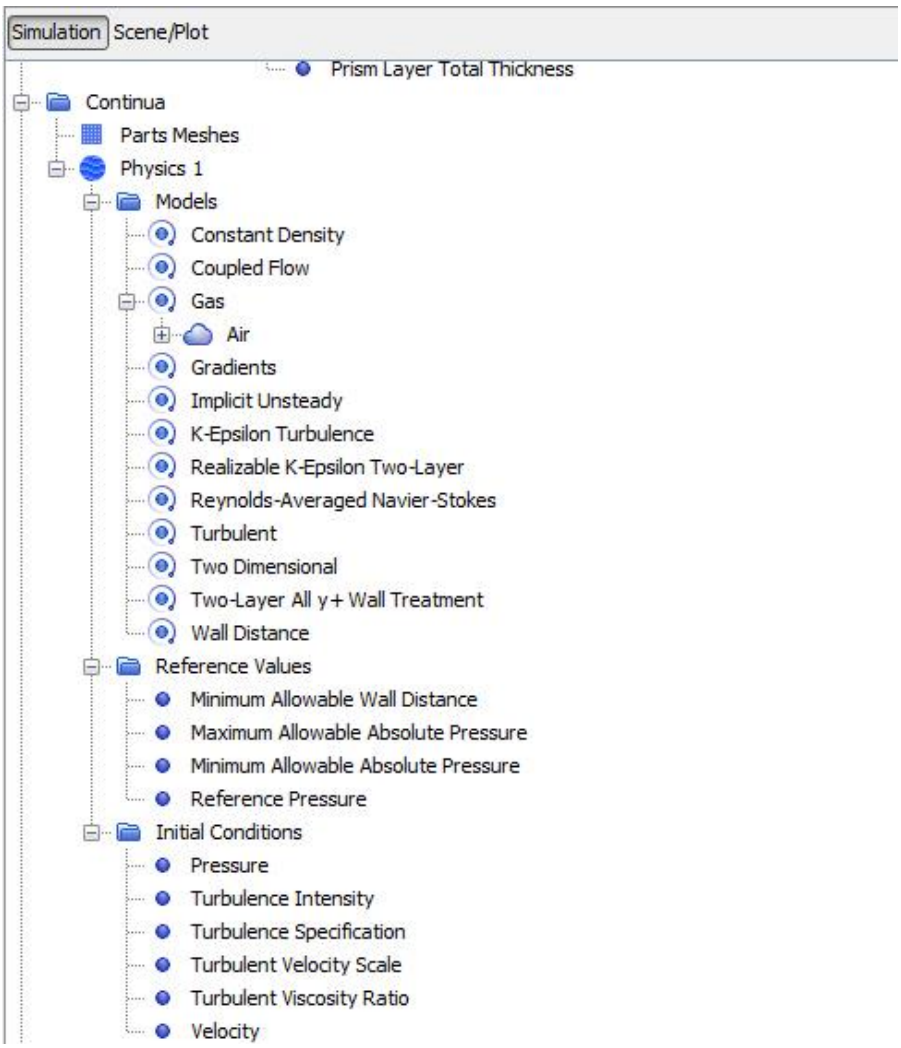


Figure 130 Extrait de la fenêtre de programmation de la simulation

- *Gradients*

Les gradients sont utilisés dans plusieurs termes de la solution de l'équation de transport.

- La reconstruction des valeurs des champs dans les faces des cellules.
- Les termes diffusifs.
- Le gradient de pression pour le modèle coupled Flow.
- La vitesse de déformation et la vitesse de rotation pour les modèles turbulents.

Cette option est automatiquement cochée.

- *Turbulent*

Modèle d'écoulement turbulent comme souhaité.

- *K-Epsilon Turbulence & Realizable K-Epsilon Two Layer*

On sélectionne le modèle k-epsilon dans la résolution de l'écoulement turbulent.

- *Reynolds-Averaged Navier Stokes*

Les équations de Navier-Stokes sont moyennées, ce qui est indispensable pour toute analyse en turbulence.

- Two-Layer All y+ Wall Treatment

Le Two-Layer all y+ Treatment est le traitement intermédiaire entre le high-wall treatment et le low y+ treatment. En effet, il tente d'utiliser le high wall treatment pour les maillages grossiers et le low y+ treatment pour les maillages plus raffinés. Il est également possible de résoudre des maillages intermédiaires avec cette option. Notre maillage contenant des blocs grossiers et d'autres fins, c'est l'option à choisir.

- *Implicit Unsteady*

En choisissant le modèle Coupled Flow, le modèle de solver Implicit Unsteady est l'alternative du mode permanent.

- *Two dimensional*

Notre problème est en 2 dimensions ce qui oblige à cocher cette option.

- *Choix des conditions limites et initiales*

Nous avons désormais défini la géométrie ainsi que le maillage de notre bâtiment. C'est le moment pour nous de choisir nos conditions limites et initiales qui vont boucler notre problème.

- Conditions limites

La géométrie 2D comprend 5 surfaces qui nécessitent chacune une condition limite. Pour fixer une condition limite, nous avons utilisé : **Region > Region 2D > Boundaries**

Les surfaces soumises aux conditions limites sont les suivantes pour notre étude :

Air Inlet : Sélection d'une condition "Velocity Inlet" pour cette surface. Pour notre cas, entrons une Velocity de 5.0m/s. Dans les études, cette valeur est basée sur les relevés anémométriques insitu.

Bottom : Sélection de l'option "mur" et no-slip wall pour shear stress spécification et wall surface spécification est smooth. Avec la valeur de Von Karman constant qui est de 0.42.

Top : Sélection de l'option "Pressure Outlet", l'air est environnant tout autour de l'enceinte à la pression atmosphérique ; il faut donc laisser la valeur par défaut (0 Pa) puisque STARCCM+ travaille ici en valeur relative de pression par rapport à la pression atmosphérique.

Outlet : De même que Bottom, la sortie de l'enceinte est également composée d'air, sélection de l'option "Pressure Outlet" avec 0 Pa.

3.3.3 Conditions Initiales

Pour initialiser notre problème, il nous faut créer 3 "*Fields fonctions*".

Dans **Region > Region 2D > Initial Conditions > Species Mass Fraction**, sélectionner l'option "**Composite**".

Dans l'onglet **Tools > Fields functions**, cliquez droit sur **new**.

- *Propriétés du solveur*

Le solveur est l'outil de calcul des équations de la simulation. Ici la vitesse selon x dans les petites mailles : u=1m/s

Nombre de courant : 50

Longueur d'une petite maille : 0.00015m

Ce qui implique un pas de temps d'au maximum 0.0015s pour être stable. On choisira un pas de temps de 0.001s dans **Solvers > Implicit Unsteady** pour observer une convergence de nos calculs assez rapide**.**

- *Profil de vitesse de l'air*

La fonction Fields functions, permet de définir le profil de vitesse de l'air. Lors du maillage, il est important de mailler finement la zone de la couche limite car c'est une zone ou le gradient de de vitesse est important.
La variation de la vitesse moyenne de l'air est dépendante d'interactions complexes telle que : la stratification dans les basses couches, la turbulence thermique, la nature de rugosité rencontrées par le vent et sa distribution. La croissance de la vitesse de l'air varie aussi avec la hauteur par rapport au sol.
Lorsque les vents soufflent, les conditions de stabilité de l'atmosphère sont généralement neutres, et les phénomènes thermiques peuvent être négligés devant les phénomènes dynamiques du vent. La croissance de la vitesse moyenne avec la hauteur z peut être représentée par
Dans notre cas, le profil de vitesse des simulations est définit par le vent relevé sur place affecté d'un coefficient K qui correspond à la rugosité de l'environnement.

$$\vec{U}_z = \vec{U}_M \; x \; k$$

Avec :

Error! Bookmark not defined.$\vec{U}_z$: la vitesse moyenne du vent à la hauteur z,
K : Le coefficient de recalage dépendant de la rugosité du contexte (de 0,5 (espaces urbains ouverts ou dégagés) à 1,2 (Grande ville avec immeubles hauts)
$\vec{U}_M$: vitesse mesurée par l'anémomètre connectée sur place à une hauteur spécifique (h).

Cependant , dans la plupart des simulations que nous avons faites, nous n'avons pas saisi de profil logarithmique de la vitesse du vent lié à la couche terrestre. Les études ont été faite sur des zones spécifiques autour de bâtiment, où la couche limite n'a pas d'impact

significatif. D'autre part, les vitesses d'air utilisées dans les simulations sont choisies en relation aux mesures relevées par anémomètres connectés lorsque les bâtiments sont existants. Cette méthode fournit une précision supérieure à la l'utilisation d'un coefficient K de rugosité du contexte qui ne peut être approximatif dans un contexte urbain dense. Cette méthode est similaire au calcul réalisé dans une soufflerie physique où le profil de vitesse est uniforme en entrée d'expérimentation.

3.3.4 Résultats et analyse

Test du maillage et des modèles choisis :

- En premier lieu il convient de tester le maillage et les différents modèles. Pour cela, on lance une première simulation

Dans notre cas Ri= 2.5*10e-4 Typiquement pour Ri < 0.1 l'écoulement est turbulent, pour Ri < 0.25 l'écoulement est instable et peut donner lieu à une instabilité de Kelvin-Helmholtz.

A cause de la viscosité, la vitesse des fluides à l'interface a tendance à s'égaliser, ce qui induit un gradient de vitesse dans chacun des fluides. Il s'en déduit une dynamique de rotation et de tourbillons dans chaque fluide.

Les résultats obtenus à l'aide de STARCCM+ sont les suivants :

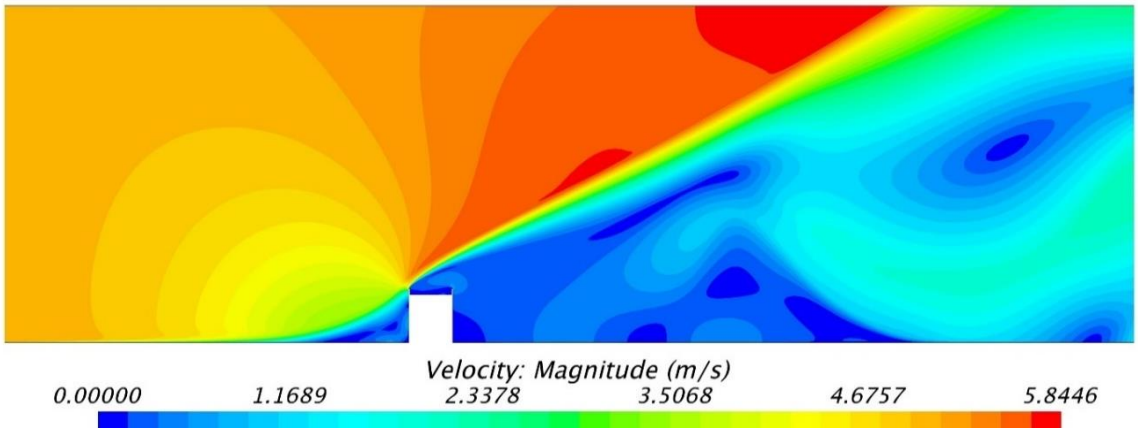


Figure 131. Répartition des vitesses d'air dans le modèle

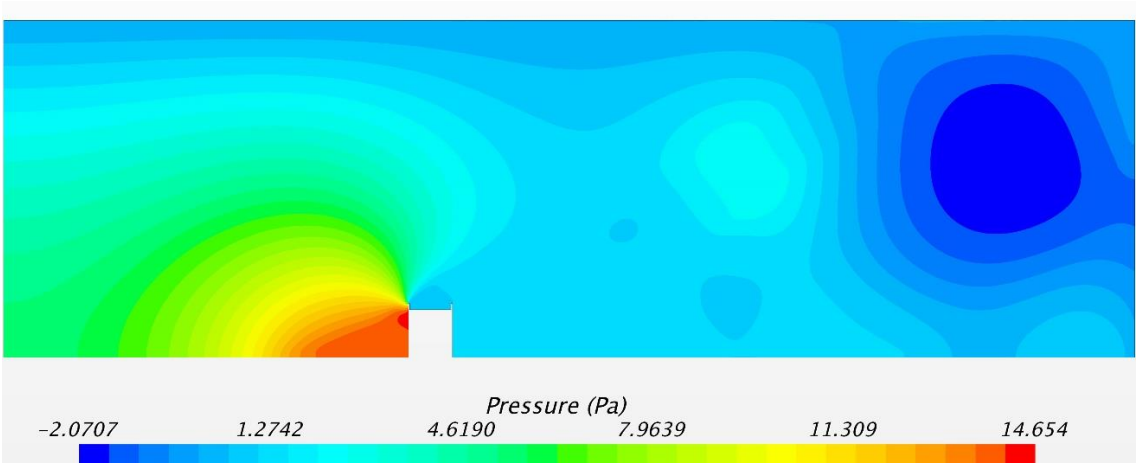


Figure 132. Répartition de la pression dans le modèle numérique

On obtient bien ce type d'instabilité avec notre simulation, la périodicité et le caractère tourbillonnaire prouvent qu'il s'agit très vraisemblablement de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz. Il nous faudra éviter ce phénomène pour la suite de notre étude.

- *Définition des conditions aux limites*

Maintenant que les conditions initiales sont définies, nous allons, à présent, définir les conditions aux limites de notre bâtiment.

- *Lancement des calculs*

Maintenant que tous les paramètres sont réglés, nous pouvons lancer les calculs. Mais, nous devons tout d'abord régler le pas de temps de chaque itération et le temps physique de la simulation (ou le nombre d'itérations)

Pour le pas de temps de chaque itération, il faut d'abord estimer les temps caractéristiques de tous les phénomènes physiques probables de se produire. Le pas de temps de la simulation doit être inférieur à tous ces temps caractéristiques.

Prenant comme taille caractéristique la taille de la plus petite maille (2 mm). La vitesse caractéristique est de 1m/s. La diffusivité de H2 dans l'air est de 61 mm^2/s.

Dans **Solver => Implicit unsteady** entrer la valeur de 0.001s dans **Time-step.**

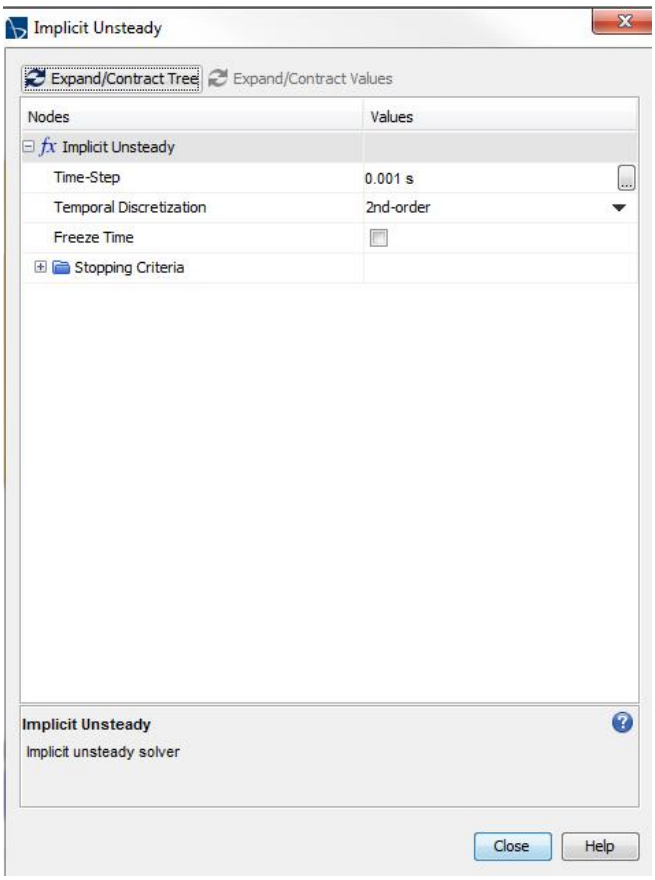


Figure 133 Extrait de la fenêtre STAR CCM+ de définition du Solver

Dans **Stopping criteria => Maximum Physical Time** entrer la valeur de temps de simulation. (Nous avons choisi 2s pour notre simulation)

Ces différentes configurations de l'environnement STARCCM+ permettent d'ajuster notre soufflerie virtuelle à nos objets d'étude : les bâtiments, avec leur échelle, leur volumétrie, leur frontalité au vent. Comment améliorer l'étalonnage de notre outil ? C'est le point que nous voyons dans la partie suivante.

3.4 SIMULATION NUMERIQUE D'UN DISPOSITIF EN TOITURE DE BATIMENT AVEC 3 TYPES DE CONDITIONS INITIALES

3.4.1 Définitions des conditions initiales de la simulation

Cette expérimentation met en œuvre le logiciel STAR CCM+ pour la simulation de comportement du vent d'un dispositif éolien en toiture d'un bâtiment afin de trouver la meilleure échelle, l'orientation, et le positionnement du dispositif en toiture. L'objectif de la recherche est double : localiser un générateur au point d'augmentation de la vitesse maximale du vent et d'autre part de limiter les turbulences dans le dispositif et dans sa périphérie.

Dans l'étude suivante, nous avons modélisé le comportement du vent sur 3 expérimentations différentes ou seules les conditions initiales et les paramètres du calcul varient, afin d'identifier leur impact sur les résultats produits.

La mise en œuvre de ce calcul se fait sur un profil 2D dessiné directement dans l'outil de modélisation de STARCCM+. Les éléments suivants décrivent la suite de commandes (en anglais) de l'interface de STARCCM+ utilisée pour préparer et lancer la simulation.

- *La géométrie*

1) Modélisation de l'aile à étudier

- Modélisation de l'aile dans le 3D CAD MODEL de Star CCM+

- Fermer la surface (option proposée lors de l'importation sur STAR-CCM+)

- *Donnée : la courbure de l'aile est de 2 mètres de rayon grandeur réelle.*

2) Définition du la zone d'étude appelée « Domaine »

- Créer la boîte (rectangle appelé « domain ») de dimension :

L= 0.30m (selon l'axe des x)

l = 0.20 m (selon l'axe des y)

c

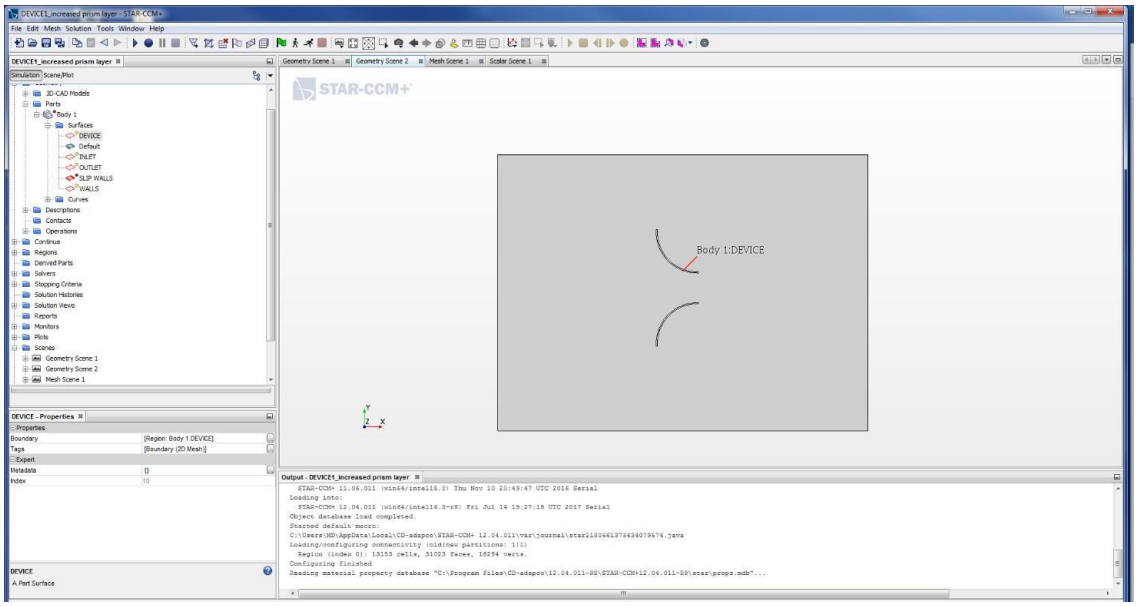


Figure 134. Star CCM+ Capture d'écran de la modélisation du profil à étudier

Positionnement de l'aile dans le domaine

- *Faces: bas=**bottom**, haut=**top**, gauche = **outlet**, droite =**inlet***

- Extrusion sur une profondeur quelconque (permet de faire l'opération « subtract » avec pour « target part » le domaine)

- Il ne reste qu'un « body » renommé domain.

- *Confection du maillage*

1) Paramétrage des éléments du maillage

- Geometry > operation > new > badge for 2D meshing (Input part= domain)

- Exécuter le **Badge for 2D meshing** (projette l'extrusion sur le plan z=0).

- Geometry > operation > new > **automated mesh (2D)** (Input part= domain)

- Meshers > Triangular mesher, Prism layer mesher

- Base size **0,01m**

	Relative to base size	Absolute
Target surface size	**1 %**	**1E - 4 m**
Minimum surface size	**1 %**	**1E - 4 m**
Surface curvature		**36**
Surface growth rate		**1,05**
Number of prism layers		**20**
Prism layer stretching		**1,2**
Prism layer total thickness	**20 %**	

2) Paramétrage des éléments spécifiques du maillage

a) définition des bords et de leurs effets

- Part surfaces: top, bottom, inlet, outlet.

- **Target surface size** > custom

Value: 300 % of base size (0,03m)

NB : les autres options sont laissées en mode « parent »

b) dispositif (device)

- Wake refinement: « specify wake refinement options » n'est pas nécessaire dans notre étude

Distance	**0,15 m**
Direction	**(0.97 , 0.26 , 0.0)**
Spread Angle	**0.3 rad**
Relative size	**100 % of base size (0,01m)**
Wake refinement > growth rate	**1.05**

*NB : La direction du wake refinement correspond à un angle de **15°** avec la direction définie par l'axe des x.*

3.4.2 Simulation N°1 d'un dispositif d'amplification du vent

Une fois la géométrie de l'aile modélisée, les conditions initiales saisies et le maillage réalisé, nous obtenons cette vue du profil et de la zone d'étude. Nous avons étudié une double courbe en forme d'entonnoir, sur une zone d'étude réduite. Le « spread angle » permet une utilisation du maillage à des angles entre 0° et une vingtaine de degrés. Cette première étude est lancée avec un maillage dense de 327 000 mailles et un régime instable arrêté à 3 :30min. Le temps de calcul de cette simulation est de l'ordre de 2 heures, en dépit du domaine relative petit de l'étude (50cmX30cm)

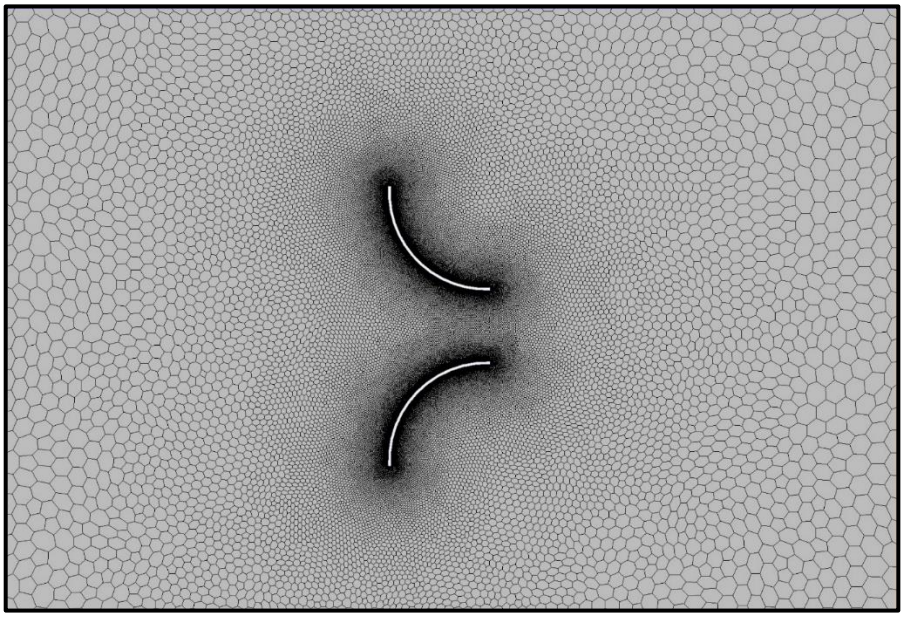


Figure 135. Star CCM+ - Vue du profil et du maillage 2D

Nombre de mailles : 327 057, Temps du calcul : à 3'30''- instable

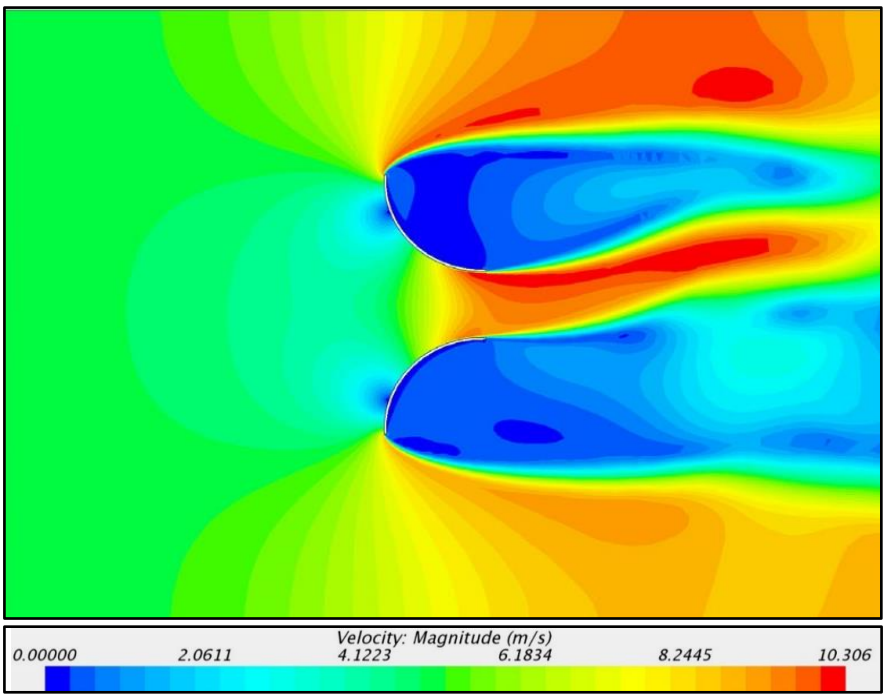


Figure 136. Star CCM+ -Magnitude des vitesses suite au lancement de la simulation

- *Choix des conditions physiques retenues*

1- Conditions initiales

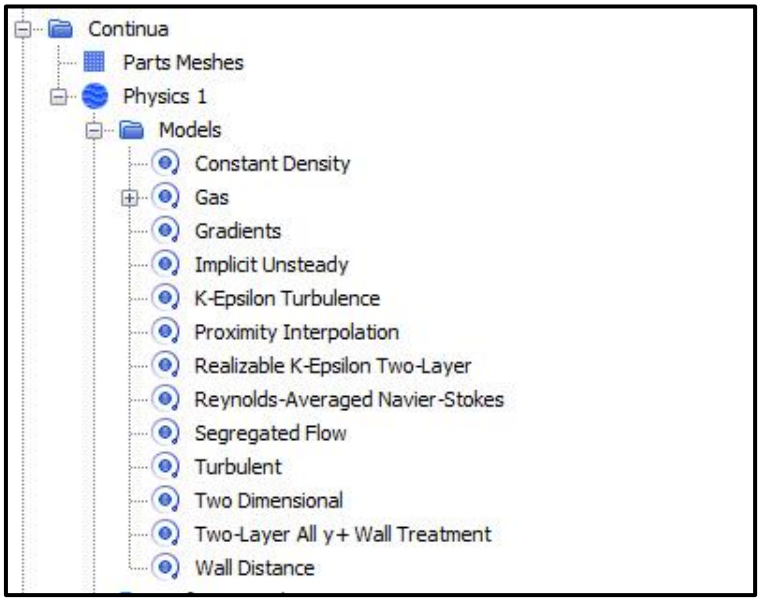


Figure 137. Fig. 86: Star CCM+ - Conditions initiales

- Vitesse prise égale en tout point à la vitesse d'entrée. *(Norme de 28,5 m/s pour les calculs menés).*

2- Modèle utilisé

- Continua > physics1

Définition de la simulation en régime permanent "Steady state simulation".

Les modèles physiques sélectionnés pour les simulations multi phases diffèrent de ceux des simulations en régime permanent. Cela permet à l'utilisateur de sélectionner les méthodes et modèles de solution à utiliser pour le calcul. Le modèle instationnaire implicite est le seul solveur transitoire disponible avec les modèles d'écoulement ségrégué et turbulent. Le modèle permet à l'utilisateur de spécifier le pas de temps à utiliser dans la simulation, entre autres paramètres.

3- Solveurs

1) Temps

- Implicit steady > temporal discretization: second order

- stopping criteria > **Maximum inner itérations: 20**

2) Espace

- 3ème ordre

4- Résidus

À chacune de ces simulations, nous analysons les résidus du calcul, c'est-à-dire le degré de convergence des équations de Navier-Stokes. Ce graphique constitué de 5 à 6 paramètres de

l'équation permet de vérifier si dans un ordre de 1 000 à 10 000 itérations, la simulation effectuée aboutie à un résultat pertinent et qualitatif. À chacun de ses calculs, un grand nombre de vents sont évalués afin d'améliorer progressivement la simulation et la précision du calcul (Résidus idéalement en dessous de 0,001 pour 1000 à 10 000 itérations).

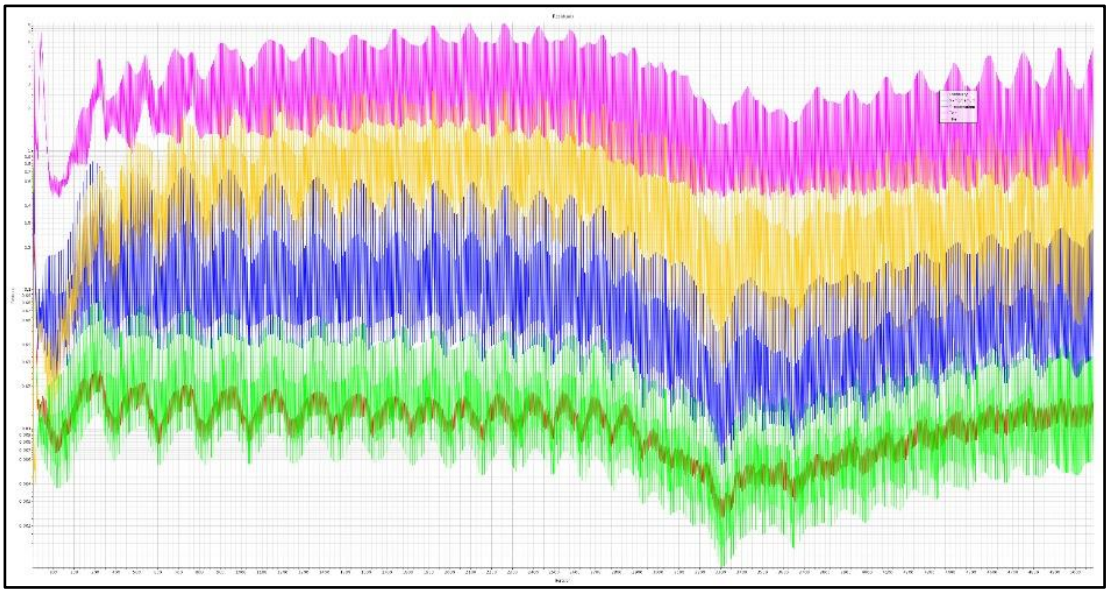


Figure 138. Star CCM+, les courbes de résidus de l'équation non convergées lors des premiers calculs

Le TDR (turbulence dissipation ratio) offre 10 000 fois plus de résidus que les autres paramètres

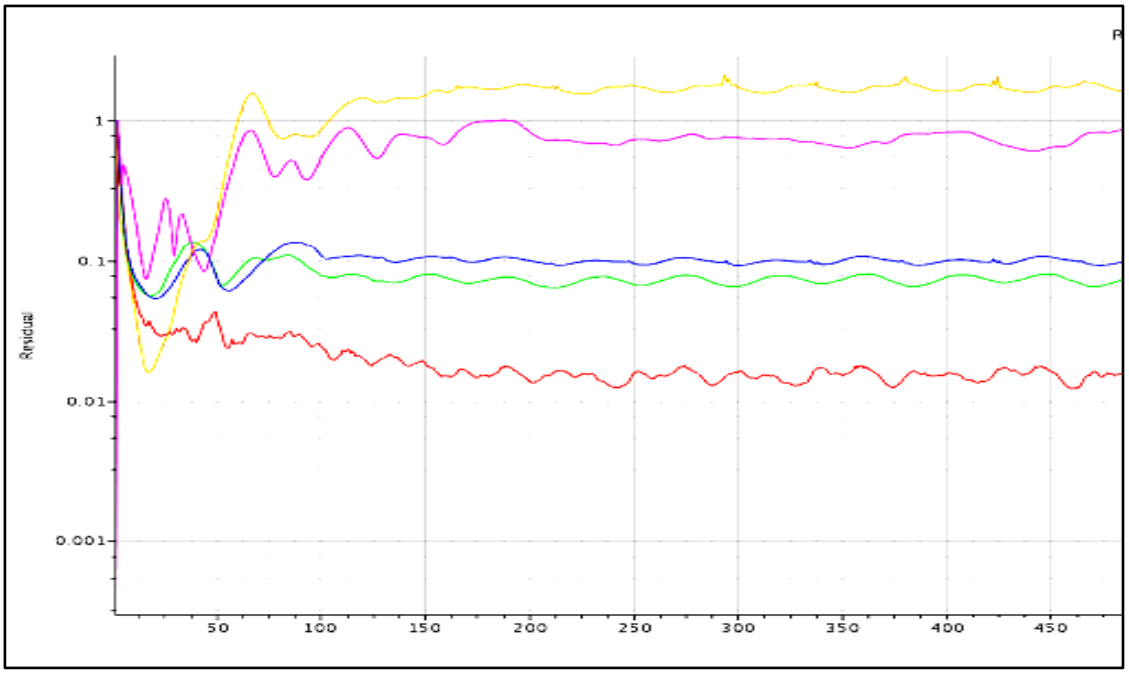


Figure 139. Analyse des "Résidus" de calcul sur les 500 premières itérations. Le calcul n' pas été prolongé à 10 000 itérations à cause des temps de calcul supérieurs à plusieurs semaines.

3.4.3 Simulation N°2 d'un dispositif d'amplification du vent

Cette deuxième étude est lancée avec un maillage moins dense de 11 000 mailles et un régime stationnaire. La magnitude des vitesses d'aire relevées n'est pas la moyenne des vitesses dans le temps, mais la vitesse constante de l'air, si le flux d'air est bien stationnaire.

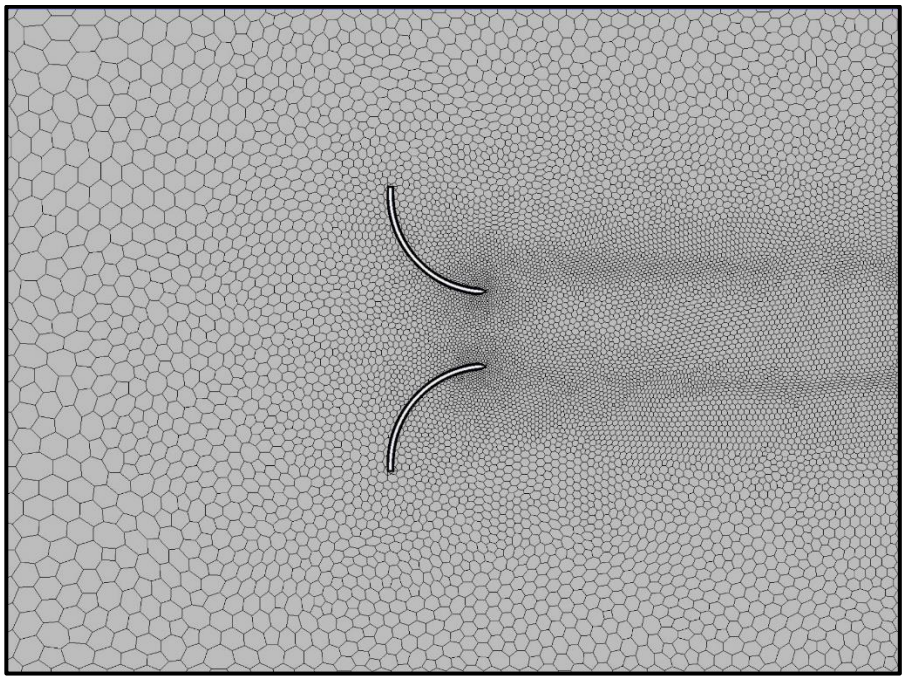


Figure 140. Allure du maillage 2D

Nombre de mailles : 11 327
Temps : régime stationnaire

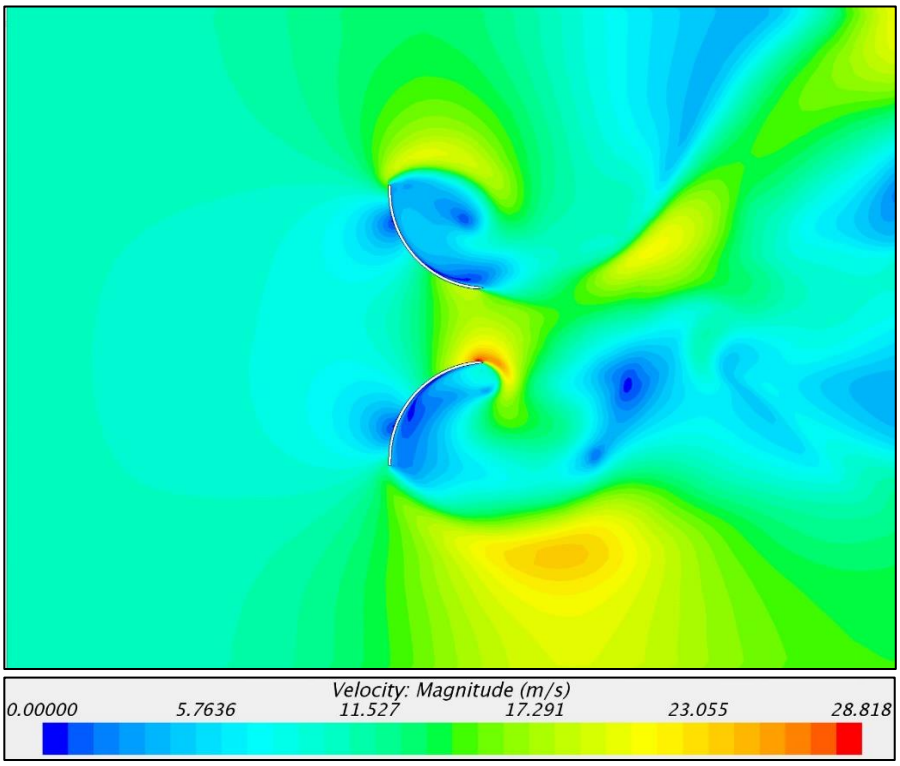


Figure 141. Velocity Magnitude

1- Conditions initiales

- vitesse prise égale en tout point à la vitesse d'entrée. (Norme de 28,5m/s

pour les calculs menés).

2- Modèles- continua > physics1

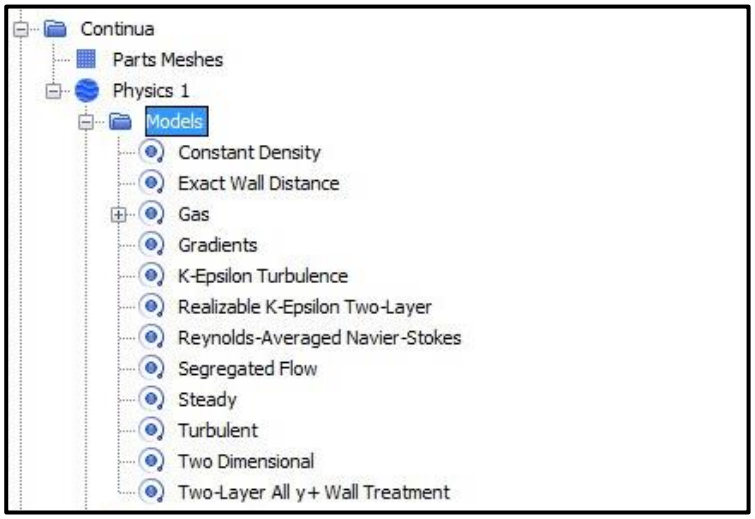


Figure 142. STAR CCM+ -Conditions initiales

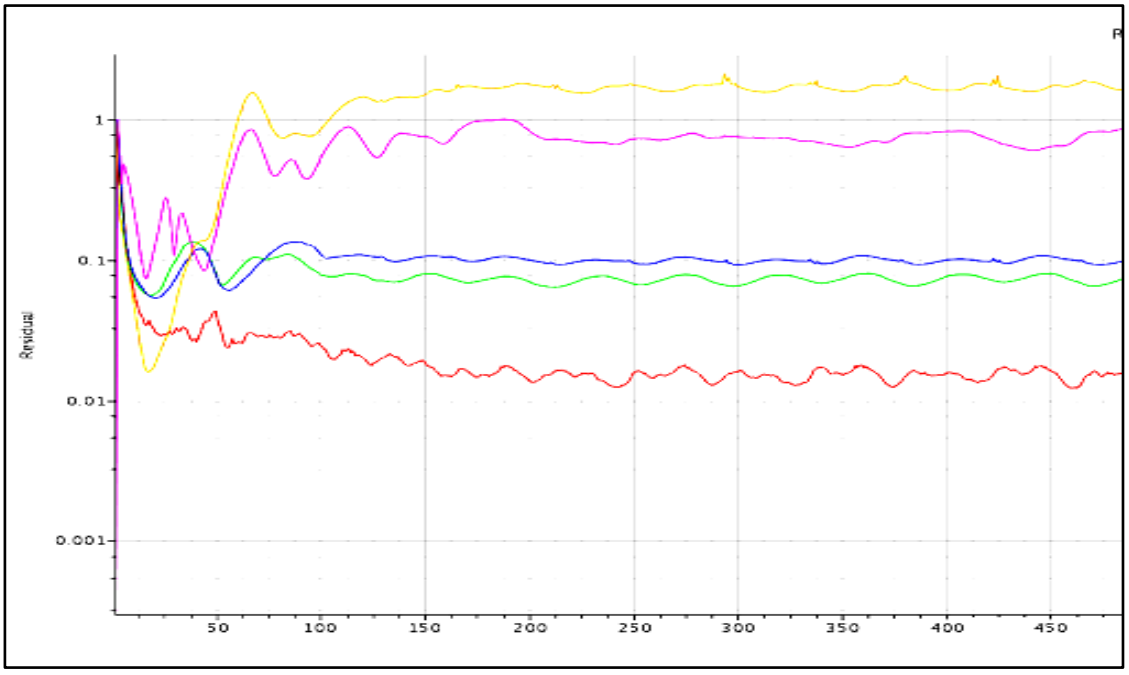


Figure 143. Analyse des "Résidus" de calcul.

3.4.4 Simulation N°3 d'un dispositif d'amplification du vent

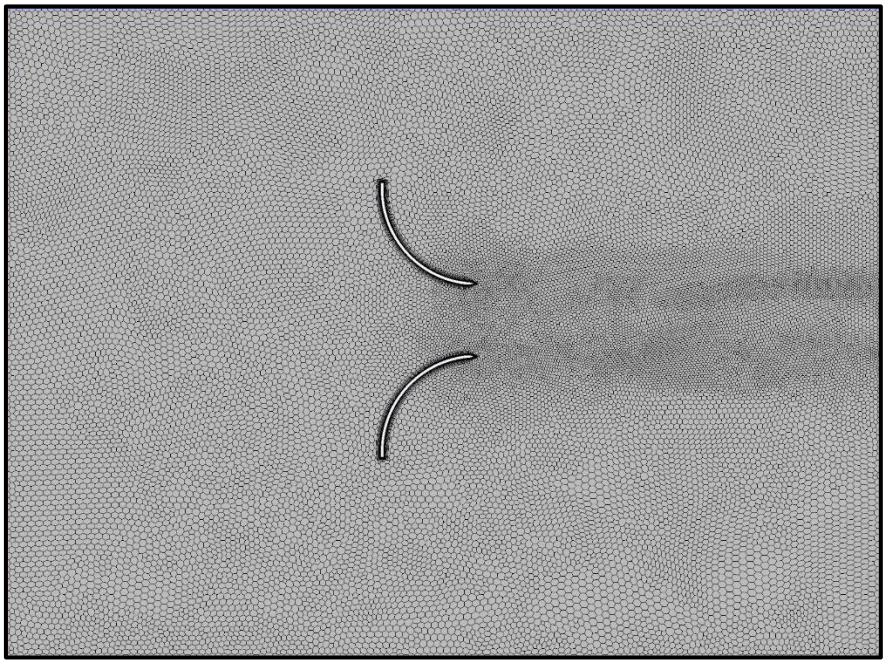


Figure 144. Allure du maillage 2D

Nombre de mailles : 26 093

Temps : régime stationnaire

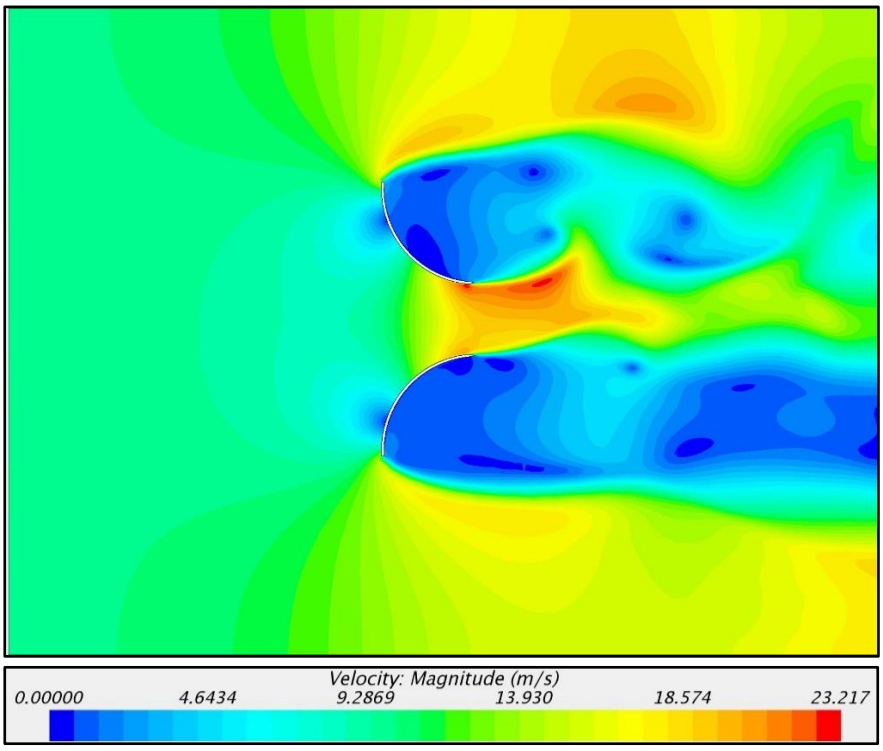


Figure 145. Magnitude des vitesses

Cette troisième étude est lancée avec un maillage moyennement dense de 27 000 mailles et un régime stationnaire. La magnitude des vitesses d'aire relevées n'est pas la moyenne des vitesses dans le temps, mais la vitesse constante de l'air, si le flux d'air est bien stationnaire. Nous observons que la définition des vitesses est plus continue et plus homogène. Ceci s'expliquer par l'augmentation de la densité des mailles qui capture une meilleure précision le comportement de l'air.

1- Conditions initiales

- vitesse prise égale en tout point à la vitesse d'entrée. (Norme de 28,5m/s pour les calculs menés).

2- Modèles - continua > physics1

Figure 146. STAR CCM+, Fenêtre de réglage de conditions : « PHYSICS »

Nous avons étudié 2 choix de modèle de turbulence dans nos simulations. K-EPSILON TURBULENCE

Dans la sélection du modèle physique, sélectionnez Steady dans l'onglet calcul du temps, le gaz dans le matériau, le flux séparé dans l'écoulement, la densité constante dans l'équation d'état et laminaire sous le régime visqueux.

3- Solveurs

1) Temps

- implicit steady > temporal discretization: 2nd order
- stopping criteria> maximum inner iterations: 20

2) Espace

- 3ème ordre

Le TDR offre 10,000 fois plus de résidus que les autres paramètres. (voir point – 4, chapitre 3.4.2)

3.5 Conclusion

Les outils de simulation numérique aéraulique telles que STAR-CCM+ permettent de créer une soufflerie virtuelle qui peut être précisément adaptée et configurée au type d'étude de la recherche.

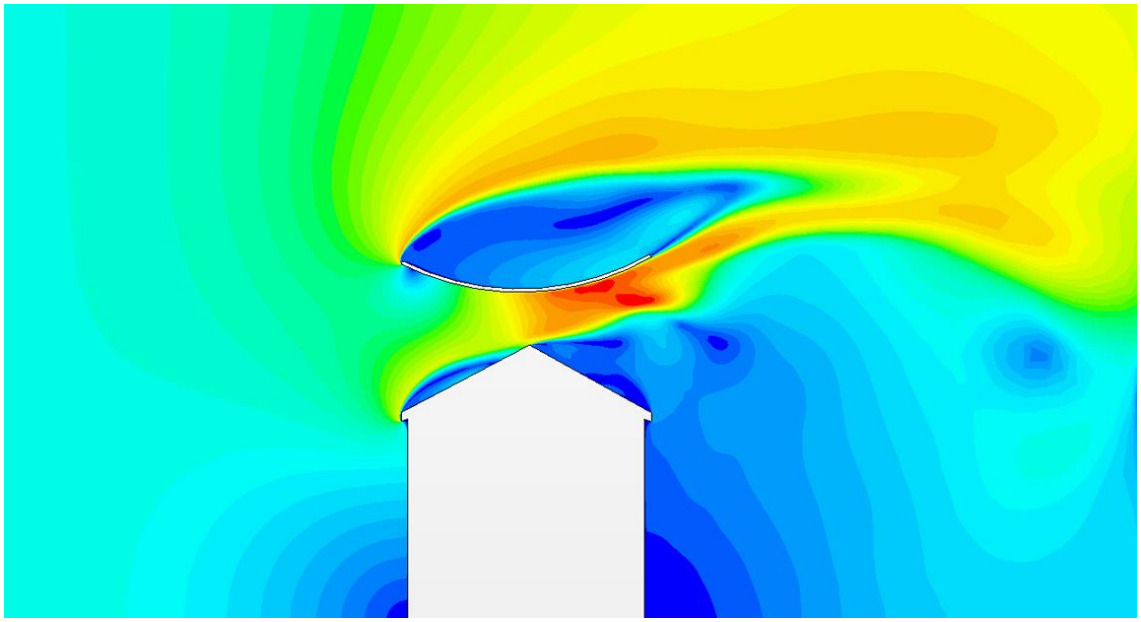
Le dimensionnement de la chambre d'essai, la vitesse des vents, les caractéristiques précises expérimentales peuvent être ajustés en fonction des expérimentations nécessaires et ceci sans la complexité d'une manipulation en soufflerie physique. D'autre part, le relevé des vitesses par cartographies de couleurs facilite l'identification de zones d'augmentation de la vitesse de l'air ou de turbulence. Cette méthode d'analyse n'engendre pas de difficulté de mesure liées, comme c'est souvent le cas, à une manipulation en soufflerie physique (ralentissement de l'air au niveau de la sonde mesure) .

Par contre, le choix des conditions initiales et conditions limites est déterminant pour obtenir des résultats précis et cohérents avec le cas étudié. L'étalonnage de la soufflerie numérique avec des mesures réalisées sur site, permet de garantir que les hypothèses de calcul sont proches voir identiques à celle du vent mesuré à cet endroit. Nous avons pu apprendre, dans ce chapitre, à configurer et à observer des écoulements d'air en régime laminaire et turbulent et à adapter les conditions de la simulation aux mesures relevées sur site grâce aux anémomètres connectés.

Dans la quatrième partie, nous allons appliquer ce paramétrage de la soufflerie numérique sur 3 échelles de bâtiments en site urbain. Cette démarche va permettre de préciser les géométries de modèles concrets des bâtiments et des dispositifs d'amplification de la vitesse du vent, afin d'ajuster le modèle de calcul à cette échelle et à ce type de contexte. Calcul après calcul, nous allons pouvoir affiner le profilage du bâtiment et le mode d'implantation du dispositif de captation d'énergie.

PARTIE 4

METHODOLOGIE D'INTEGRATION DES DISPOSITIFS AUX ENVELOPPES ARCHITECTURALES



Contenu :

- Analyse du comportement du vent en milieu urbain et relevés
- Modélisation numérique de vent en zone urbaine
- Etude d'accélérateurs à vent
- Etude de cas 1 : Un volume bas en site dégagé
- Etude de cas 2 : Un immeuble de logements en site de type faubourg
- Etude de cas 3 : Un bâtiment-îlot (IGH) en site venté
- Réalisation de prototypes CNC de ces dispositifs (échelle 1)

4.0 INTRODUCTION 157
4.1 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE 157
4.1.1 Relevés de comportement du vent en milieu urbain 158
4.1.2 Extraction de données du vent grâce à un anémomètre connecté 161
4.1.3 Etalonnage de la simulation numérique par rapport aux relevés insitu 161

4.2 MODELISATION NUMERIQUE - ETUDE THEORIQUE 1 : UN VOLUME BAS EN SITE DEGAGE 162
4.2.1 Etude initiale sans foil en coupe verticale 163
4.2.2 Etudes d'accélérateurs horizontaux de type Aérofoil 164
- Foil type H1 164
- Foil type H2 165
- Foil type H4 169
- Foil type H5 170
- Conclusion 171

4.3 ETUDE THEORIQUE 2 : LES ACCELERATEURS VERTICAUX - PLAN BATIMENT AVEC FOIL TYPE V1 171
- Introduction 171
4.3.1 Etude théorique 2 : sans foil en coupe horizontale 173
4.3.2 Etude avec foil vertical V1 à 45° 174
4.3.3 Etude avec foil V2 et découpe angle bâtiment en quart de cercle 175
4.3.4 Etude avec foil V3 à 90° par rapport à la façade 176
4.3.5 Etude avec foil V4 et angle bâtiment arrondi 177
4.3.6 Etude avec foil V5 et découpe angle bâtiment à 45° 178
- Conclusion 179
4.4 ETUDE THEORIQUE 3 : DISPOSITIFS EN ACROTERE 179
- Etude de vent initiale sur acrotère 179
- Etude de vent sur acrotère avec dispositif A1 180

4.5 ETUDE THEORIQUE 4 : UN IMMEUBLE DE LOGEMENTS EN SITE URBAIN DE TYPE FAUBOURG - IMMEUBLE AU 136 AVENUE PARMENTIER, 75011 PARIS 181
- Relevés de vent sur l'immeuble de logements 181
- Etude initiale du vent sur toiture à la mansart 185
- Etude du vent avec foil M1 sur toiture à la mansart 186
4.6 ETUDE THEORIQUE 4 : UN BATIMENT-ILOT (IGH) EN SITE VENTE 187

4.6.1 Présentation du contexte de l'école d'Architecture Paris Val-de-Seine (75013) 187
4.6.2 Méthode de relevés des vents en périphérie de ce bâtiment-ilot 188
4.6.3 Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine (75013) 189
4.6.4 Méthode de simulation aéraulique en zone urbaine du site de l'ENSAPVS 191
4.6.5 Etude aéraulique en coupes verticales du bâtiment 192
- Foil de type H5 193
- Foil de type H5 193
- Foil de type H5 193
- Foil de type H5 193
- Foil de type H5 194
- Foil de type H5 194
4.6.6 Étude du bâtiment-îlot en coupes horizontales à différentes altimétries 195
- Étude du bâtiment à 12m 195
- Foil de type H5 195
- Foil de type H5 195
- Étude du bâtiment à 25m 196
- Foil de type H5 196
- Foil de type H5 196
- Conclusion 196
4.6.7 Étude d'une zone en détail au niveau des 2 tours 197
- Foil de type H5 197
- Foil de type H5 197
4.6.8 Étude d'une zone du bâtiment avec l'ajout de « foil » d'amplification de vitesse du vent 198
- Foil de type H5 198
- Foil de type H5 198
4.6.9 Autre analyse avec des foils profilés pour créer une zone stabilisée de flux d'air 199
- Foil de type H5 199
- Foil de type H5 199
- Conclusion 199

4.7 BILAN DE CES 4 ETUDES 200
4.8 ETUDE DES EOLIENNES ADAPTEES A L'INTEGRATION ARCHITECTURALE 200

4.0 INTRODUCTION

Cette partie aborde la méthode adoptée pour l'analyse de l'écoulement du vent en périphérie de plusieurs typologies de volumes architecturaux. Afin d'appréhender la complexité du rôle de l'environnement urbain sur l'écoulement des vents en ville, nous avons choisi d'étudier 3 sites d'échelles différentes.

L'objectif de cette démarche et de permettre de catégoriser les différents types de vent en zone urbaine. Cette caractéristique, et en particulier l'identification du spectre des vents minimum et maximum, permet de définir le choix et la performance des dispositifs de captation d'énergie, le mode de fixation en toiture de bâtiment, le type de vent, l'altimétrie du dispositif par rapport aux niveaux des toitures, les nuisances potentielles alentours.

Nous souhaitons mettre en place une méthode pour identifier **le lieu optimal d'implantation d'éoliennes** en périphérie d'un bâtiment et d'atteindre une amélioration des performances d'énergie extraite en étudiant le positionnement d'une aile d'amplification du vent sur le bâtiment. Ce type d'analyse a été développé aussi par Baskaran et Kashef [121] de l'Institute for Research in Construction (Canada), ou celle de Tominaga et Akabayashi[122] du Niigata Institute of Technology en mettant en œuvre des techniques de simulation d'écoulement autour des bâtiments et de leur toiture.

Mais dans notre cas, nous avons établi des relevés de vents grâce à des anémomètres in situ, et modélisé une cartographie localisée des vents urbains. Des mesures expérimentales sur site sont donc utilisées comme mode d'étalonnage et de vérification des simulations numériques sans dispositif éoliens . Au lieu d'une étude de vents théoriques sur un bâtiment, nous avons combiné des simulations numériques aérauliques en utilisant le logiciel STAR CCM+ avec des relevés de vent, sur des longues périodes de temps (supérieures à 1 an). En combinant ces informations avec une analyse en soufflerie numérique, nous espérons définir les règles d'implantation d'éoliennes et de dispositif de régulation de l'air sur les abords des bâtiments.

4.1 PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE

Pour cette recherche, nous avons utilisé des anémomètres à ultrasons connectés de type Netatmo[123] qui ont été implantés sur 3 sites d'étude (Figure 146). Ces anémomètres destinés à l'usage de stations météo grand public ont une fiabilité remarquable pour un prix modéré et transmettent en temps réel les données du vent par l'intermédiaire d'une borne wifi à proximité de l'anémomètre. Les données sur les vents, fournies en continu à chacun de ces points, sont ensuite introduit dans la soufflerie numérique que nous avons paramétrée sur STAR CCM+.

---

[121] Appupillai BASKARAN et Ahmed KASHEF, « Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques », *Engineering Structures*, 1 novembre 1996, vol. 18, n° 11, pp. 861-875.

[122] Yoshihide TOMINAGA, Shin-ichi AKABAYASHI, Takuya KITAHARA et Yuki ARINAMI, « Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations », *Building and Environment*, 1 janvier 2015, vol. 84, pp. 204-213.

[123] Anémomètres à ultrasons connectés à un réseau sans fil type Netatmo. Voir les relevés sur un an sur l'application meteo : meteo@serero.com, mp :Concours1

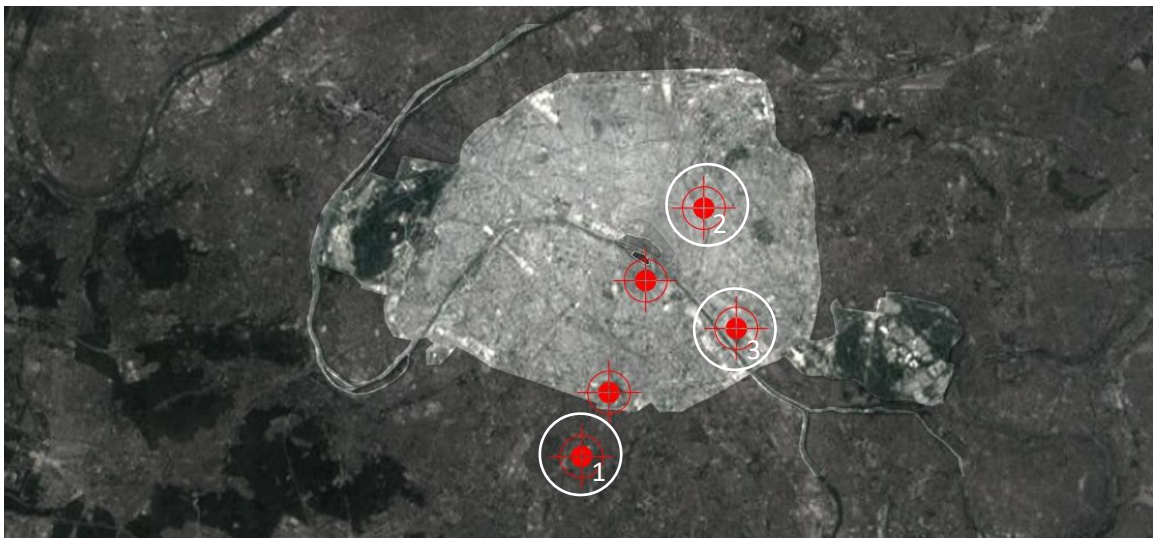


Figure 147 Localisation des 3 sites d'étude avec stations météo de relevés du vent, installées par Serero de 2016 à 2020

L'utilisation de ce type de station météo connectées Netatmo a déjà été faite pour générer des données externalisées par plusieurs chercheurs comme par exemple Chapman et Bell [124] qui ont révélé en 2017, grâce à ce système, sous l'effet du rayonnement solaire, des différences de température en temps réel de 1 à 6°C dans les rues de la ville de Londres.

Cette méthode permet plus précisément d'étalonner la simulation numérique à partir des relevés de vents précis et réels sur site, puis de développer le modèle volumétrique complet du comportement du vent sur une zone de toiture, ou un îlot urbain dans son intégralité.

Cette étude n'est réalisable qu'à partir de la récupération d'un flux de données géolocalisées, et la mise en relation de ces informations avec des spécifications techniques d'éolienne, de leur performance énergétique et de leur vitesse d'enclenchement[125]. **Nous pouvons ainsi, grâce à cette méthode, définir les caractéristiques d'éoliennes pour maximiser leur performance en site urbain et dans un régime d'écoulement d'air turbulent.**

4.1.1 Relevés de comportement du vent en milieu urbain

[124] Lee CHAPMAN, Cassandra BELL et Simon BELL, « Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations », *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, n° 9, pp. 3597-3605.
[125] Vitesse d'enclenchement : le rotor se met en mouvement dès que le vent atteint 2 m/s (jusqu'à 4 m/s, la production est nulle)

Figure 148 Etude d'un volume architectural bas pour l'intégration de micro-éoliennes et de foils. (H=9m)

Figure 149 Etude d'un immeuble de dans un ilot urbain d'échelle intermédiaire (H=35m)

Figure 150 Etude de bâtiment-ilot en bordure de Seine de grande échelle (H=75m)

Figure 151 Etude complémentaire d'un bâtiment de très grande échelle dans un espace dégagé (Esplanade La Défense) (H=110m)

Nous développons dans cette partie trois études de cas de bâtiments issus d'environnement urbain à couches historiques multiples[126] dont la diversité de typologie et de construction permet d'envisager des modes différents de capture d'énergie éolienne. Nous étudions aussi dans cette partie la mise en place d'un accélérateur de vent associé aux bâtiments. Les aérofoils[127] (voir chapitre 5.1.7 sur Aérofoils) qui sont intégrés à cette étude, permettent de contrôler la vitesse de l'air, de l'orienter sur la turbine génératrice, mais aussi de l'accélérer. Elle permet aussi de masquer, grâce à son profil, le dispositif sur le toit du bâtiment. Relevés de comportement du vent en milieu urbain

Les informations sur les vents relevés par ces anémomètres connectés nous permettent d'obtenir précisément les informations suivantes : la direction, (omnidirectionnel, uni directionnel ou bidirectionnel, la vitesse et les fréquences.

[126] Voir l'étude historique des îlots parisiens réalisée dans le chapitre 2 de cette recherche.

[127] Aérofoil, ou airfoil : lame (lat : folia) qui permet de contrôler le mouvement de l'air sur un surface donnée, soit en compressant la veine d'air pour en accélérer sa vitesse, soit pour utiliser sa portance (aviation) ou son appui (course automobile)

Figure 152 - Installation d'un anémomètre connecté sur une maison à Arcueil (92) par D. Serero

Figure 153 Vue toiture de l'anémomètre connecté sur une maison à Arcueil (92) par D. Serero

La mesure de ces vents réalisée précisément **au niveau de l'enveloppe (périphérie) du bâtiment**, et non par extrapolation à partir d'une station météorologique à distance ou dans des sites d'espaces dégagés (non représentatifs du contexte urbain), comme les aéroports Charles De Gaulle et Orly, fournit des informations précises sur :

- l'impact propre de l'architecture sur le vent en un point donné.

- la présence d'éléments du paysage urbain alentours tels que murs pignons, ou la présence de couloirs de vent qui modifient ponctuellement le mouvement et la vitesse du vent résultant.

Une cartographie de tous les anémomètres Netatmo[128] (Figure 153) positionnés à Paris montre, à un même instant, des directions de vent en zone urbaine quasiment à 360°, sans que des directions précises puissent être définies ou clairement identifiées.

Dans les études aérauliques suivantes, nous avons comparé **la mesure de la vitesse de vent témoin en espace libre (sans bâtiment) à proximité, et la vitesse moyenne des vents relevée à plusieurs endroits sur un bâtiment** (aux extrémités du bâtiment, en façade ou en toiture).

Pour des raisons **de temps de calcul**, mais aussi de simplicité et de précision de lecture, ces simulations ont été faites sur des coupes verticales ou coupes horizontales du bâtiment. Ceci permet de limiter le nombre de points du maillage[129] de l'analyse aéraulique, et de réduire le temps de calcul. Sur des bâtiments complexes où l'analyse et la position des turbines devrait être affinée, **une étude complète dans un calcul à 3 dimensions a permis d'améliorer la précision de l'analyse**.

[128] *Anémomètre Connecté*, https://www.netatmo.com/fr-fr/weather/weatherstation/anemometer, consulté le 26 mai 2020.

[129] Le nombre de mailles définit la précision et le nombre de points pour l'analyse du vent dans une étude aéraulique numérique

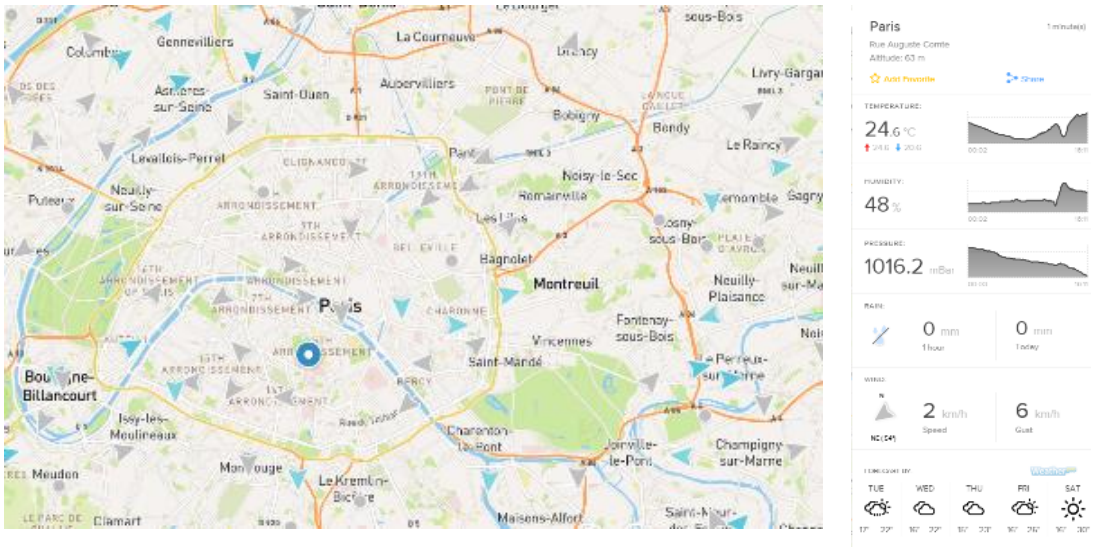


Figure 154 Cartographie des vents à Paris mesuré par les anémomètres Netatmo

4.1.2 Extraction de données du vent grâce à un anémomètre connecté

Ces comparaisons ont servi d'étalonnage au dispositif numérique de simulation. **L'anémomètre mesure le temps entre le moment où on envoie un signal et celui auquel on le reçoit sur deux directions perpendiculaires**. Les vitesses sur les axes N-S et O-E sont alors combinées à l'aide de fonctions trigonométriques pour obtenir la vitesse et la direction réelles.

Les données réalisées par ces dispositifs (Voir figures 83 et 85) sont les suivantes :

1- Vitesse et direction moyennes sur les 5 dernières minutes. La flèche indique la direction du vent et sa taille est proportionnelle à la vitesse. Des traits en gris clair autour de l'icône indiquent les directions dominantes du vent durant la dernière heure. Une flèche orientée vers le bas indique un vent du Nord (N=0°). Une flèche orientée vers la gauche indique un vent de l'Est (E=90°).

2- Vitesse et direction de rafale sur les 5 dernières minutes.

3- Rafale maximale (vitesse et direction) sur la journée (depuis minuit).

4.1.3 Etalonnage de la simulation numérique par rapport aux relevés insitu

Nous avons cherché à précisément étalonner la simulation numérique à partir des relevés de vents précis et réels sur site.

Pour réaliser ceci , nous avons suivi la méthode suivante :

- Relevés de vents grâce à des anémomètres in situ, et modélisation d' une cartographie localisée et à l'échelle des vents urbains.
- Mise au point d'un modèle virtuel 3D du bâtiment et du quartier

- Simulation numérique aéraulique du comportement du vent sur la même toiture que celle qui a fait l'objet de relevé avec le même vent incident
- Comparaison des vitesses de vents dans le modèle virtuel et sur la zone relevé
- Si les données sont équivalentes, à 3% près, le modèle numérique est acceptable. Si les différences sont plus importantes, modélisation d'une plus grande zone urbaine et ajustements des conditions limites et de la rugosité du profil urbain. Puis nouvelle comparaison.
- Cette méthode est répété jusqu'à obtenir une similarité des comportements modèle virtuel/relevé sur site.
- Au lieu d'une étude de vents théoriques sur un bâtiment, nous avons combiné des simulations numériques aérauliques en utilisant le logiciel STAR CCM+ avec des relevés de vent, sur des longues périodes de temps (supérieures à 1 an). En combinant ces informations avec une analyse en soufflerie numérique, nous espérons définir les règles d'implantation d'éoliennes et de dispositif de régulation de l'air sur les abords des bâtiments.

4.2 MODELISATION NUMERIQUE - ETUDE THEORIQUE 1 : UN VOLUME BAS EN SITE DEGAGE

La première étude de cas que nous avons réalisée, est basée sur l'écoulement des vents sur un volume simple sur 2 ou 3 niveaux de type maison individuelle située à Arcueil à toiture à double pente. Nous avons réalisé un modèle 3D de cet exemple et nous avons étudié le comportement du vent sur ce volume avant la pose d'un DEI[130] puis après la fixation d'un dispositif d'augmentation de la vitesse du vent. Le volume est étudié en coupe verticale, et dans un site dégagé afin de pouvoir plus facilement comparer l'évolution des vitesses de vent entre chaque étude.

[130] Dispositif éolien intégré au bâtiment

4.2.1 Etude initiale sans foil en coupe verticale

Cette étude concerne un volume architectural de 9 m de haut par 5m de large de type maison individuel avec un vent latéral.

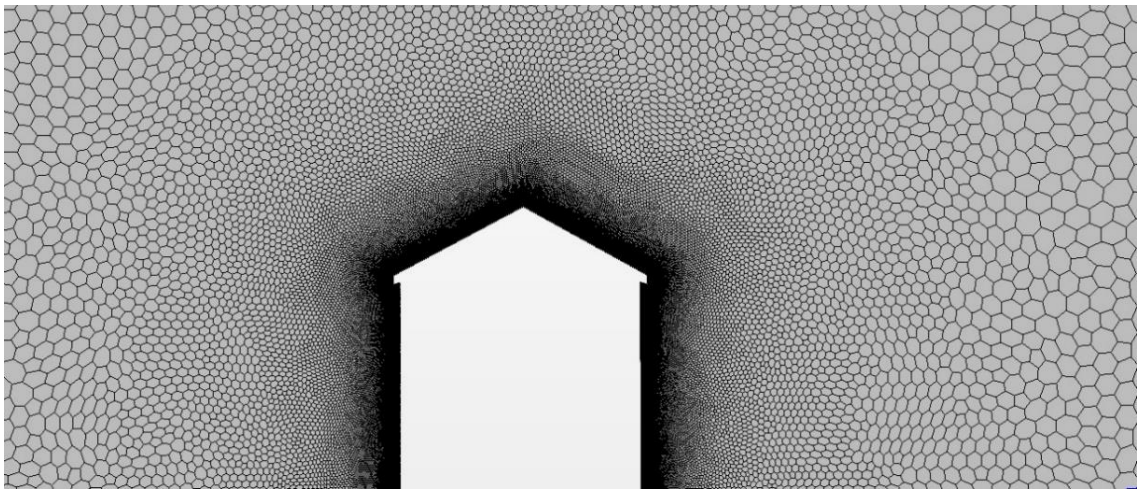


Figure 155. Maillage du modèle 2D de la maison type

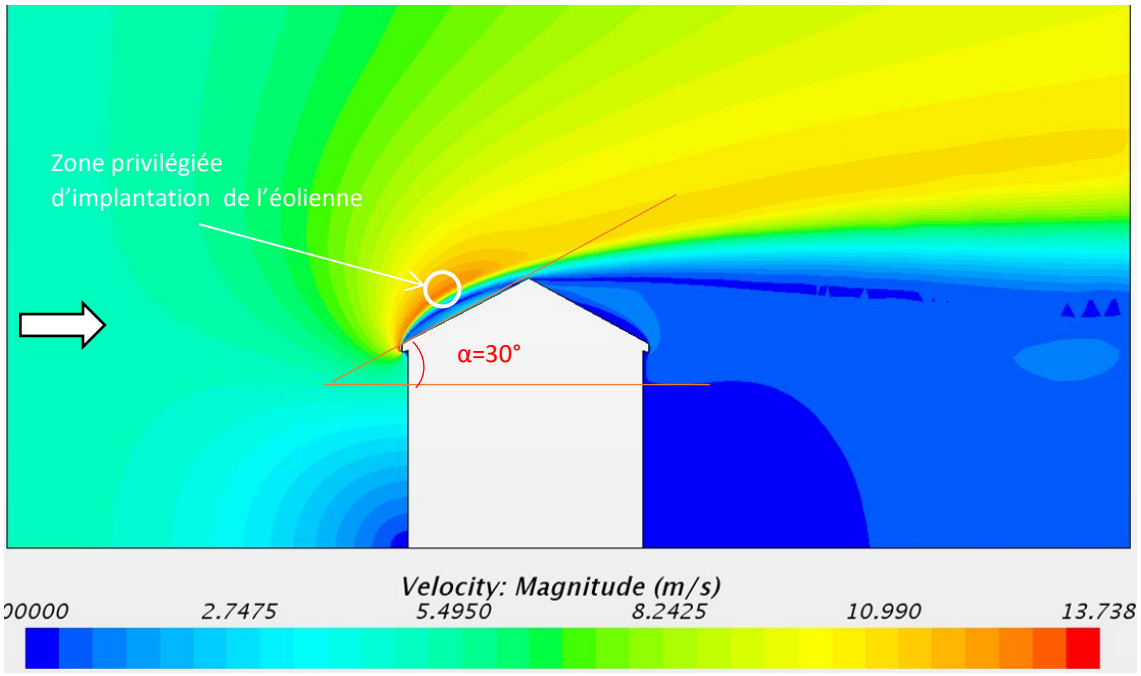


Figure 156. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison

Cette première étude de vent, sans dispositif ajouté au bâtiment, montre qu'un toit à double pente a la capacité d'accélérer un vent entrant de 10 m/secondes à une vitesse de vent de 12 m/s à 1m au-dessus du faitage soit une augmentation de 20 % de la vitesse de l'air au-dessus du bâtiment par le simple profil du toit à double pente.

4.2.2 Etudes d'accélérateurs horizontaux de type Aérofoil

Les études suivantes intègrent un profil d'aile d'amplification nommé aérofoil implanté à 1,50 m au-dessus du faitage et fixé sur la charpente de la toiture. Ces études successives montrent que la vitesse de l'air passe progressivement de 10 à 16 mètres par seconde **soit une augmentation de 30 % de la vitesse de l'air par l'ajout de ce dispositif** (voir figure 156). Dans cette étude, les structures porteuses de l'aile n'ont pas été modélisées mais leur masque représente 0,5% de la surface de passage de l'air et nous les avons considérés comme ayant un impact marginal sur le calcul.

Une analyse des zones de vitesses de vent généré par cette étude, permet de **localiser très précisément les points chauds (zones rouges) en plan et en coupe sur le bâtiment** (Fig. 156 à 168).

- *Foil type H1*

Le foil type H1 est un profil cintré (environ 45° du périmètre du cercle, rayon de courbure de 5m) inversé fixé au-dessus du toit à l'axe du faîtage. Cette forme a été retenue pour compresser la veine d'air de manière régulière et progressive au niveau du toit du bâtiment. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par la pente du toit du bâtiment et la courbe du foil. Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse de l'air à l'arrière du foil (à approximativement 1 m de l'axe du faîtage) est de 16 m/s **soit une augmentation de 3,2 fois la vitesse de l'air entrant.** Cet écoulement est stationnaire.

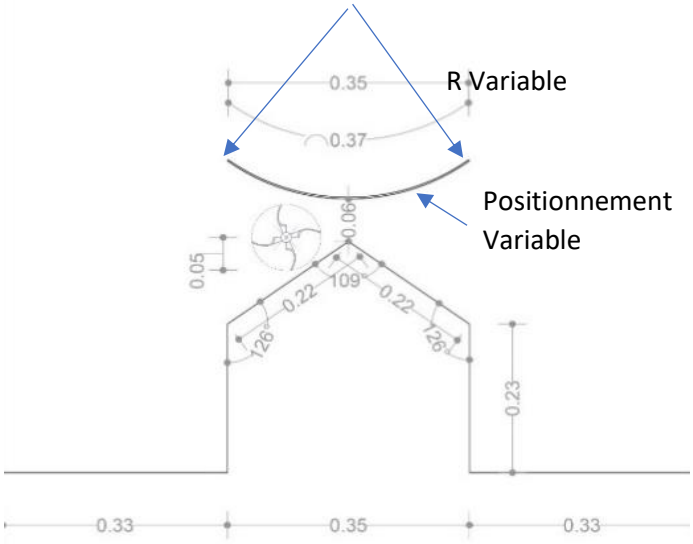


Figure 157. Etude dimensionnelle du modèle numérique/physique de la maison avec foil.

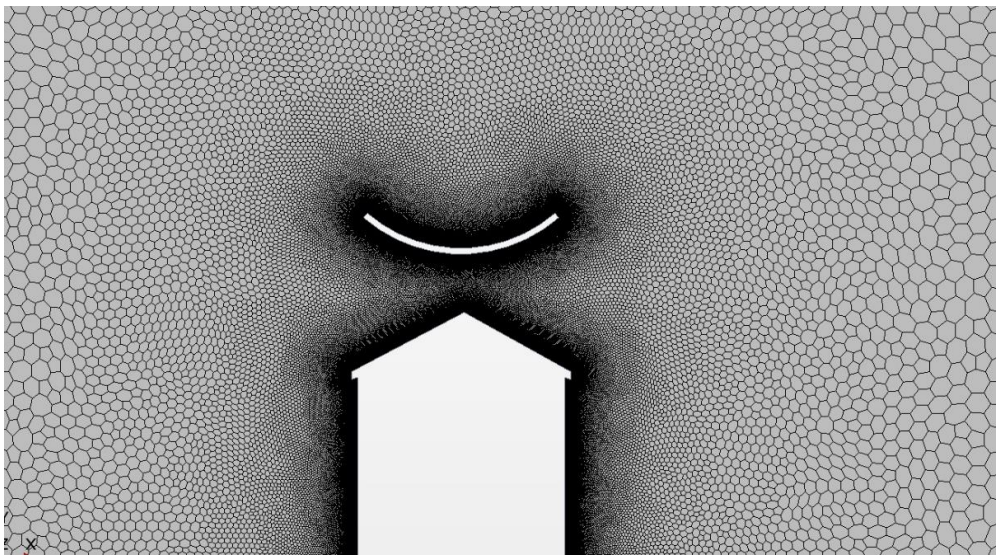


Figure 158. Maillage du modèle 2D de la maison avec foil type 1

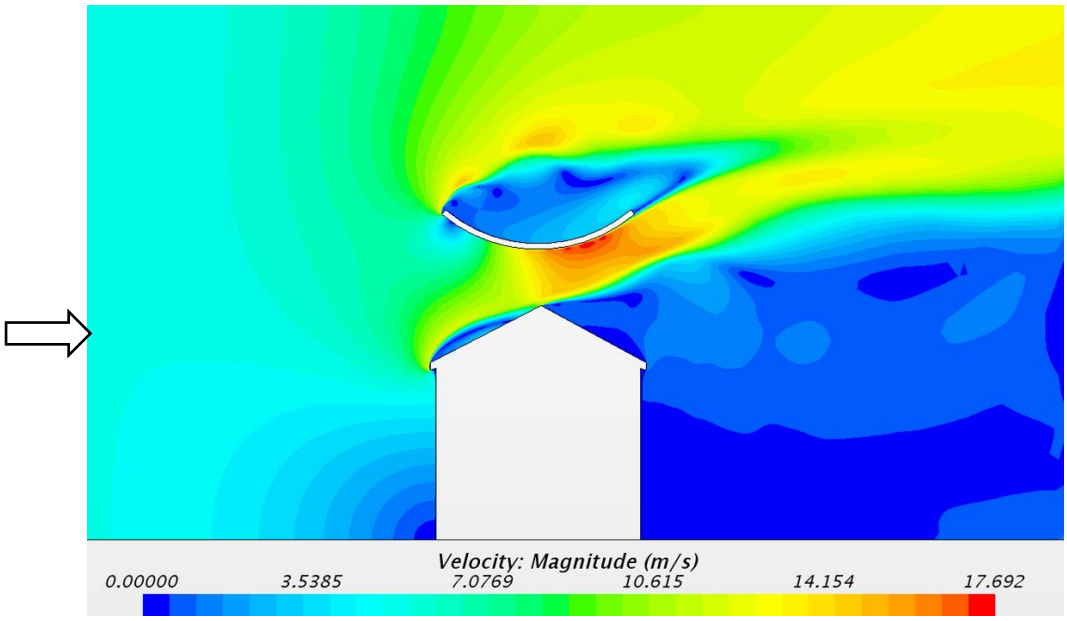


Figure 159. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 1

- *Foil type H2*

Le foil type H2 est un profil cintré (environ 35° du périmètre du cercle, rayon de courbure de 9m) inversé fixé au-dessus du toit à l'axe du faîtage. La distance entre toit et le profil est de 1,40 m et le rayon de courbure est plus grand que celui du foil H1. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par la pente du toit de la maison et la courbe du foil. Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse de l'air à l'arrière du foil à, approximativement 1 m de l'axe du faîtage, est de 14,5 m/s **soit une augmentation de la vitesse du vent de 2,9 fois la vitesse de l'air entrant.**

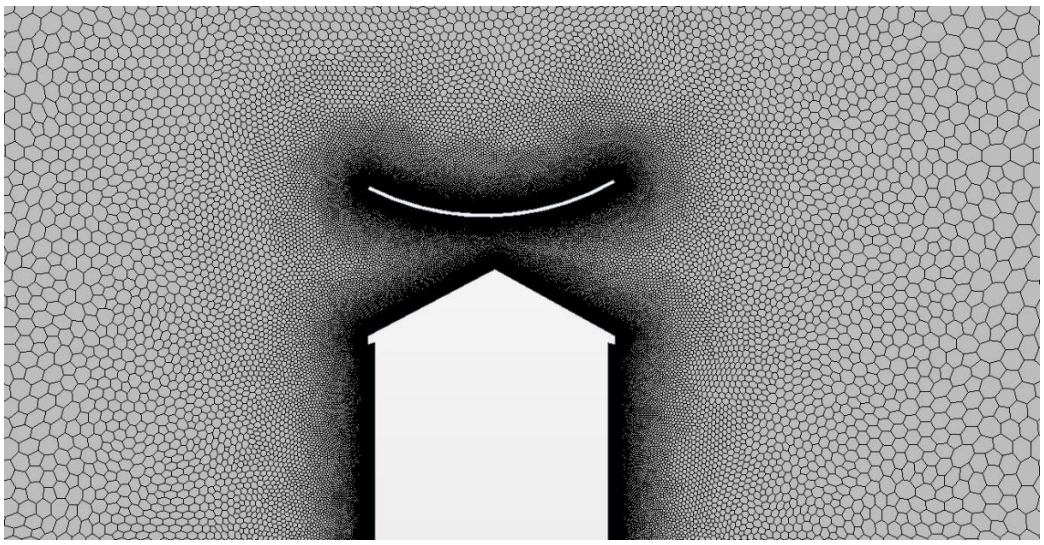


Figure 160. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 2

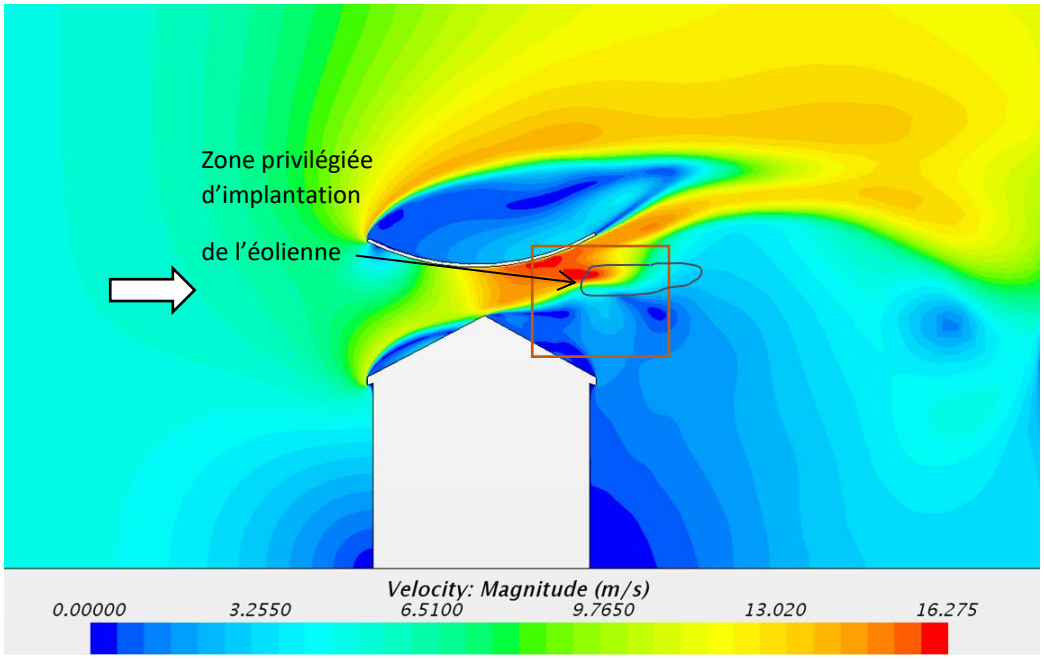


Figure 161. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 2. Le rectangle rouge montre la zone agrandie dans la figure 167.

Pouvons-nous affiner l'analyse du comportement de l'écoulement de vent dans la zone entre la toiture et l'aérofoil, afin préciser la zone la plus intéressante pour l'implantation d'un dispositif de génération d'énergie ?

Pour cela, nous avons réalisé un détail de la simulation numérique sur la partie au-dessus du faitage permet d'affiner les zones d'augmentation de vitesse du vent. Nous avons ici quadrillé la coupe à travers le volume d'air au-dessus du toit en carré de 25cm de haut par 25cm de large. Cette grille permet d'affiner la lecture du phénomène d'augmentation de la vitesse de l'air.

Nous notons une zone d'augmentation de la vitesse du vent dans l'axe médian entre le foil le faitage du toit. (13,2 à 14m/s), ainsi qu'une zone sous le foil de vitesse maximale du vent. Cette zone 1 (voir figure 159) en forme de triangle est difficilement utilisable pour un dispositif dont le diamètre est de 0,80 m à 1,20m de diamètre.

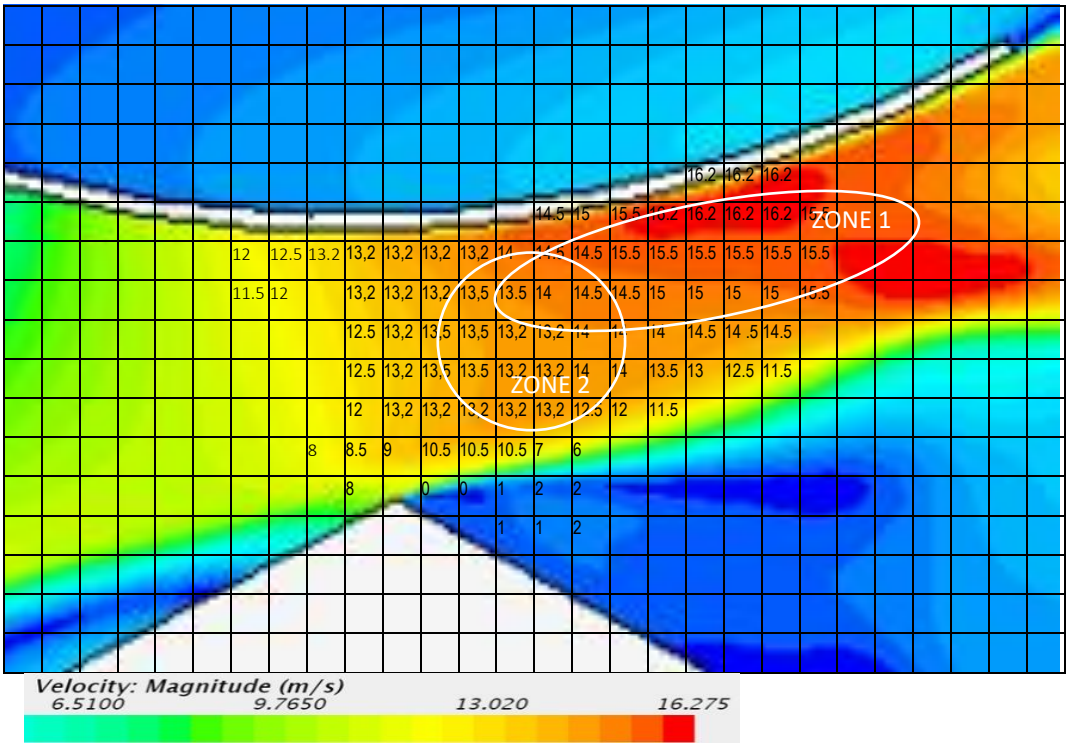


Figure 162. Zoom en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 2

Par contre, la zone centrale (Zone 2) offre une amplification des vitesses d'air sur un profil vertical constant qui est parfaitement adapté à l'implantation des systèmes de production d'énergie.

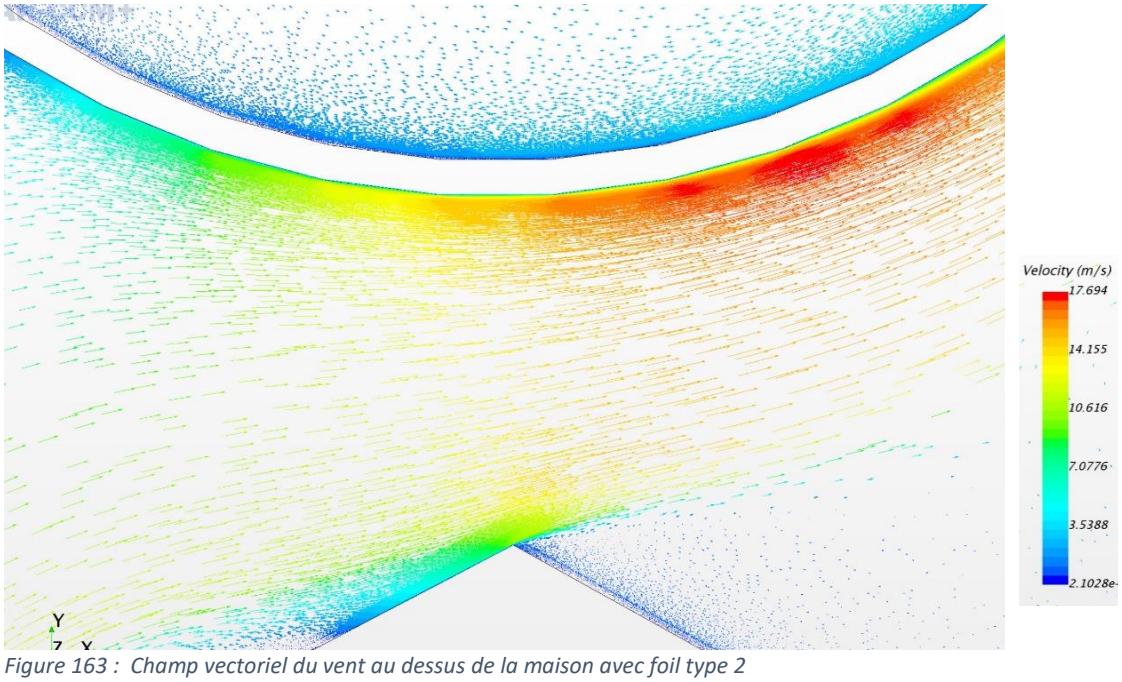


Figure 163 : Champ vectoriel du vent au dessus de la maison avec foil type 2

La figure 162 présente un champ vectoriel entre le toit et le foil. Ce champ permet de mesurer par la longueur des vecteurs la vitesse du vent, et par l'orientation du vecteur, la direction du vent dans chacun de ces points. La direction de déplacement du vent est orienté vers la zone la plus rouge. Ces vecteurs donnent une information sur l'implantation et l'angle de l'éolienne à positionner dans cette zone.

- Foil type H3

Le foil type H3 est un profil en portion de cercle inversé fixé au-dessus du toit désaxé de 1,5m par rapport à l'axe du faîtage. La distance entre toit et le profil est de 1,40 m. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par la pente du toit de la maison et la courbe du foil. **Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent à l'arrière du foil à, approximativement, 1 m de l'axe du faîtage est de 11,5 m/s, soit une augmentation de 2,3 fois la vitesse de l'air entrant.**

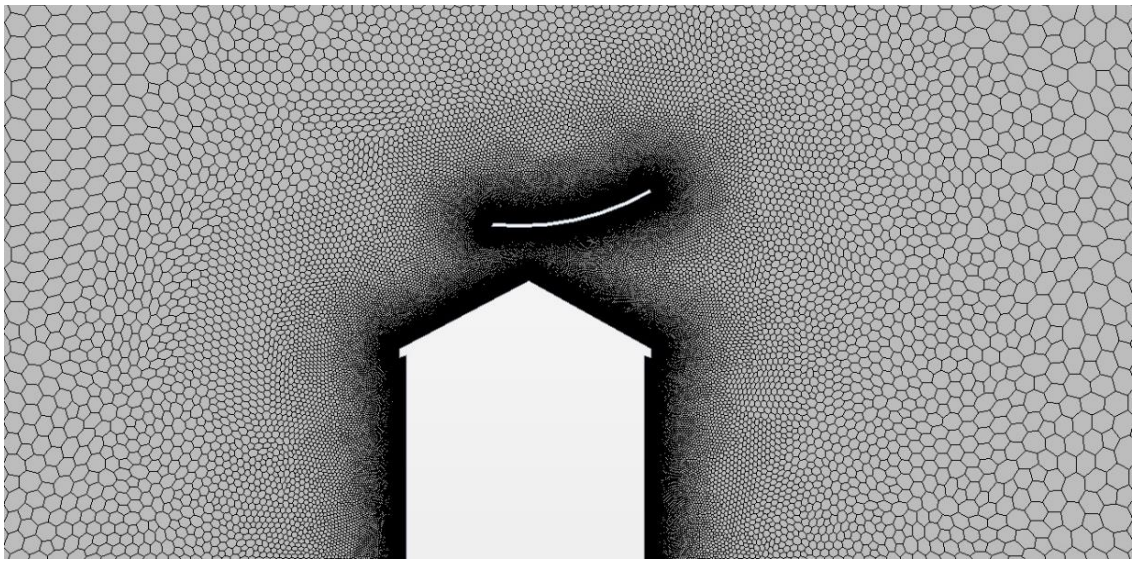


Figure 164. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 3

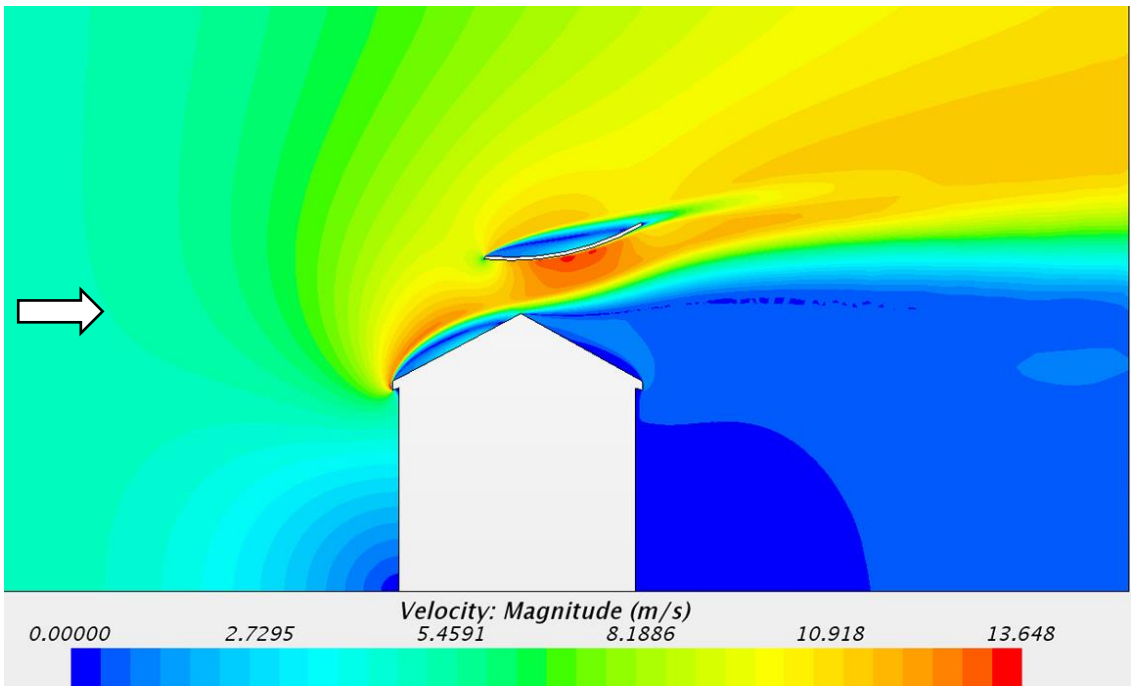


Figure 165. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 3

- *Foil type H4*

Le foil type H4 est un profil en portion de cercle inversé fixé au-dessus du toit avec un décalage de 1,5m à l'horizontal à l'axe du faîtage. La distance entre toit et le profil est de 1,40 m. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par la pente du toit de la maison et la courbe du foil. **Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent à l'arrière du foil à, approximativement, 1 m de l'axe du faîtage est de 14,0 m/s, soit une augmentation de la vitesse de 2,8 fois la vitesse de l'air entrant.**

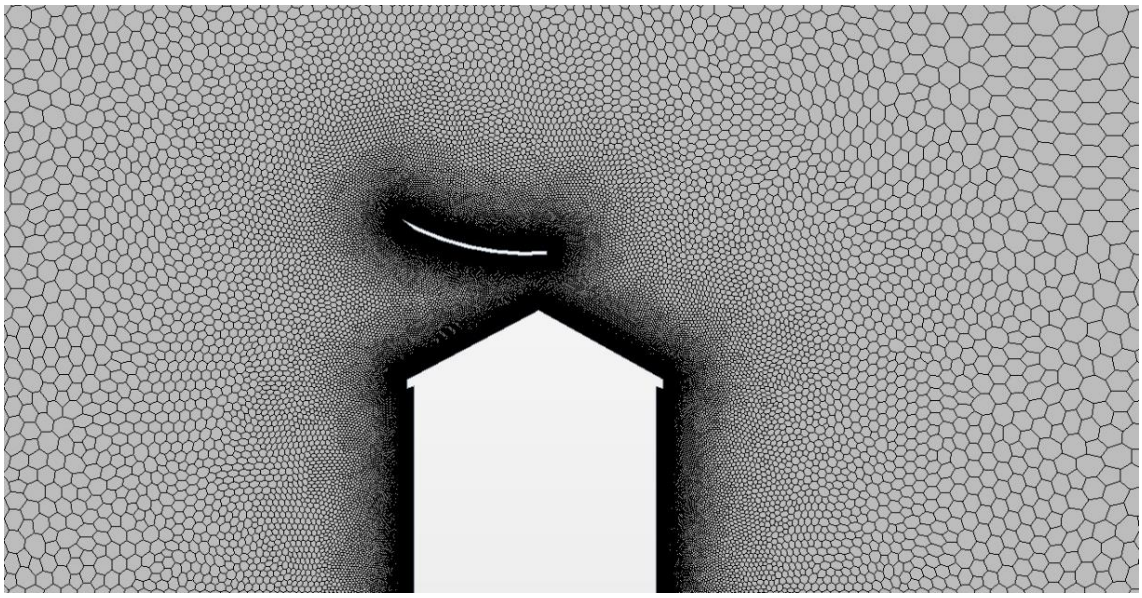


Figure 166. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 4

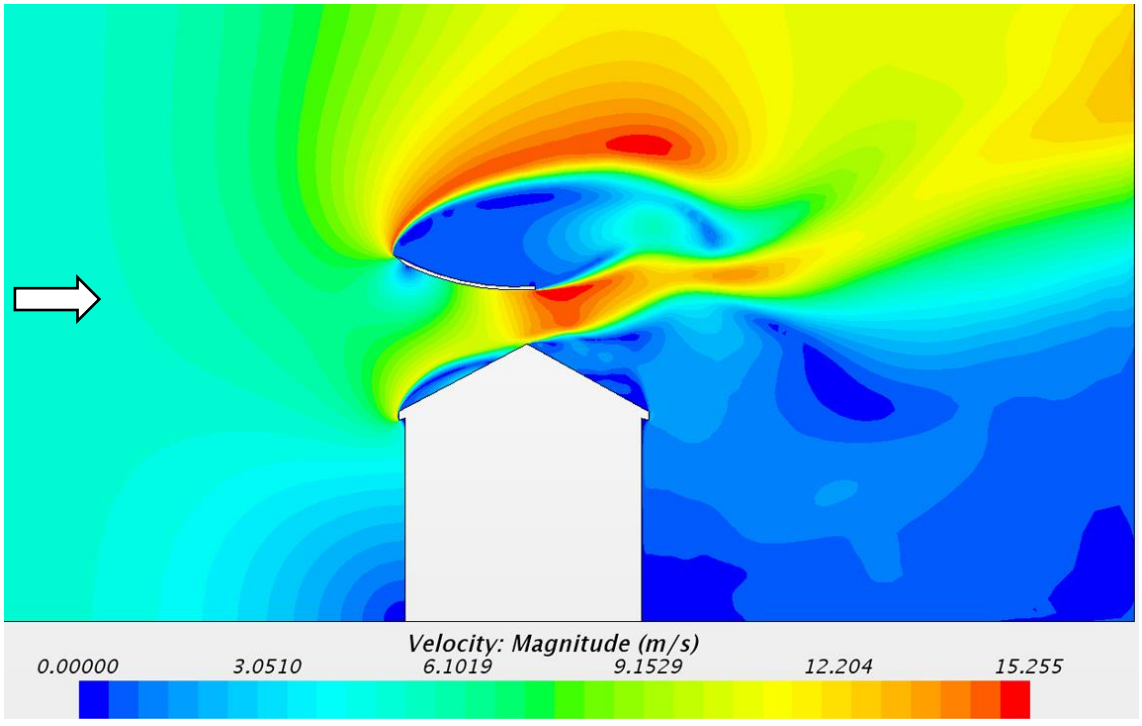


Figure 167. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 4

- *Foil type H5*

Nous avons aussi étudié l'impact sur les vents d'un foil en V de type papillon. La pointe de la forme du profil ne permet pas de progressivement augmenter la vitesse de l'air sur sa forme. Nous notons que dans ces études les aérofoils étudiés sont des profils sans aucune cambrure, de manière à limiter les effets de portance ou les effets d'appui créé par le mouvement d'air sur l'architecture. Le réglage de ces éléments se fera de manière spécifique à chaque bâtiment.
Le foil type 5 est un profil en V inversé (pentes symétriques au toit par rapport à l'horizontal) fixé au-dessus du toit à l'axe du faîtage. La distance entre toit et le profil est de 1,40m.

Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent à l'arrière du foil a, approximativement 1 m de l'axe du faîtage, est de 13,0 m/s, soit une augmentation de 2,6 fois la vitesse de l'air entrant.

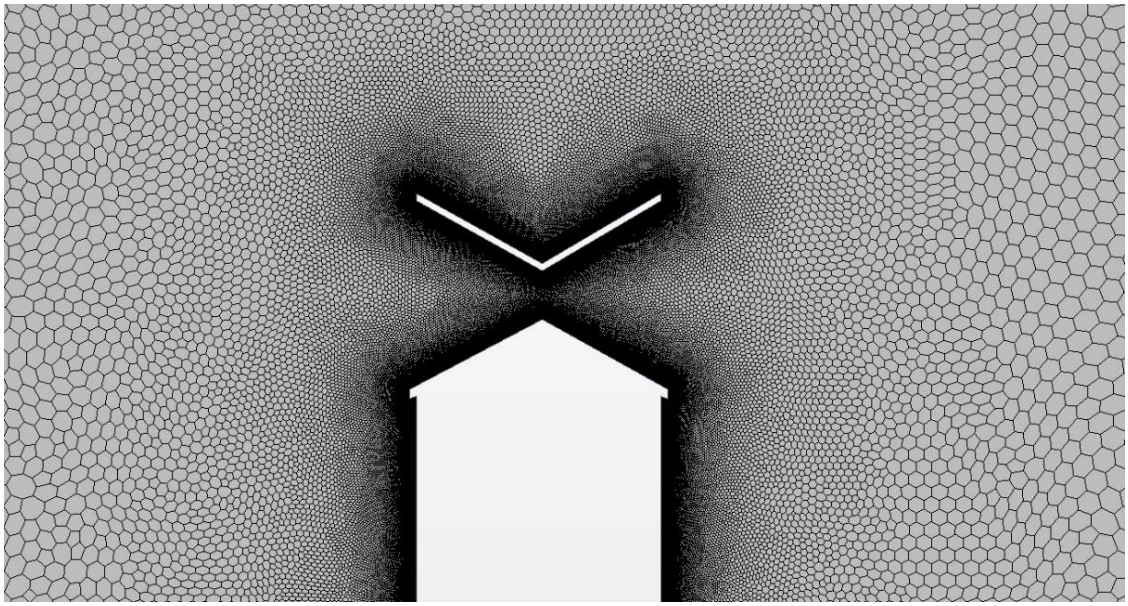


Figure 168. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 5

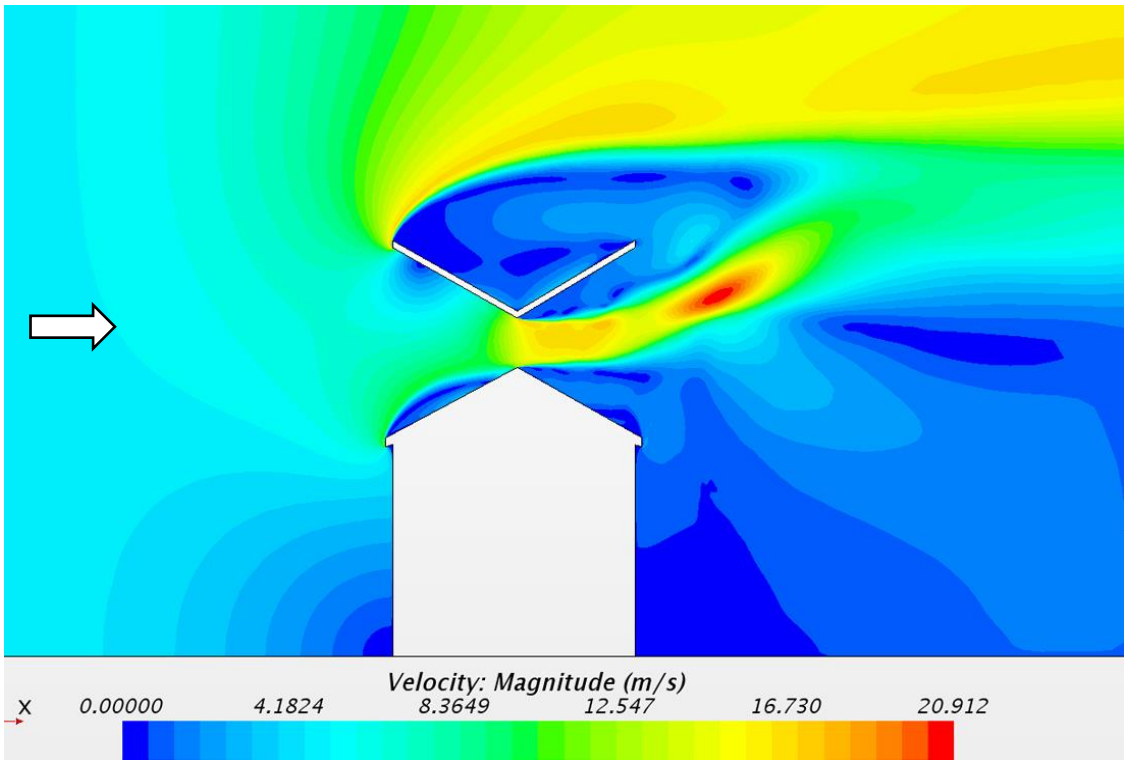


Figure 169. Etude en fausses couleurs du vitesse du vent autour de la maison avec foil type 5

- *Conclusion*

En conclusion de cette première étude, nous identifions qu'une zone d'augmentation d'approximativement 100 % de la vitesse du vent est située à 1,50 m de haut et décalée de 1,80m de l'axe du faîtage de la toiture du bâtiment. Cette analyse des cartes de vitesse de vent de la simulation aéraulique permet d'identifier les zones de plus forte augmentation de vitesse d'air. Cependant, après plusieurs calculs et simulations, nous avons pu constater que ces zones ne sont pas toujours stables dans le temps et peuvent se déplacer vers l'axe du faitage. Pour ces raisons, nous avons conservé l'implantation du dispositif à l'axe du toit plutôt que le désaxer par rapport à cette file. Ces différentes études de cas montrent que l'angle du foil par rapport à l'horizontal et la pente du toit sont des paramètres clés pour régler et contrôler les zones de fortes rafales de vent selon la limite de Betz[131]. La zone rouge (de forte vitesse de vent) lorsqu'elle est plus grande sur la simulation engendre une zone de performance plus stable du dispositif éolien. **La puissance électrique générée par une éolienne dans cette zone des simulations (voir chapitre 3.1.1) est dans un rapport dépendant du cube de la vitesse de l'air, à un endroit donné, donc une augmentation de la vitesse de l'air de : de 100 % en passant de 8 à 16 m/s correspond à une augmentation de puissance de coefficient 8.**

4.3 ETUDE THEORIQUE 2 : LES ACCELERATEURS VERTICAUX - PLAN BATIMENT AVEC FOIL TYPE V1

- *Introduction*

En site urbain dense, le rapprochement des bâtiments et leur verticalité permet de privilégier des dispositifs verticaux installés en façade plutôt qu'en toiture. Le déroulé des façades est dans ces cas-là, supérieur à celui des toitures. La performance de ces systèmes est amplifiée par l'effet « couloir à vent » des rues. Les bâtiments de grande hauteur, qui dépassent l'horizon moyen du Skyline de la ville sont particulièrement exposés aux vents (et en particulier grâce au dépassement du bâtiment de la couche limite du « sol » urbain. Nous étudions ici plusieurs types de « foils » fixés en façade ou dans l'angle d'un bâtiment[132]. La distance du foil par rapport au bâtiment, son angle par rapport au vent, la position relative de la turbine sont étudiés pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse de l'air à l'arrière du foil à approximativement 1 m de l'axe du foil et de 16,5 m/s soit une augmentation de 3,3 fois la vitesse de l'air entrant. Cet écoulement est stationnaire[133].

Dans le cadre de bâtiments de grande hauteur, la surface de façade est bien supérieure à la surface de toiture. Dans ces cas, la mise en œuvre d'aérofoils verticaux offre un plus grand déroulé de surface de captation d'énergie.

Cette étude a été réalisée en plan, dans un angle du bâtiment avec deux types de vitesse de vent et deux types d'angles d'arrivée du vent. Nous avons étudié, dans une première étape, la position relative entre l'angle de l'aérofoil et le bâtiment. Nous avons arrondi puis chanfreiné

[131] Rupp CARRIVEAU, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, BoD – Books on Demand, 2011, 438 p.
[132] ANNIE-CLAUDE BAYEUL-LAINE, « Modélisation tridimensionnelle de l'hydrovoile de M. Gérard WILLS à l'aide du code de calcul Star CCM+ », Rapport d'étude, CNAM ParisTech, 2011.
[133] Dr S. Srinivasa RAO, K. SHANMUKESH, M. K. NAIDU et P. KALLA, « Design and Analysis of Archimedes Aero-Foil Wind Turbine Blade for Light and Moderate Wind Speeds », *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering*, 31 août 2018, vol. 5, n° 8, pp. 01 – 05-01 – 05.

l’angle du bâtiment face au vent afin de guider l’air sur une plus grande longueur (Voir figures 169 et 170).

Figure 170 Etudes 3D d'un aérofoil à 45° sur un angle arrondi de bâtiment

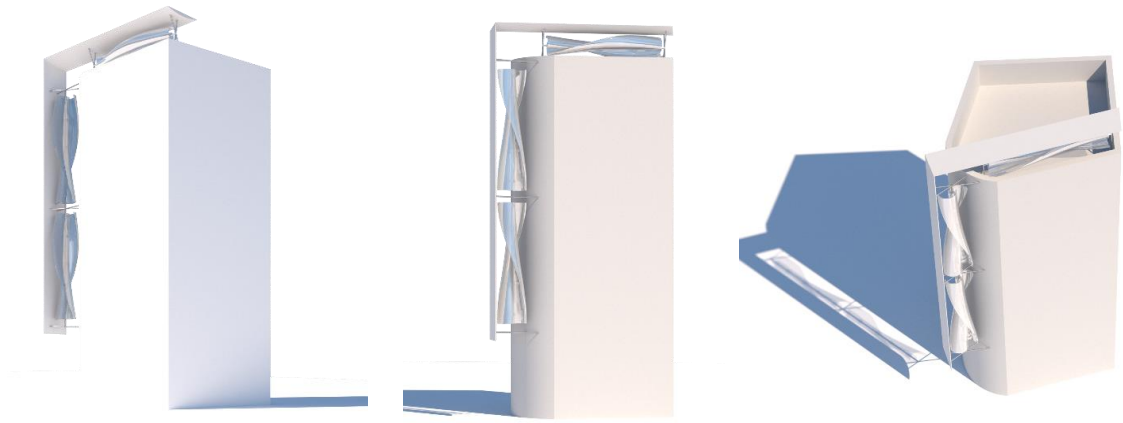


Figure 171 Etudes 3D architecturales d'implantation d'aérofoil à 45° sur un bâtiment en pointe

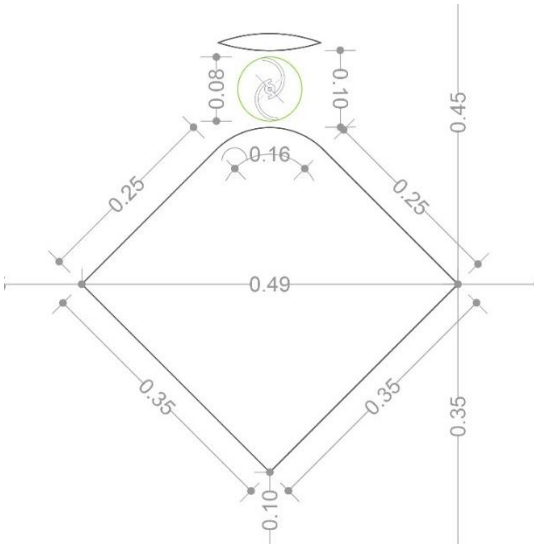


Figure 172. Etude dimensionnelle Foil vertical type H1, Echelle 1/20

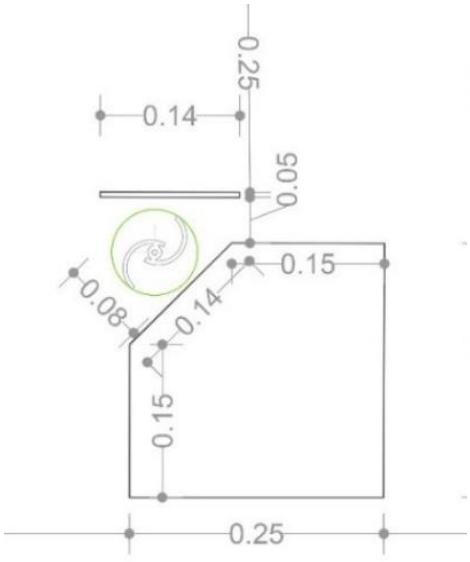


Figure 173. Etude dimensionnelle du foil vertical Type H2, Echelle 1/20

4.3.1 Etude théorique 2 : sans foil en coupe horizontale

Cette simulation aéraulique de vent, sans dispositif ajouté au bâtiment, montre l'écoulement d'air en plan sur l'angle arrondi d'un bâtiment (cas d'un bâtiment à l'angle de 2 rues).

Dans l'angle du bâtiment, on constate qu'avec un vent entrant de 5m/seconde une augmentation de la vitesse du vent de 8 à 10 m/s de par l'angle constitué au sol entre la direction du vent et la position du bâtiment.

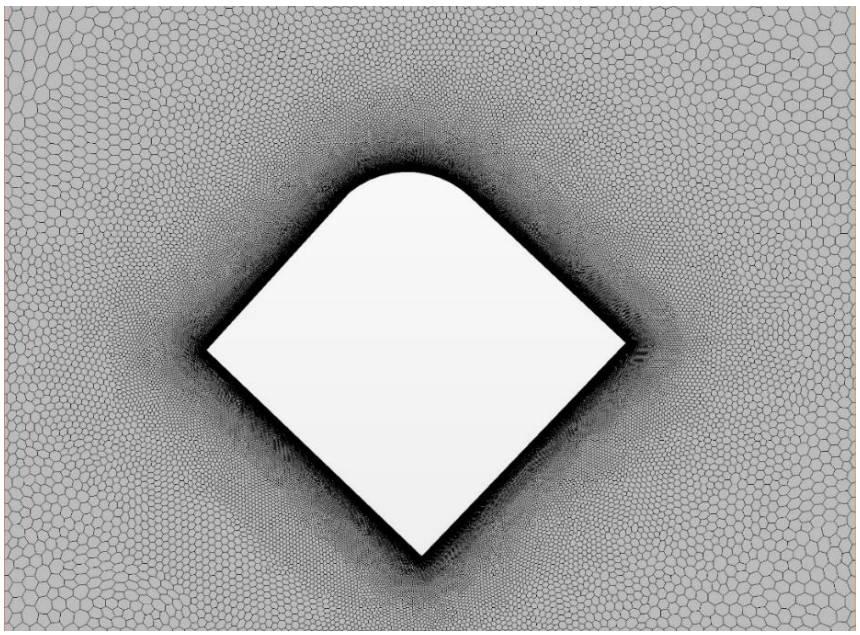


Figure 174. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment sans foil

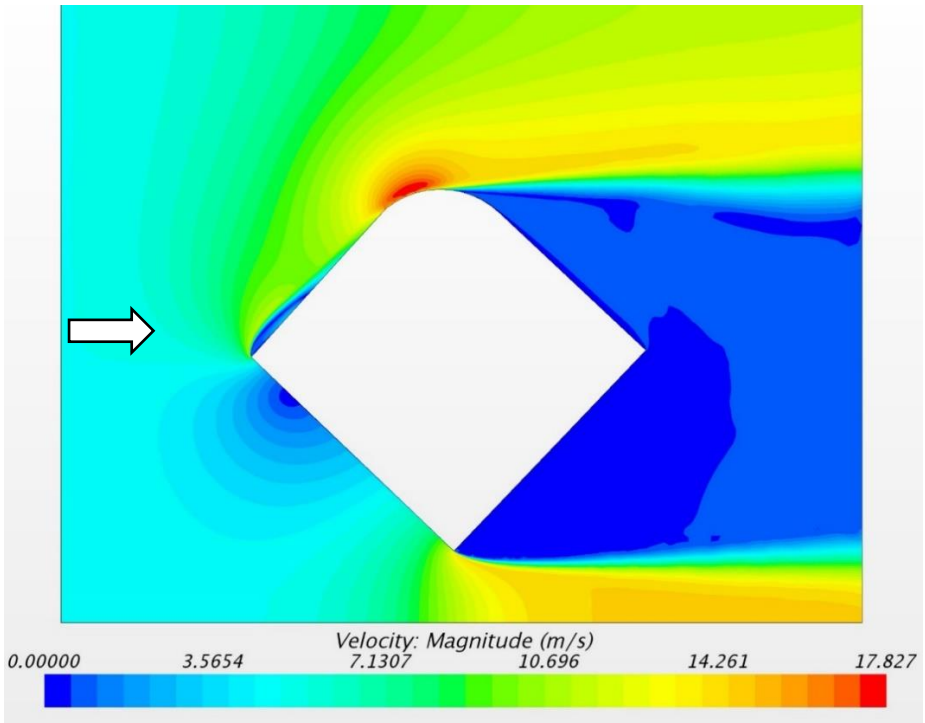


Figure 175. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent sans foil

4.3.2 Etude avec foil vertical V1 à 45°

Le foil type V1 est un profil en aile d'avion situé dans l'angle du bâtiment à 45°. La distance entre bâtiment et le profil est de 1,00 m. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par l'angle du bâtiment et la courbure du foil. Pour un vent émergent de 5 m/s, l'augmentation de la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 14 m/s, soit une augmentation de 2,8 fois la vitesse de l'air entrant.

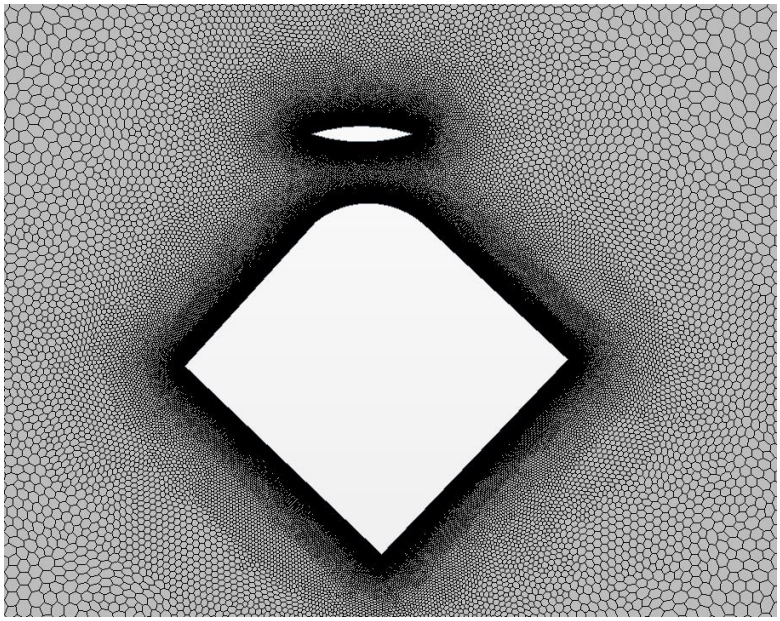


Figure 176. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type V1 intégré

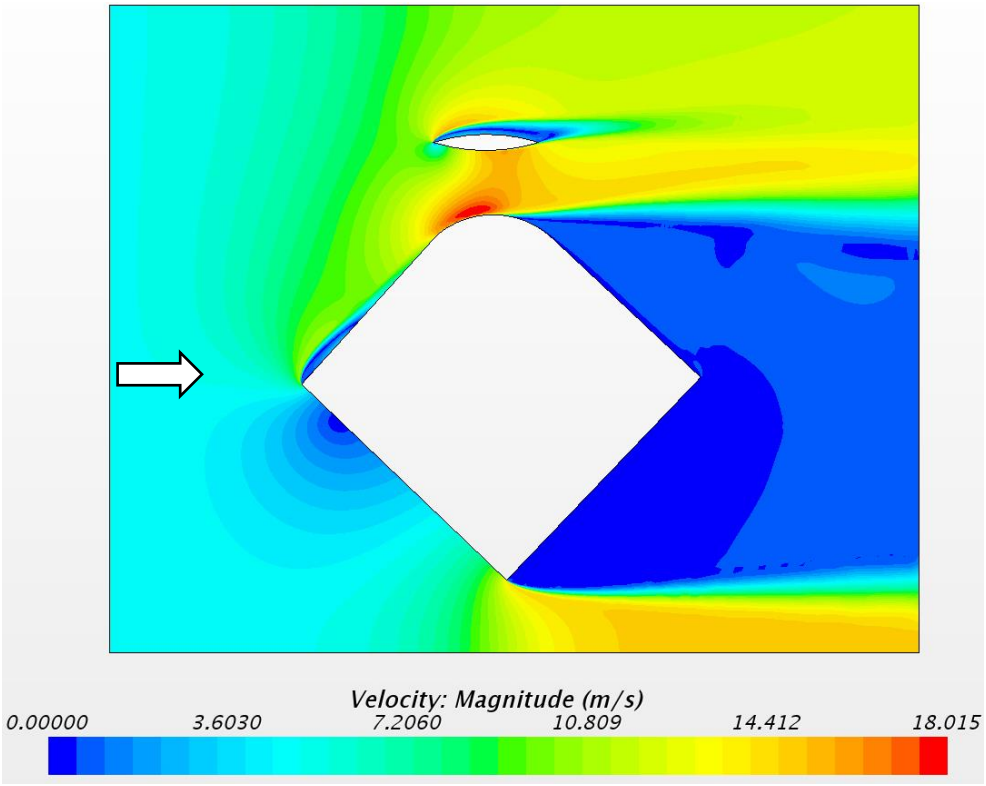


Figure 177. Etude en fausses couleurs de l'accélération du vent autour du foil vertical intégré type V1

4.3.3 Etude avec foil V2 et découpe angle bâtiment en quart de cercle

Le foil type V2 est un profil en aile d'avion positionné parallèlement à une des façades du bâtiment. La distance entre bâtiment et le profil est de 0,60 m. La découpe en creux du profil du bâtiment permet l'encastrement de l'éolienne dans le volume du bâtiment afin de limiter son impact visuel. Pour un vent émergent de 5 m/s, l'augmentation de la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 9m/s, soit une augmentation de 1,3 fois la vitesse de l'air entrant.

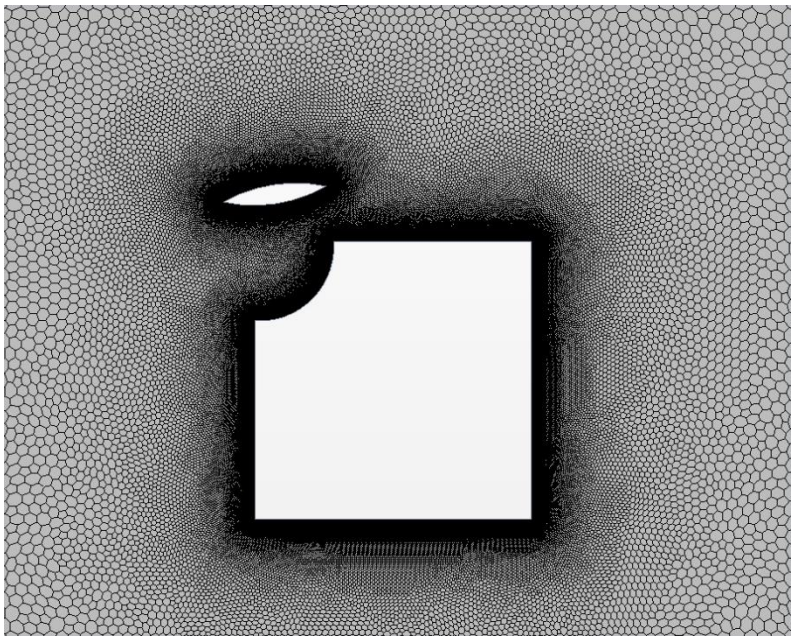


Figure 178. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type 2 intégré

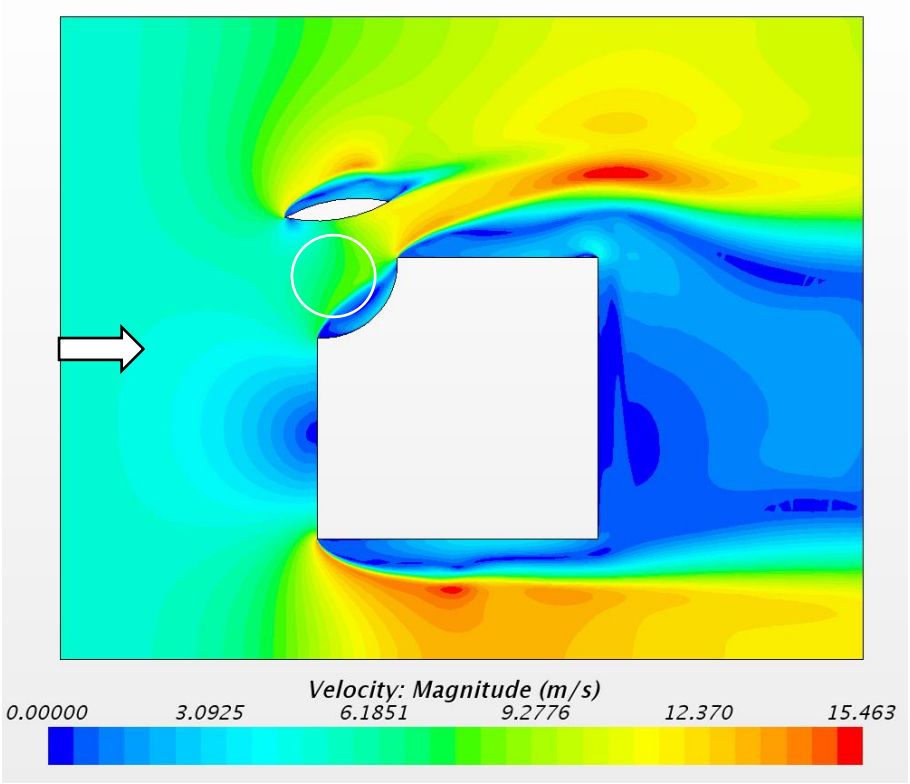


Figure 179. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type 2. Cette simulation montre que ce choix de volume en creux n'a aucun intérêt pour accélérer l'air sur place

4.3.4 Etude avec foil V3 à 90° par rapport à la façade

Le foil type V3 est un profil en aile d'avion positionné parallèlement à une des façades du bâtiment. La distance entre bâtiment et le profil est de 1,10 m. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par l'angle du bâtiment et la courbure du foil. **Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 12m/s, soit une augmentation de 2,2 fois la vitesse de l'air entrant.**

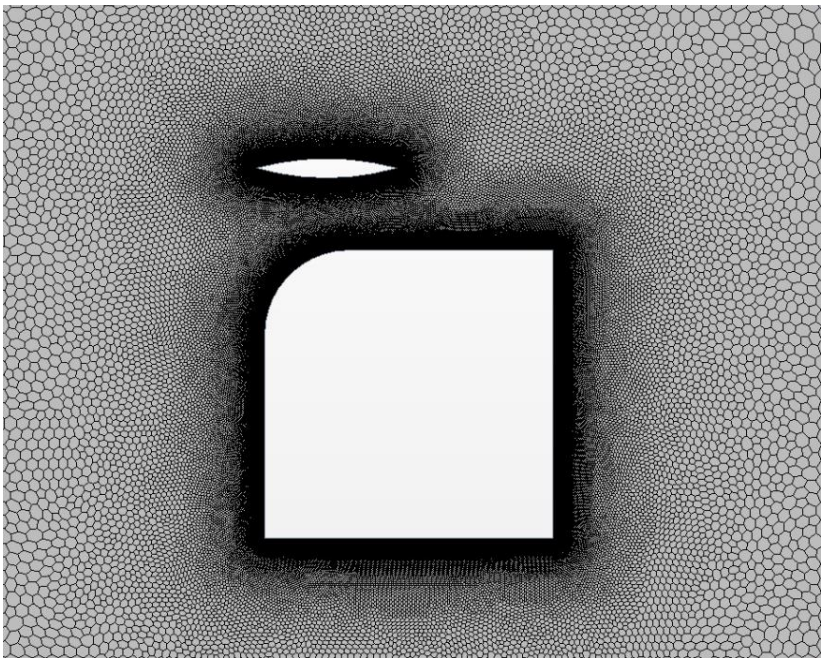


Figure 180. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type V3 intégré

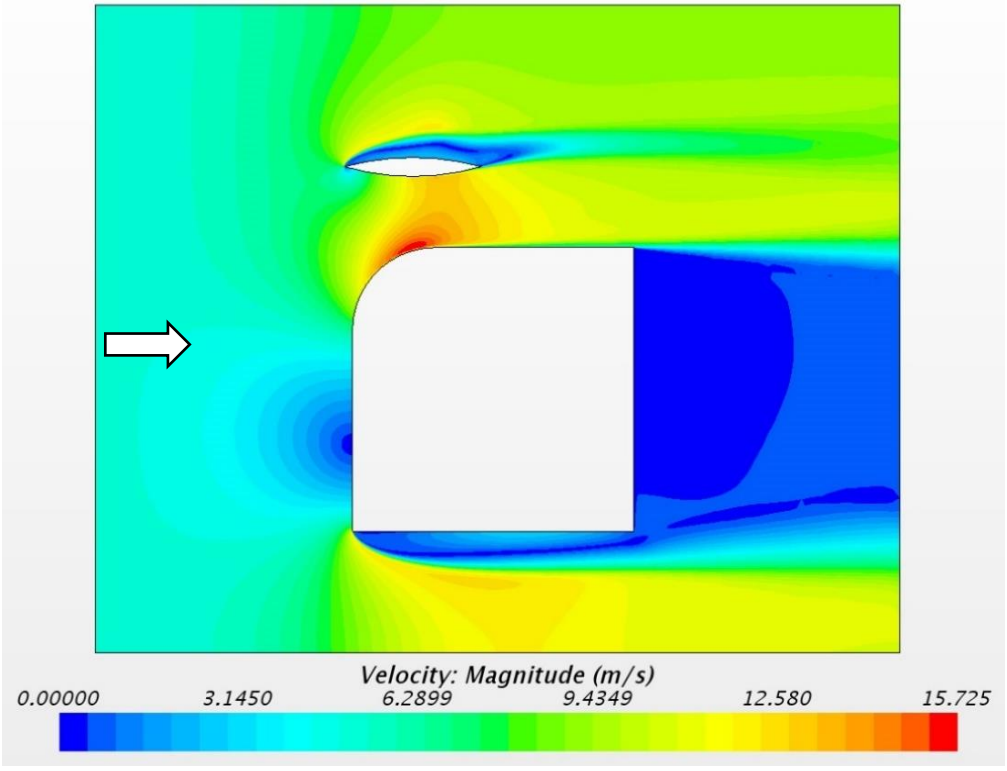


Figure 181. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type V 3

4.3.5 Etude avec foil V4 et angle bâtiment arrondi

Le foil type V4 est un profil en aile d'avion positionné à 45° du bâtiment. La distance entre bâtiment et le profil est de 1,10 m. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par l'angle du bâtiment et la courbure du foil. **Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 11m/s, soit une augmentation de 2,1 fois la vitesse de l'air entrant.**

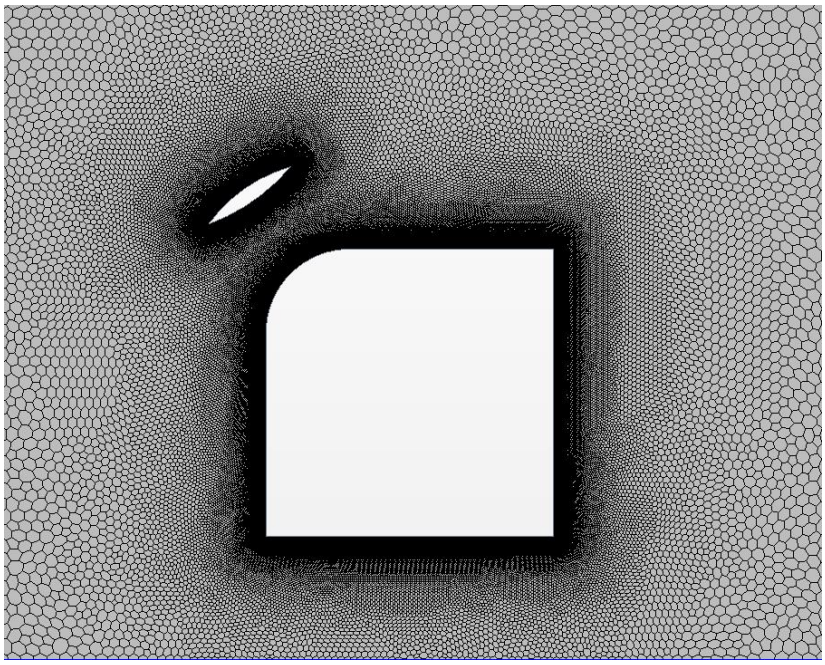


Figure 182. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type V4 intégré

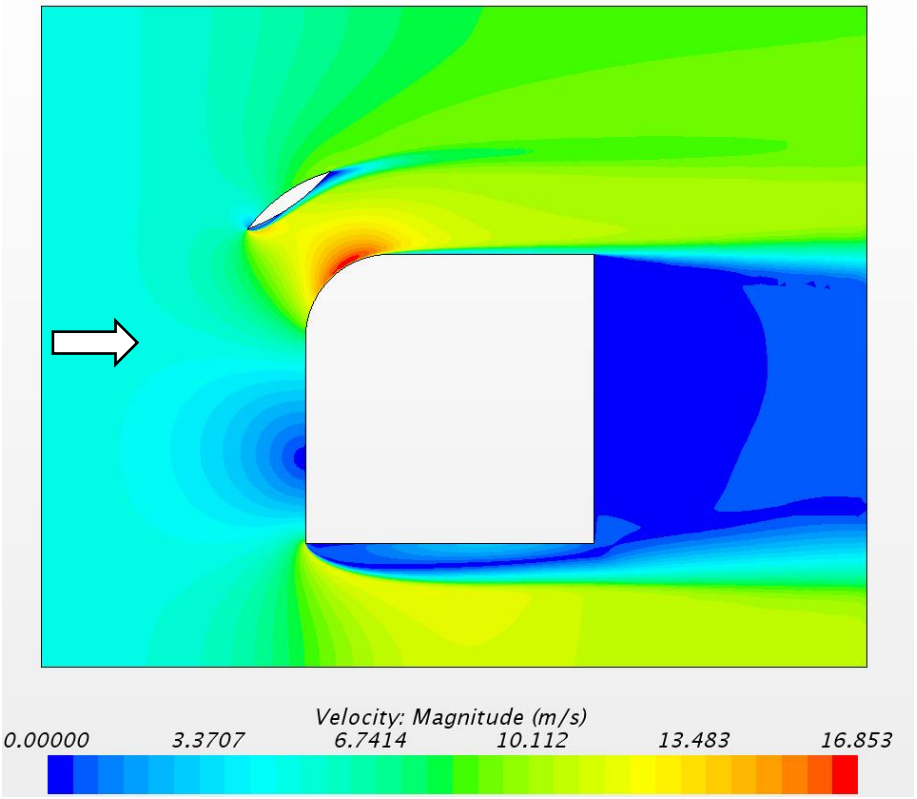


Figure 183. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type V4

4.3.6 Etude avec foil V5 et découpe angle bâtiment à 45°

Le foil type V5 est un profil en aile d'avion positionné à 45° du bâtiment. La distance entre bâtiment et le profil est de 1,10 m. L'effet de compression de la veine d'air est assuré par l'angle chanfreiné du bâtiment et la courbure du foil. **Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 10 m/s, soit une augmentation de 2 fois la vitesse de l'air entrant.**

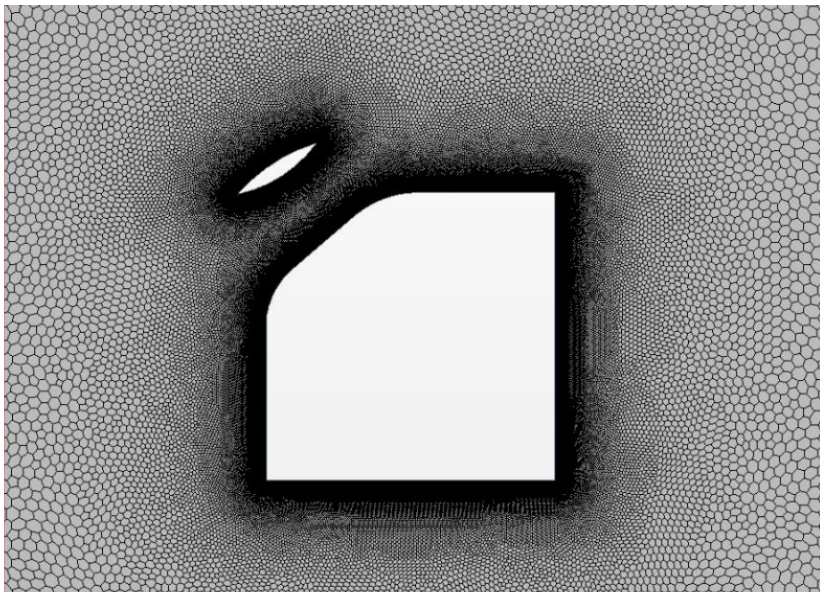


Figure 184. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type 5 intégré

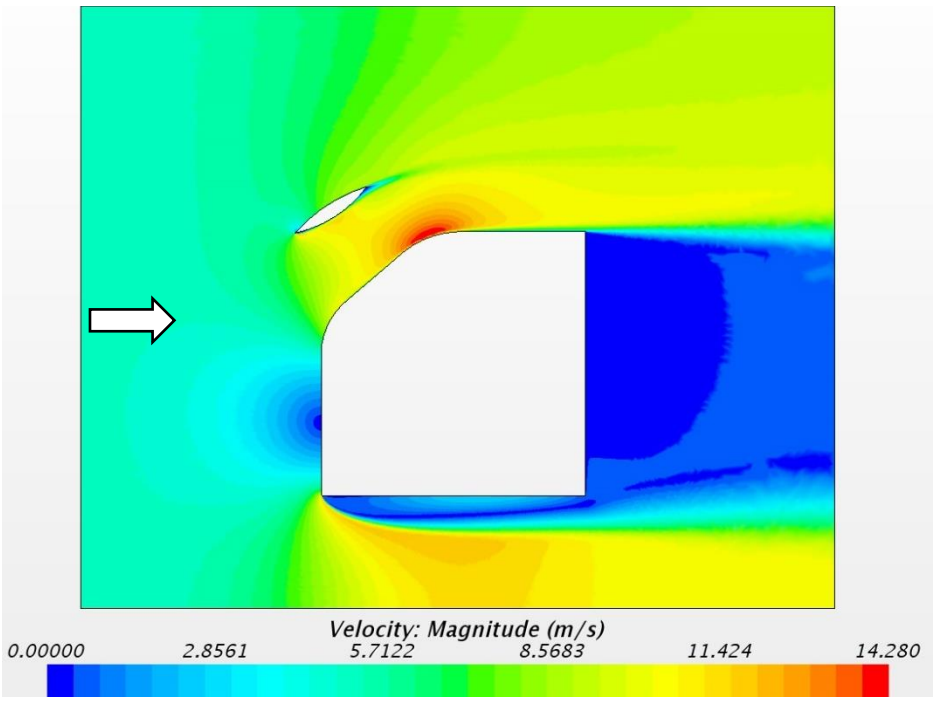


Figure 185. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type 5

- *Conclusion*

En conclusion dans le cas de études d'aérofoils verticaux, la position de la lame à 45 degrés par rapport à l'angle du bâtiment est celle qui engendre la plus forte augmentation de la vitesse de l'air (voir Figure 175). Ce résultat est assez contraignant architecturalement, car il empêche la création de baies ou de fenêtres dans l'angle du bâtiment à 45°, mais elle permet à la fois la canalisation de l'air et une augmentation de la vitesse du vent à 1 m de la paroi du bâtiment. La vitesse de l'air entre le bâtiment et l'aérofoil est de l'ordre de 15M/s. Soit, avec un vent de base à 5m/s, une augmentation de coefficient 3 de la vitesse de l'air.

La puissance électrique générée par une éolienne dans cette zone (voir figure 176) est dans un rapport dépendant du cube de la vitesse de l'air, à un endroit donné, donc une augmentation de la vitesse de l'air de : de 100 % en passant de 8 à 16 m/s correspond à une augmentation de la puissance de 2^3 soit 8.

4.4 ETUDE THEORIQUE 3 : DISPOSITIFS EN ACROTERE

Dans le cas de l'intégration d'un dispositif en toiture, nous avons aussi étudié une implantation en acrotère. L'acrotère[134] en dépassant de la façade au-dessus du toit est un point important d'augmentation de la vitesse du vent au-dessus du bâtiment et de décollement de la couche. Cependant, cette étude montre que l'angle du vent par rapport au bâtiment est concentré sur une surface relativement fine et avec une certaine instabilité.

Nous avons donc étudié un dispositif éolien en acrotère fixé directement au-dessus de l'acrotère. Ce dispositif permet une augmentation de vitesse qui est beaucoup plus ponctuelle mais qui reste de l'ordre de 80 à 100 %.

- *Etude de vent initiale sur acrotère*

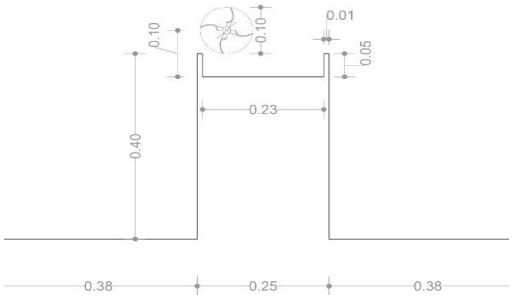


Figure 186. Etude dimensionnelle du bâtiment avec dispositif en en acrotère type 1

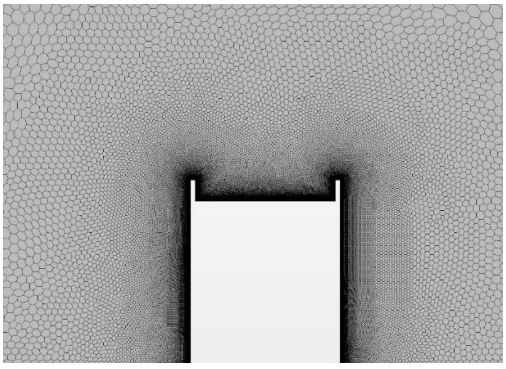


Figure 187. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec dispositif acrotère type 1 intégré

[134] Prolongation de la maçonnerie de façade en toiture pour permettre le relevé d'étanchéité en toiture

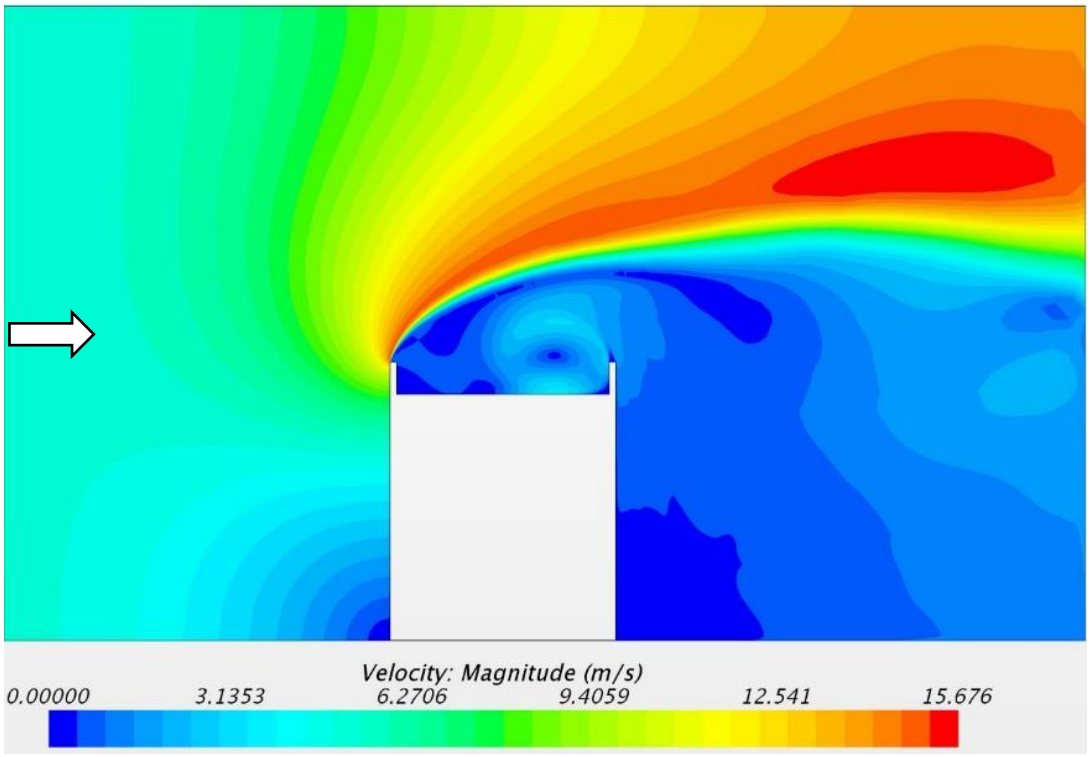


Figure 188. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du dispositif en acrotère type 1

- *Etude de vent sur acrotère avec dispositif A1*

Ce dispositif s'implante légèrement en retrait de l'acrotère[135] à 0,80 m du bord du toit.

Cette étude montre que la vitesse du vent, liée à ce dispositif, est concentrée sur une surface relativement fine et avec une certaine instabilité. Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 10 m/s, soit une augmentation de 2 fois la vitesse de l'air entrant.

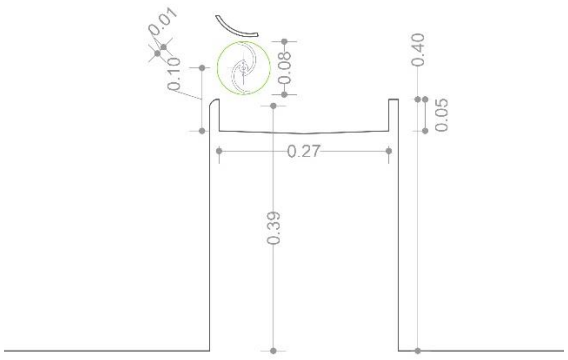


Figure 189. Etude dimensionnelle du bâtiment avec dispositif en en acrotère type 1

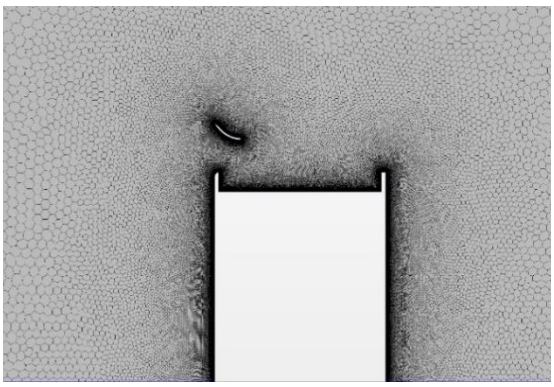


Figure 190. Maillage du modèle 3D de la zone d'étude du bâtiment avec dispositif acrotère type 1 intégré

[135] Prolongation de la maçonnerie de façade en toiture pour permettre le relevé d'étanchéité en toiture

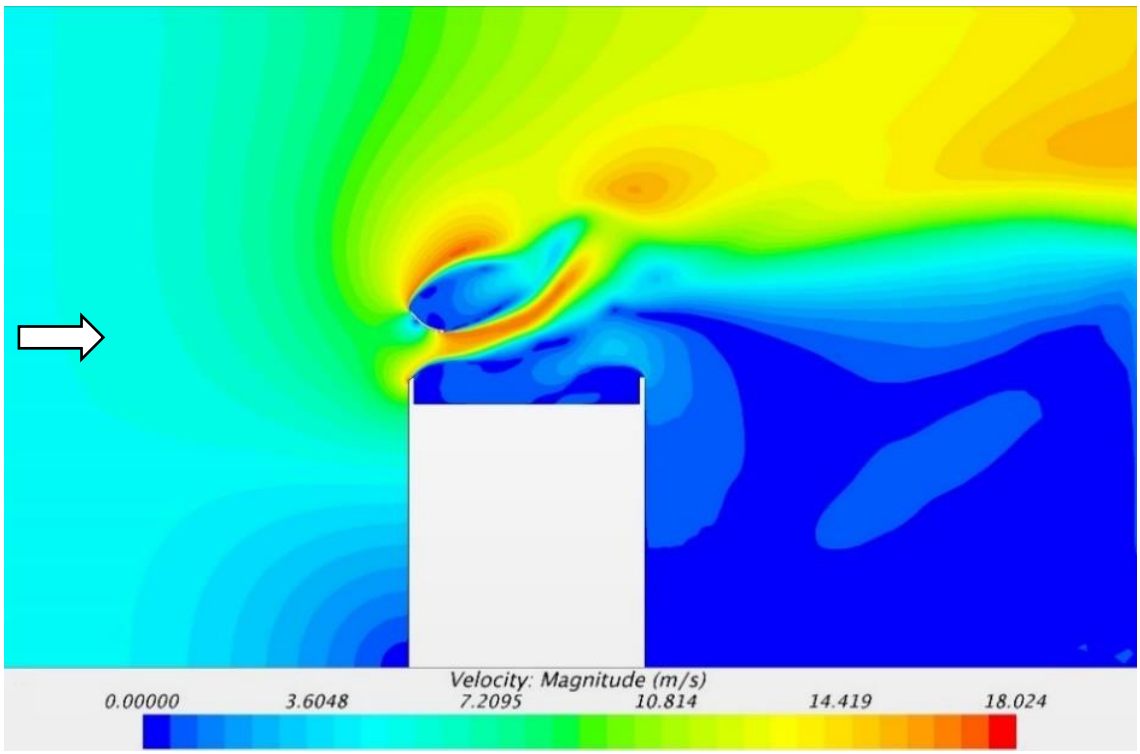


Figure 191. Etude en fausses couleurs de l'augmentation de la vitesse du vent autour du dispositif en acrotère type 1

4.5 ETUDE THEORIQUE 4 : UN IMMEUBLE DE LOGEMENTS EN SITE URBAIN DE TYPE FAUBOURG - IMMEUBLE AU 136 AVENUE PARMENTIER, 75011 PARIS

- *Relevés de vent sur l'immeuble de logements*

Dans les études de cas n°1 et n°2, nous avons étudié un bâtiment haussmannien avec toiture de type Mansart (haussmannien). Ces toits ont une forme réglée par le gabarit urbain de la Ville de Paris, et ils permettent de reculer les façades en toiture afin d'éclairer les rues. Ce profil de toiture, de forme arrondie, se comporte déjà comme un système d'accélérateur de vent.

La simple implantation d'une turbine en partie haute de ce type de toiture présente une augmentation de la vitesse des vents de 120 à 140 % qui atteigne de dispositif de captation d'énergie.

Sur ce type de toiture, des éoliennes peuvent être implantées aux niveaux des souches de cheminée, des lanterneaux de sortie et d'accès de toiture, mais aussi à l'emplacement des supports de toit plus plat pour positionner par exemple les récepteurs ondes radio ou TV.

L'émergence de la fibre pour connecter et desservir les immeubles de réseaux de communication haut débit, a libéré la plupart des immeubles parisiens des antennes de télévision en ouvrant un espace sur leur toiture tout en limitant les turbulences liées à ses ouvrages.

Figure 192 Figure 191. Installation de l'anémomètre sur le toit du bâtiment 136 avenue Parmentier, Paris 11ème. Une antenne de TV a servi de support de fixation du dispositif.

Figure 193. Localisation de la station de relevé de vent – 136 avenue Parmentier, Paris 11ème

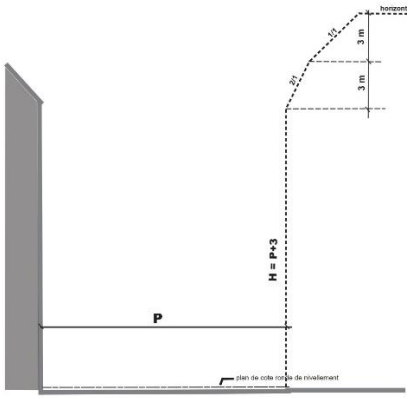


Figure 194 Gabarit - enveloppe en bordure d'une voie de largeur égale ou supérieure à 12 m et inférieure à 20 m non bordée pour installation d'aérofoil

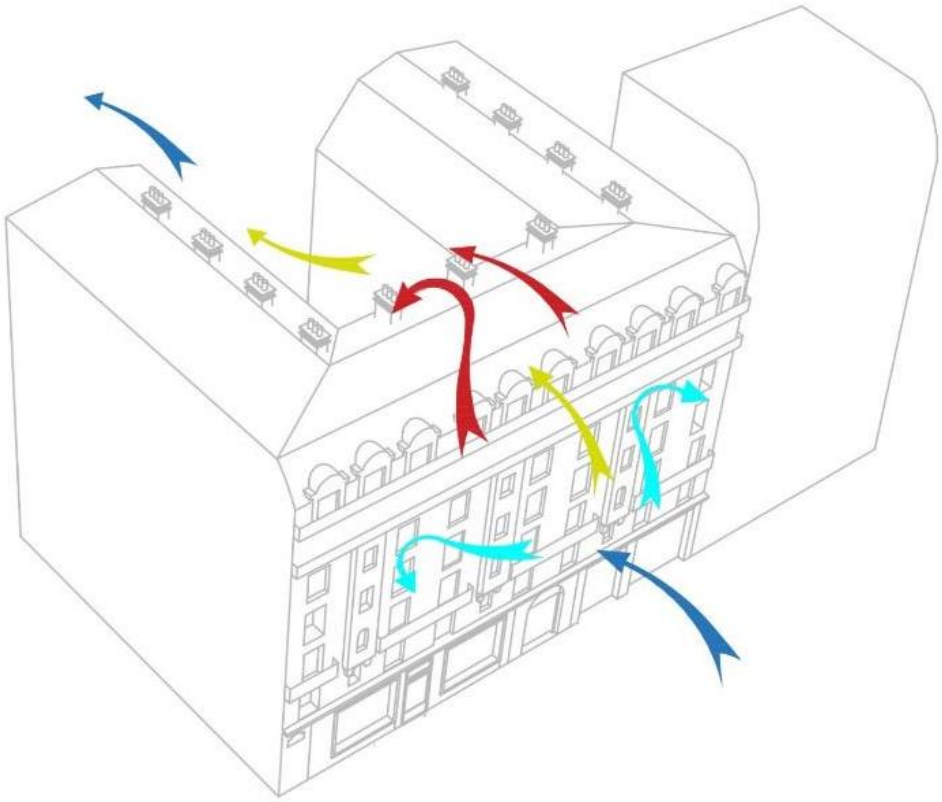


Figure 195. Comparaison de la vitesse du vent mesurée sur le site et à 22m au-dessus du sol et le vent mesuré dans le modèle CFD.

La première station météo de relevé a été installée au 136 avenue Parmentier, Paris 11ème, sur le toit de l'immeuble le 24 Janvier 2016. Depuis cette date, la vitesse du vent quotidienne a été relevé toutes les 10 minutes et nous avons un relevé mensuel de ces informations.

En addition à la station de vent de Serero, cette recherche collecte 4 autres sources de données à Paris à savoir de www.windfinder.com et www.infoclimat.fr ; incluant la station météo de Paris CDG aéroport, l'aéroport de Paris Orly, le Parc Montsouris et en haut de la tour Zamansky sur le Campus de Jussieu, Paris 5ème. Tous ces relevés et observations, donne une analyse expérimentale solide sur des points stratégiques de la ville de Paris.

Vous trouverez ici un tableau de synthèse des données de ces 4 stations de relevés du vent comparée comme indiqué à la date du mois de **Décembre 2018**.

LOCATION	136. AVE PARAMENTIER				CDG AIRPORT				ORLY AIRPORT			
HOUR	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00
DATE												
01.09.2017	1,1/S	1,4/SSW	3,1/S	5/SW	1/NW	1/WNW	2	5/NE	0	1	1/S	2/NNE
02.09.2017	2,5/W	2,2/NW	3,6/SW	5/NE	2/NW	2/NW	3/NW	5/N	2/NW	2/NNW	4/N	3/NW
03.09.2017	1,1/ENE	1,4/SSE	3,6/S	3,3/S	1	2/ESE	3/S	4/SSE	2/W	1/S	3/SSW	3/SSE
04.09.2017	1,1/SSW	4,7/S	4,7/S	4,7/SW	1/N	2/S	6/SSW	2/W	1/E	4/SW	4/SSW	4/W
05.09.2017	3,6/SW	2,5/S	5,3/SSW	5,8/S	3/SW	4/S	6/SW	5/SW	3/SSW	3/SSW	6/WSW	3/SSW
06.09.2017	5,6/SW	5,3/SW	5,3/SW	6,9/SW	6/W	5/W	7/W	7/W	5/WSW	4/W	5/W	5/W
07.09.2017	4,4/SSW	3,6/SW	3,9/SSW	6,9/SSW	2/W	3/S	5/WSW	5/W	4/W	3/WSW	3/WSW	4/WSW
08.09.2017	3,6/S	5,3/S	6,9/S	5,8/S	5/WSW	6/SSW	8/SW	6/SW	3/SW	5/SW	7/SW	5/SW
09.09.2017	3,6/S	5,3/SW	5,3/SW	6/SW	5/SSW	5/WSW	7/WSW	5/WNW	4/SW	4/SW	6/WSW	4/W
10.09.2017	ND	2,2/SSW	2,8/SW	6,9/S	3/SW	4/WSW	5/SW	9/SW	2/SW	2/WSW	3/SSW	7/SW
11.09.2017	10,8/S	5,3/SW	8,1/SW	8,9/SW	9/SW	7/WSW	10/WSW	10/WSW	9/SW	6/W	9/WSW	7/WSW
12.09.2017	4,7/SW	6,1/S	6,7/SW	6,4/SW	5/WSW	6/WSW	5/W	7/WNW	5/WSW	3/SW	5/WSW	6/WSW
13.09.2017	6,1/S	7,5/SSW	5,3/SSW	4,7/WSW	9//SSW	9/SW	9/W	7/W	7/SSW	8/SW	8/WSW	4/WNW
14.09.2017	10,8/SSE	5,6/SW	5,3/SW	3,6/WSW	4/W	6/WSW	10/W	6/WSW	4/WSW	7/WSW	8/W	6/W
15.09.2017	3,3/SW	3,9/SW	ND	ND	5/WSW	3/SW	3/WNW	3/W	3/SW	3/W	3/W	5/W
16.09.2017	ND	2,2/SSW	ND	ND	2	3/WSW	3/WSW	4/W	2/WSW	2/WSW	3/SSW	2/WSW
17.09.2017	ND	1,4/S	1,9/S	1,9/SW	2/SSE	3/SE	2/SW	2/WNW	2/SSE	3/SSW	2/SSW	3/NNW

Figure 196. Comparaison de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly, Montsouris), et des anémomètres connectés à 22 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment de type "Faubourg", d'une usine d'air comprimée

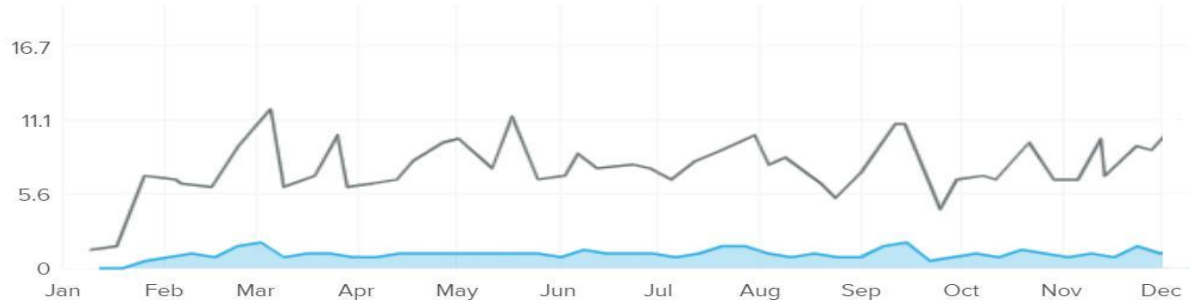


Figure 197. Relevé de la vitesse de vent de la station météo Parmentier (moyenne mensuelle des vents en 2018) à 22m de hauteur depuis la rue dans un environnement urbain dense de type "Faubourg." En m/s sur l'ave vertical.

Les vitesses du vent ont permis de déduire la vitesse moyenne. Les directions du vent ont permis d'identifier la direction du vent principal pour les conditions initiales du modèle numérique.

- *Etude initiale du vent sur toiture à la mansart*

Nous étudions ici l'impact de la toiture à la mansard d'un bâtiment parisien sur l'écoulement du vent à sa périphérie.

Cette étude montre que l'augmentation de la vitesse du vent est forte et continue sur les 2 pans du toit à la mansard (le brisis et le terrasson). Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 10 m/s, soit une augmentation de 2 fois la vitesse de l'air entrant.

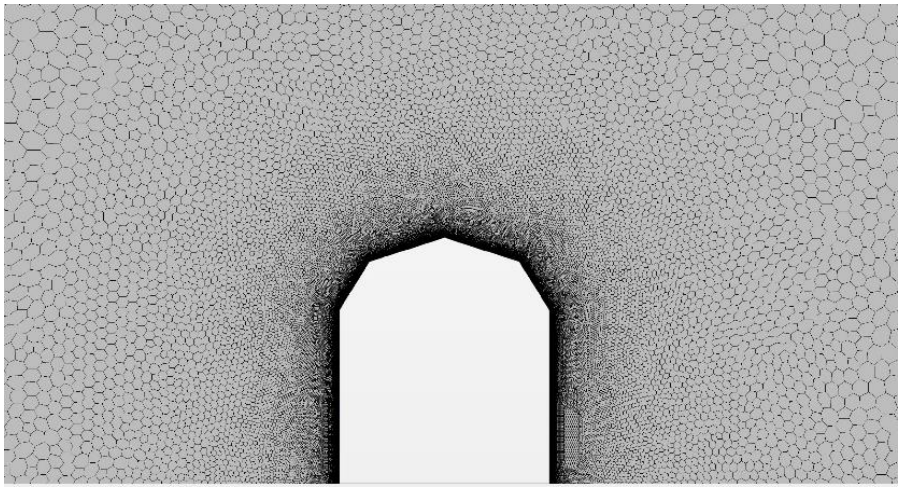


Figure 198. Maillage du modèle 3D de la zone d'étude de la toiture mansard sans dispositif

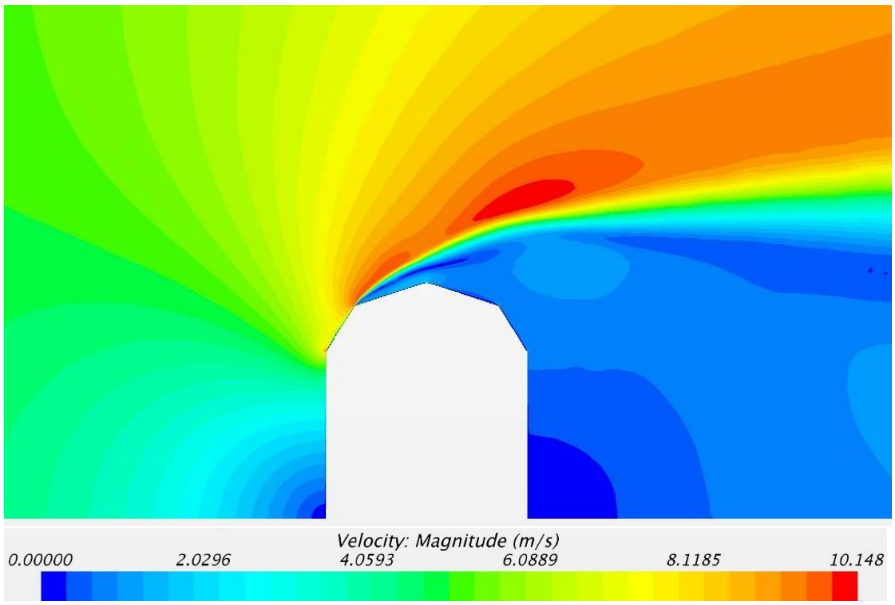


Figure 199. Simulation de la vitesse du vent autour de la toiture du bâtiment sans dispositif

- *Etude du vent avec foil M1 sur toiture à la mansart*

Nous étudions ici l'impact de la toiture à la mansard d'un bâtiment parisien sur l'écoulement du vent à sa périphérie.

Cette étude montre que l'augmentation de la vitesse du vent est forte et continue sur les 2 pans du toit à la mansard (le brisis et le terrasson). **Pour un vent émergent de 5 m/s, la vitesse du vent entre le bâtiment et le foil est d'approximativement de 10 m/s, soit une augmentation de 2 fois la vitesse de l'air entrant.**

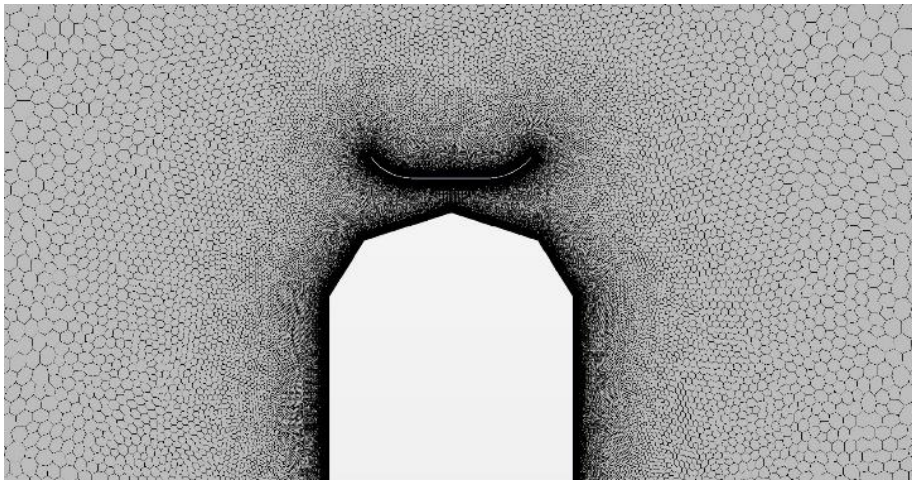


Figure 200. Maillage du modèle 3D avec dispositif

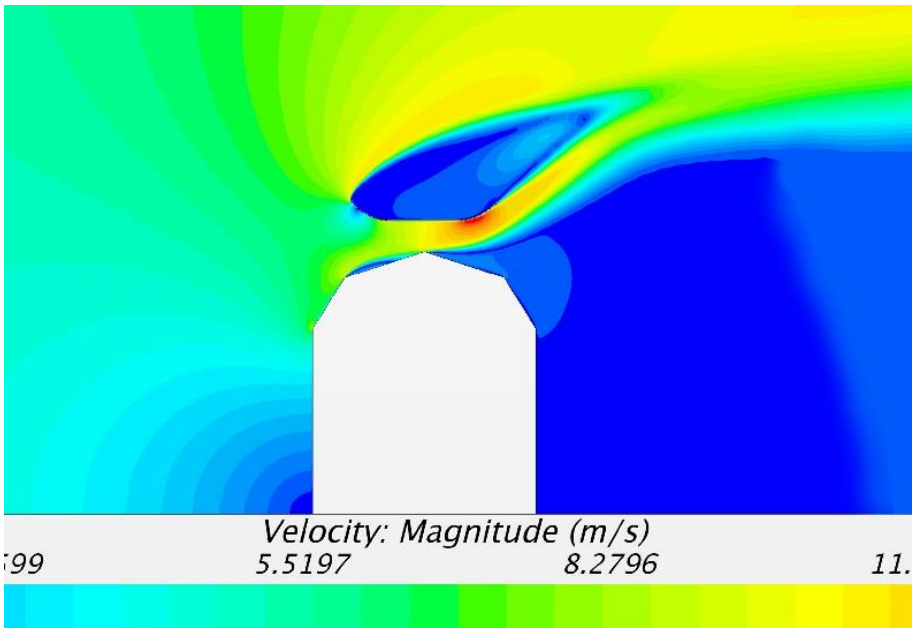


Figure 201. Simulation de l'augmentation de la vitessedu vent autour du bâtiment haussmannien avec dispositif

4.6 ETUDE THEORIQUE 4 : UN BATIMENT-ILOT (IGH) EN SITE VENTE

4.6.1 Présentation du contexte de l'école d'Architecture Paris Val-de-Seine (75013)

Le site étudié est l'école d'architecture Paris Val-de-Seine. Le bâtiment est situé au 3 quai Panhard Levassor à Paris 75013. Construit par l'architecte Frédéric Borel en 2008, le bâtiment est composé d'une usine ancienne d'air comprimé (la Sudac). Une cheminée de très grande hauteur (plus de 50 mètres de haut) et d'un bâtiment neuf de type IGH (immeuble de grande hauteur) d'une hauteur de 50 mètres. Cet ensemble de bâtiments est particulièrement intéressant pour 3 raisons :

- Ce bâtiment est un bâtiment-îlot, c'est-à-dire que l'ensemble de ces bâtiments constitue un îlot parisien complet bordé de rues.
- Deuxièmement, le bâtiment est situé dans une zone ventée à double titre : il est situé en bordure de Seine et cette implantation lui offre un couloir de vent particulièrement dégagé à cet endroit. Il est aussi situé à proximité du boulevard périphérique, un deuxième couloir de vent important dans la direction nord-ouest.
- Troisièmement, ce bâtiment est facilement accessible en tous points puisque c'est un bâtiment public pour lequel, après demande d'autorisation, la direction des études nous a autorisé à lancer une expérimentation-pilote consistant à des relevés de vitesse de vent en périphérie de ce bâtiment. 9 points singuliers ont été identifiés comme intéressants[136] (Voir Figure 206). Nous avons donc, pendant plusieurs mois, positionné 3 anémomètres à ultrasons en différents points du site. Ces points ont été utilisés pour relever en continu les mesures de vent (Le logiciel Netatmo enregistre un état des vents à intervalle de 5 minutes). Elles ont été comparées avec une mesure de vent référence (Vref) relevé par un anémomètre positionné sur une balustrade à proximité du boulevard périphérique adjacent à l'Ecole d'architecture. La comparaison entre la prise de mesure référence Vref et les relevés en plusieurs points sur le bâtiment confirme l'impact important de l'échelle de cette structure sur les vents. De par sa volumétrie globale et de l'ensemble de ses décrochés multiples, constitutifs l'architecture de Frédéric Borel, le bâtiment génère des couloirs de vent spécifiques et montre des augmentations de sa vitesse que notre analyse a pu relever. Nous avons comparé les vents sur 3 zones, particulièrement intéressantes de ce bâtiment, qui ont été identifiées lors des relevés de vents.

    1- Entre les 2 tours, côté Seine, se constitue un couloir à vent très fort qui a d'ailleurs fait l'objet de l'installation de brise-vent sur une terrasse en partie haute du bâtiment.

    2- Les terrasses latérales, en haut des tours montrent que sur les côtés du bâtiment, des zones significatives d'augmentation de vitesse du vent existent.

    3- En haut du bâtiment au niveau des équipements techniques de la centrale de traitement d'air, l'édicule d'ascenseur génère, lui aussi, une très forte vitesse de vent de 2 à 3 mètres au-dessus du niveau de la toiture.

    De ce point de vue, ce bâtiment constitue un cas significatif pour comparer vents émergents sur un site et son profil architectural afin d'évaluer la captation possible

[136] Voir schéma des implantations de ces dispositifs de relevés anémométriques au 4.7.3

d'énergie éolienne. Il semble que cette situation laisse présager un fort potentiel de l'architecture de Frédéric Borel pour intégrer des dispositifs éoliens intégrés à son architecture morcelée, fragmentée, faite de détachements et d'articulations des volumes les uns par rapport aux autres. Ce langage formel architectural génère des « **effets de bord »,** effets **de décollement** en toiture ou des **augmentations de vitesse d'air** à sa périphérie dont la puissance et l'efficacité sont rarement identifiés lors de sa conception.

4.6.2 Méthode de relevés des vents en périphérie de ce bâtiment-ilot

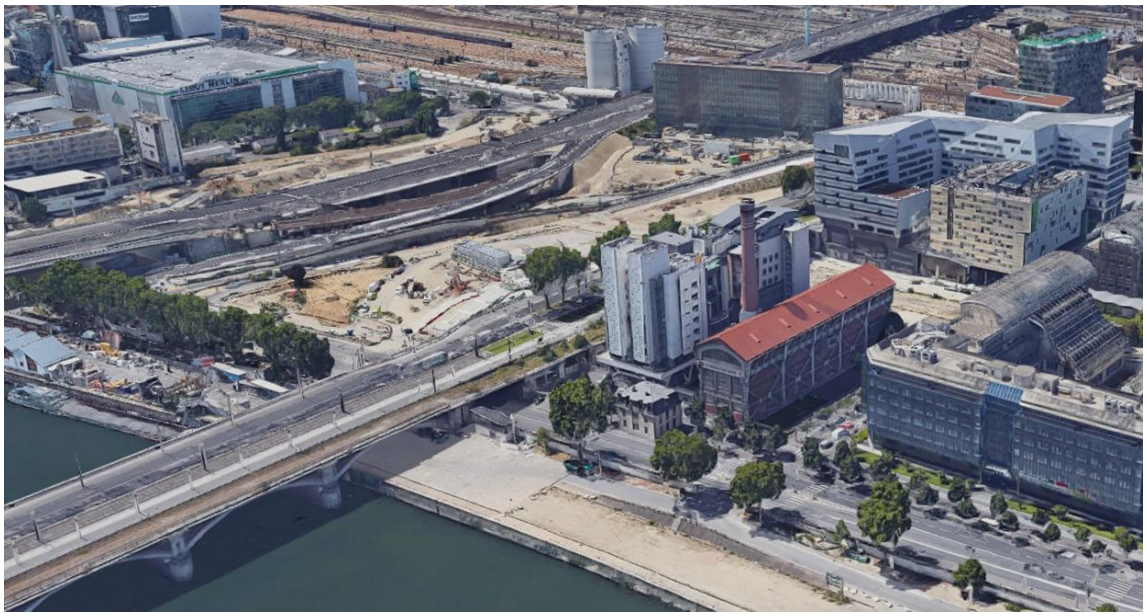


Figure 202. Localisation du nouvel anémomètre à l'ENSAPVS

De par sa localisation à la croisée de 2 grands couloirs urbains ouverts constitué d'un côté par le lit de la Seine et de l'autre par le dégagement du boulevard périphérique, l'école d'architecture Paris Val-de-seine offre un site ouvert et venté sur 270 degrés. Le bâtiment de l'école Paris Val-de-Seine est situé sur un campus universitaire urbain où chaque département universitaire constitue un véritable îlot de la ville. Les entités volumétriques qui définissent l'architecture de ce bâtiment sont un bâtiment-ilot urbain , à l'échelle de la ville.

Nous avons proposé plusieurs installations d'anémomètres sur les toitures et les débords de ce bâtiment afin de vérifier les écoulements de vent en sa périphérie.

Figure 203. Vue du dispositif inséré sur le toit du bâtiment (Paris 75013)

4.6.3 Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine (75013)

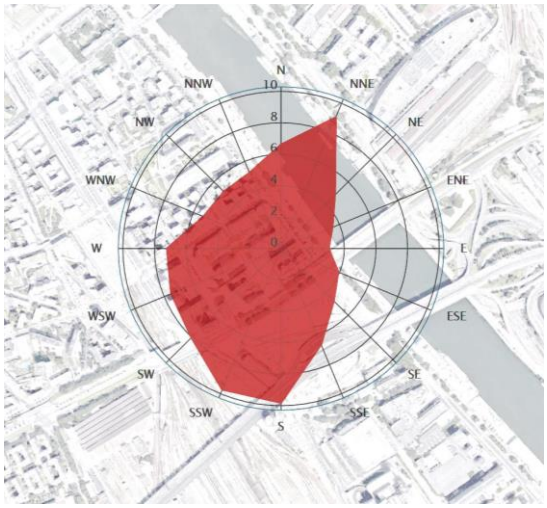


Figure 204. Distribution de la direction du vent en pourcentage annuel, Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine. Paris 75013

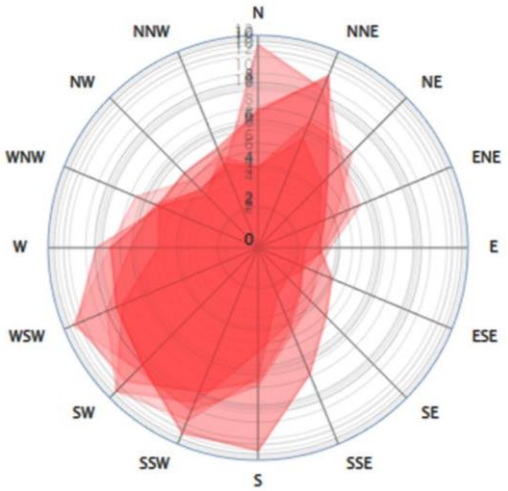


Figure 205. Etude des vents mesurés par la totalité des stations météo connectées montrant les directions de vent principales à Paris. Par Windfinder

Les données mesurées sur ces différents points permettent de construire la rose des vents (Figure 203). Cette méthode traditionnelle d'analyse des vents ne permet pas de rendre compte de la complexité des phénomènes. Elle montre une direction des vents sur une logique pendulaire Sud-Ouest/ Nord-Est avec une grande variation de vitesse et de direction en site urbain. Ces éléments sont utilisés pour paramétrer le modèle numérique aéraulique. En région parisienne, la direction principale du vent est SSO et NNE. Cette information nous donne une

première hypothèse d'implantation de dispositifs de capture d'énergie sur les toits et façades des bâtiments.

Nous avons ensuite réalisé un modèle 3D très détaillé des bâtiments, ainsi que l'ensemble du contexte sur une périphérie d'approximativement un kilomètre. Cette maquette numérique permet d'étudier l'impact des vents sur le site, en coupe horizontale et verticale. Il est à noter que les bâtiments à l'arrière de l'école Paris Val-de-Seine sont rehaussées au niveau de leur topographie de 10 à 15 mètres par rapport au sol du bâtiment pour passer au-dessus des voies de chemin de fer de la gare d'Austerlitz. Cette **topographie artificielle** participe aussi au soulèvement du vent émergeant de la Seine autour de l'ENSAPVS.

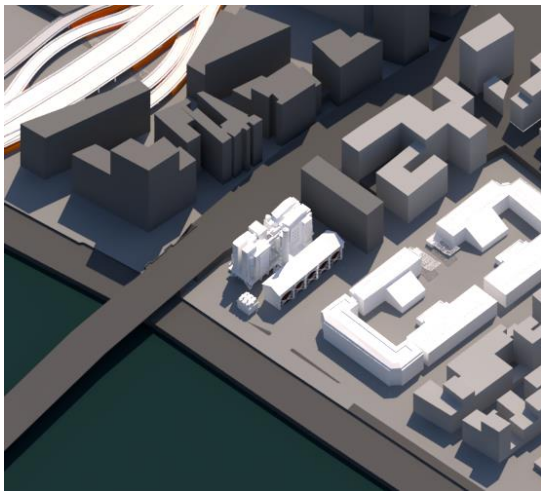


Figure 206. Le bâtiment de l'ENSAPVS dans son grand contexte urbain (source : modélisation 3D par D. Serero)

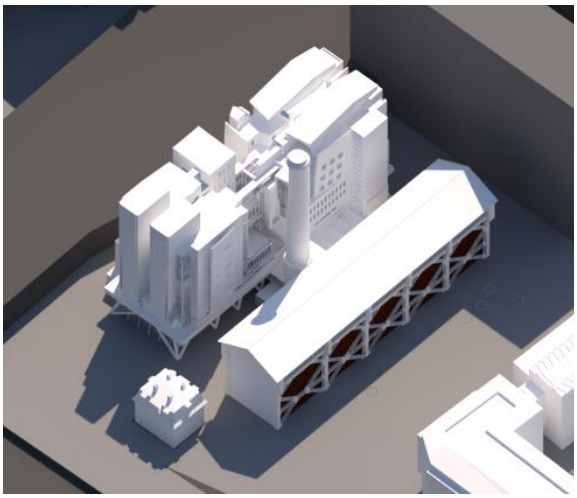


Figure 207. Vue aérienne des différents bâtiments qui constituent l'ENSAPVS (source idem)

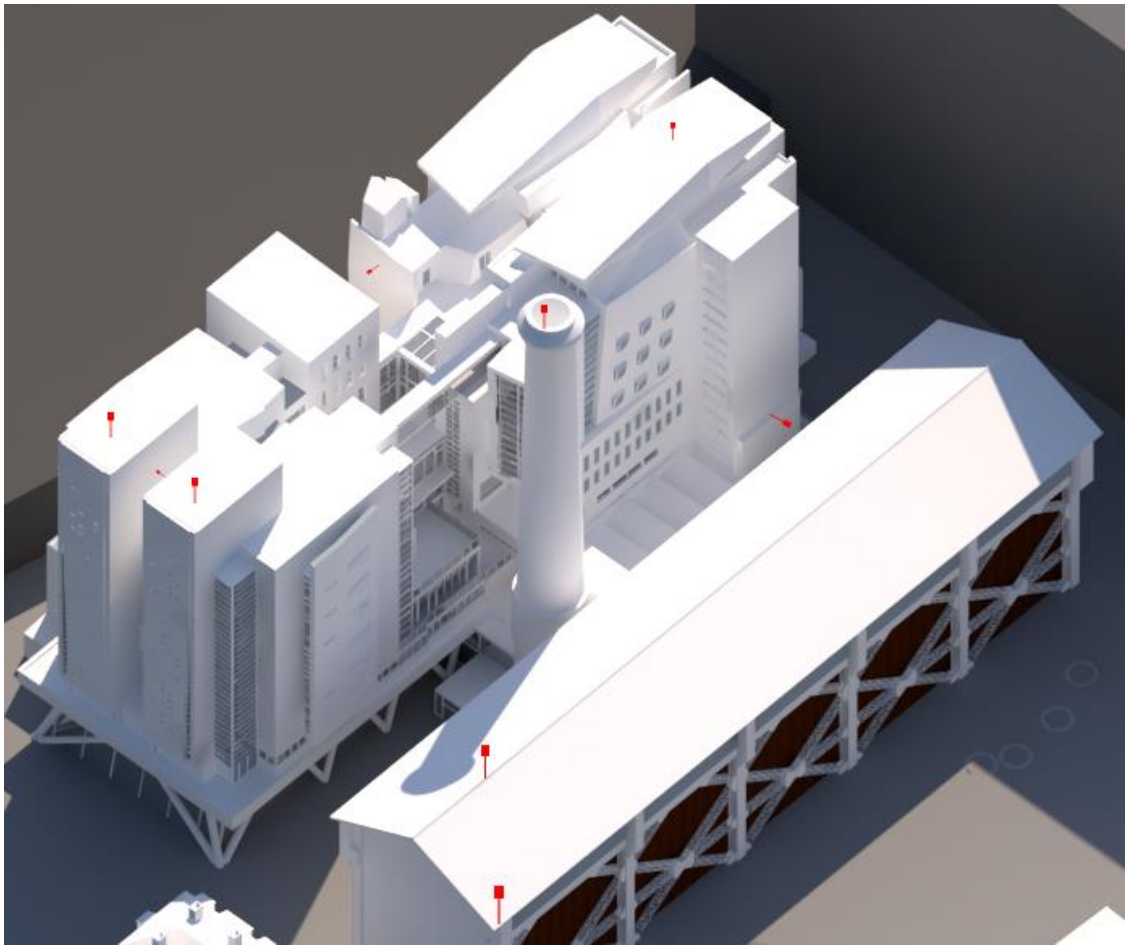


Figure 208. Position des 9 zones identifiées pour le relevé par anémomètres connectés

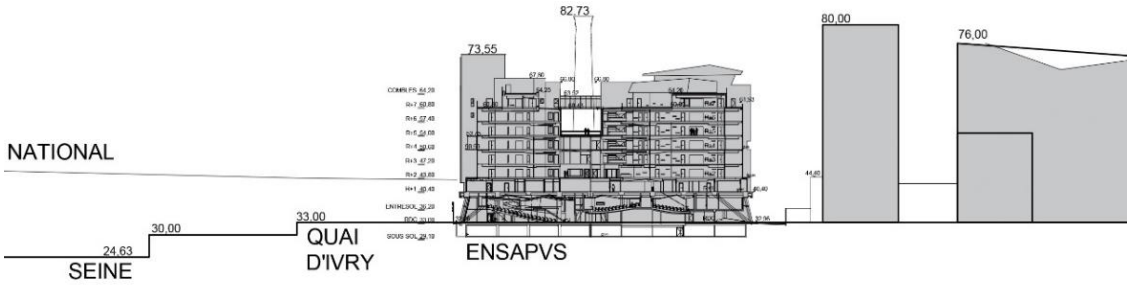


Figure 209. Coupe urbaine de l'ENSAPVS qui montre le rapport entre la Seine et l'avenue de France en haut du site. (source : Coupe dessinée par D. Serero)

4.6.4 Méthode de simulation aéraulique en zone urbaine du site de l'ENSAPVS

Le plan de l'école d'architecture Paris Val-de-Seine est conçu comme l'assemblage de quatre tours raccordées par un noyau central[137]. Ce principe architectural selon l'architecte Frédéric Borel[138] développe l'idée de faire cohabiter quatre écoles et quatre pédagogies du projet au sein d'un même espace. Cette stratégie se traduit par une architecture du fractionnement, du cisaillement où des volumes étroits se comportent véritablement comme des accélérateurs de vent. La présence de ces grandes tours à un carrefour urbain entre la Seine et ses quais et l'espace ouvert constitué par le boulevard extérieur le long de la zone du campus Masséna qui guide les vents dans ce quartier.

Ces augmentations de vitesse de vent ont d'ailleurs imposé le renfort de murs rideaux et de garde-corps notamment dans les salles du 7ème et 8ème étage qui ont des terrasses dédiées à l'enseignement et qui n'ont rien jamais pu être réellement utilisées dû aux grands vents et au soulèvement des objets sur cette terrasse.

La méthode développée ici a pour objectif l'analyse de l'écoulement d'air autour du bâtiment à partir d'un modèle 3D détaillé du site existant. Nous avons sélectionné 2 coupes verticales et 2 plans dans ce volume 3D qui présentent les **points de singularité de la géométrie ou de la topographie de ce site**. En utilisant le logiciel de simulation numérique Star CCM+, nous avons réalisé plusieurs simulations de comportement en 3 dimensions de l'écoulement d'air. Ce calcul a une résolution moyenne (10 000 facettes de maille) impose 8 à 10 jours de temps de calcul (200 à 240 heures, Intel Core i7, 16 cœurs) rendant difficile l'interaction et la mise au point progressive du modèle 3D. Nos ressources limitées pendant cette recherche ne nous a pas permis l'accès à une machine virtuelle de calcul pour réduire les temps de calcul et pour augmenter la résolution du calcul complet tridimensionnel de la simulation.

Nous avons proposé, afin de minimiser les temps de calcul à 2 jours, de réaliser des calculs sur des zones réduites telles que sur des coupes horizontales ou verticales précisément sélectionnées. Cette technique permet aussi d'améliorer la lisibilité du comportement du vent dans les documents graphiques produits.

[137] Richard SCOFFIER, *Ecole nationale supérieure d'architecture de Paris Val-de-Seine*, Archibooks., 148 p.
[138] Richard SCOFFIER, *Frédéric Borel*, 01 éd., Paris, France, Norma, 2004, 224 p.

Elle ne permet pas cependant d'identifier dans le repère spatial **les zones de changement de vitesse de l'air**, ni d'identifier avec une animation **l'état stationnaire des vents** en dehors de ce modèle.

La première étape de cette étude et la réalisation **d'un maillage** permettant d'accentuer la définition du calcul aux alentours des points particuliers et singuliers de la structure. Le schéma ci-dessous donne un exemple de maillage pour **environ 25 000 mailles**. L'ensemble de la simulation numérique est ainsi calculé et évaluée progressivement à partir de l'algorithme de calcul sur ces 25000 mailles dans le modèle.

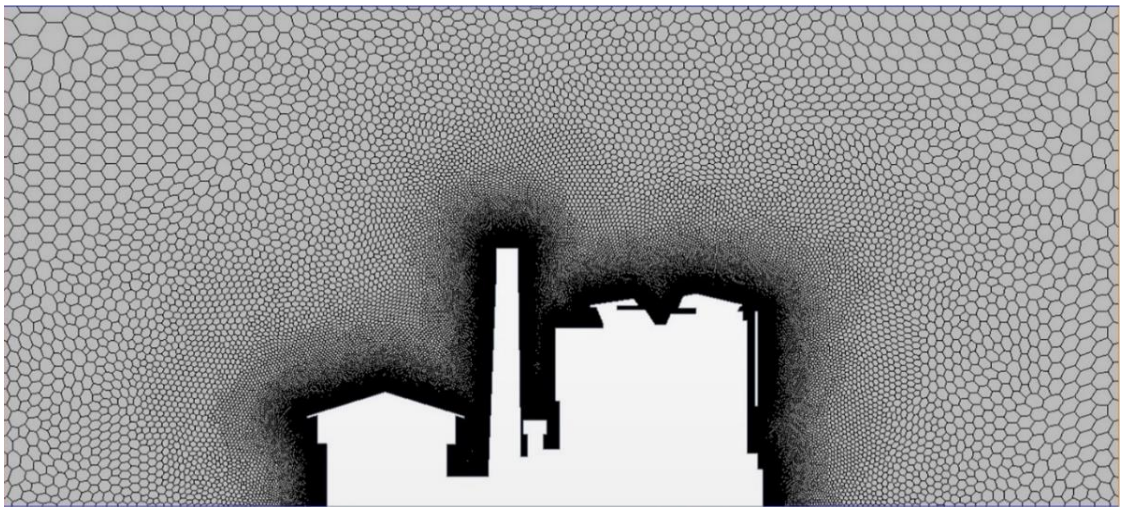


Figure 210. Définition du maillage d'analyse aéraulique sur le modèle 3D de l'ENSAPVS, selon une coupe verticale Est-Ouest

4.6.5 Etude aéraulique en coupes verticales du bâtiment

Nous avons, pour cela, réalisé une simulation aéraulique qui montre le comportement du vent, les augmentations ou le ralentissement des vitesses dans une file[139] spécifique du bâtiment. Le choix de cette première file révèle la très grande diversité et variation en créneau du bâtiment. Il faut noter, cependant, que la cheminée centrale a un impact ponctuel dans le site au vu de son diamètre au sol de 5 mètres (Voir figure 210).

Chacune de ces coupes permet d'estimer dans les zones de forte vitesse (rouges foncées) l'augmentation des vitesses de vent pour une vent donné (Vent émergent de 5m/s) en fonction du profilage architectural. Afin d'identifier des scénarios ou des comportements singuliers nous avons fait glisser les coupes d'analyse dans le site. Il faut aussi noter dans ces simulations les effets de dépression d'air créées par ce volume sur la partie arrière du bâtiment, des zones de basse pression (identifiées en bleu foncé et bleu clair sur la simulation).

Comme vu au chapitre 3.4.2, à chacune de ces simulations[140], nous analysons les résidus du calcul, c'est-à-dire le degré de convergence des équations de Navier-Stokes. Ce graphique

[139] Une file de bâtiment est un axe de référence souvent utilisé pour identifier les axes des éléments de structure.

[140] Nous présentons dans le chapitre 3.4.2 les paramètres utilisés pour la simulation numérique (définition le type de modèle physique de calcul par l'équation epsilon K et modèle de turbulence) et de définir les valeurs de référence et les conditions initiales contextuelles.

constitué de 5 à 6 paramètres de l'équation permet de vérifier si, au bout de 1 000 à 10 000 itérations, la simulation effectuée aboutie à un résultat pertinent et qualitatif. À chacun de ses calculs, un grand nombre de vents sont évalués afin d'améliorer progressivement la simulation et la précision du calcul (résidus idéalement en dessous de 0,001 pour 1000 à 10 000 itérations).

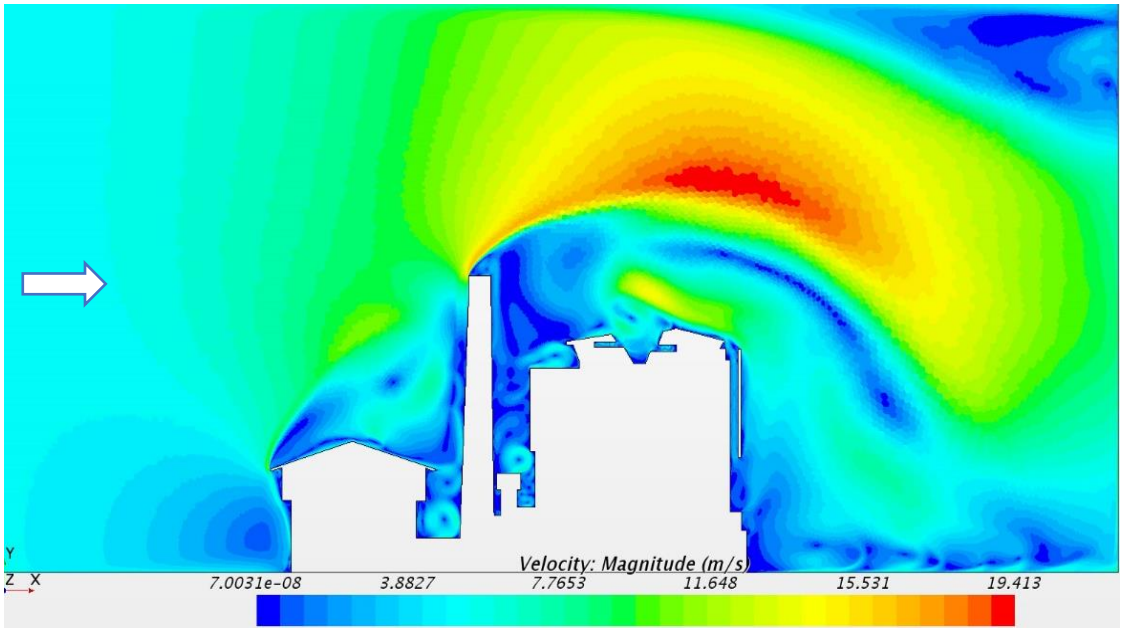


Figure 211. Simulation aéraulique en vitesse moyenne de 5m/s, sur une coupe Nord-Sud du bâtiment ENSAPVS (sur cheminée) Calcul à 10 000 itérations

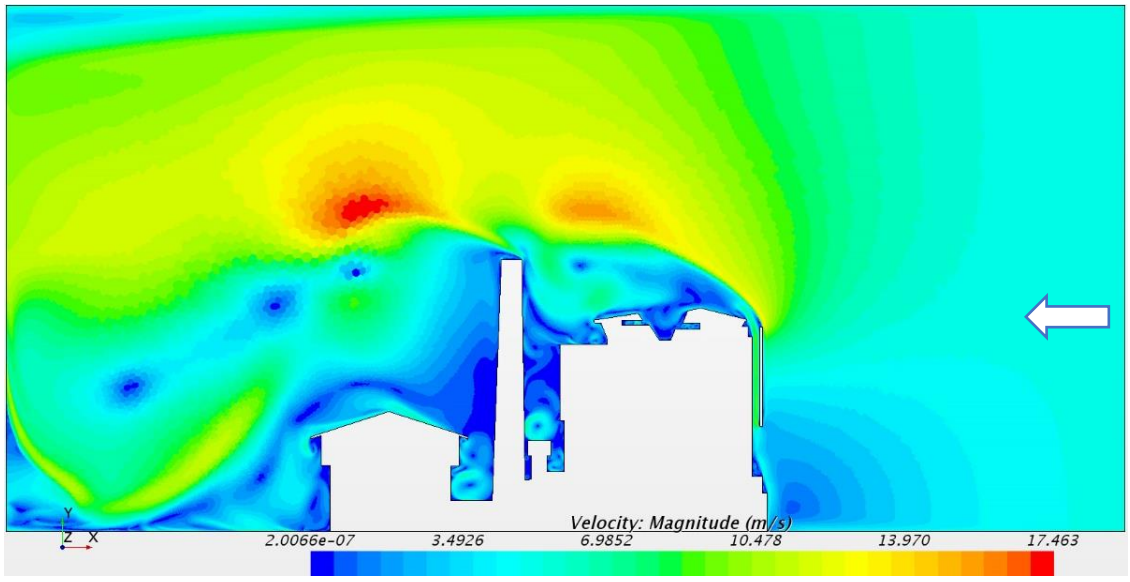


Figure 212. Simulation aéraulique sur une coupe Nord-Sud du bâtiment ENSAPVS (avec vitesse de vents de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)

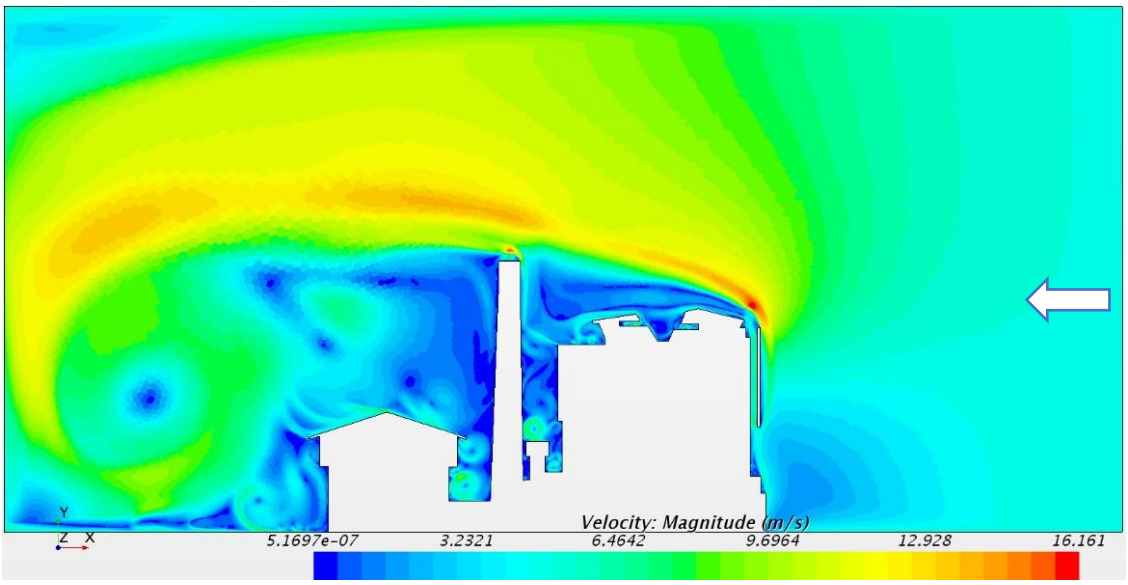


Figure 213 Simulation aéraulique sur une coupe Nord-Sud du bâtiment ENSAPVS (avec vitesse de vents de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)

4.6.6 Étude du bâtiment-îlot en coupes horizontales à différentes altimétries

- *Étude du bâtiment à 12m*

La méthode d'analyse est similaire à ce qui a été montré précédemment avec production de maillage dense autour du bâtiment ainsi que définition des hypothèses de calcul en termes de contexte et de géométrie. Nous avons pour cette étude agrandit le domaine de calcul afin de limiter les effets de couches limites sur le calcul. Les espaces interstitiels entre les 2 bâtiments de l'ENSAPVS constituent des zones de canalisation des vents à différentes altimétries.

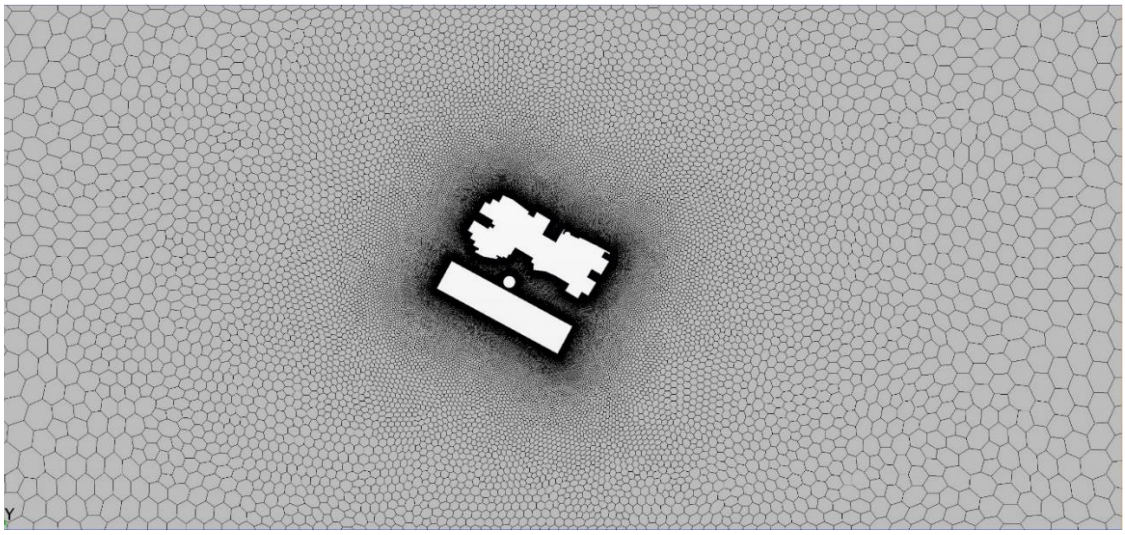


Figure 214. Maillage en plan d'analyse du bâtiment ENSAPVS avec densités accrues sur les zones proches du bâtiment à 12m

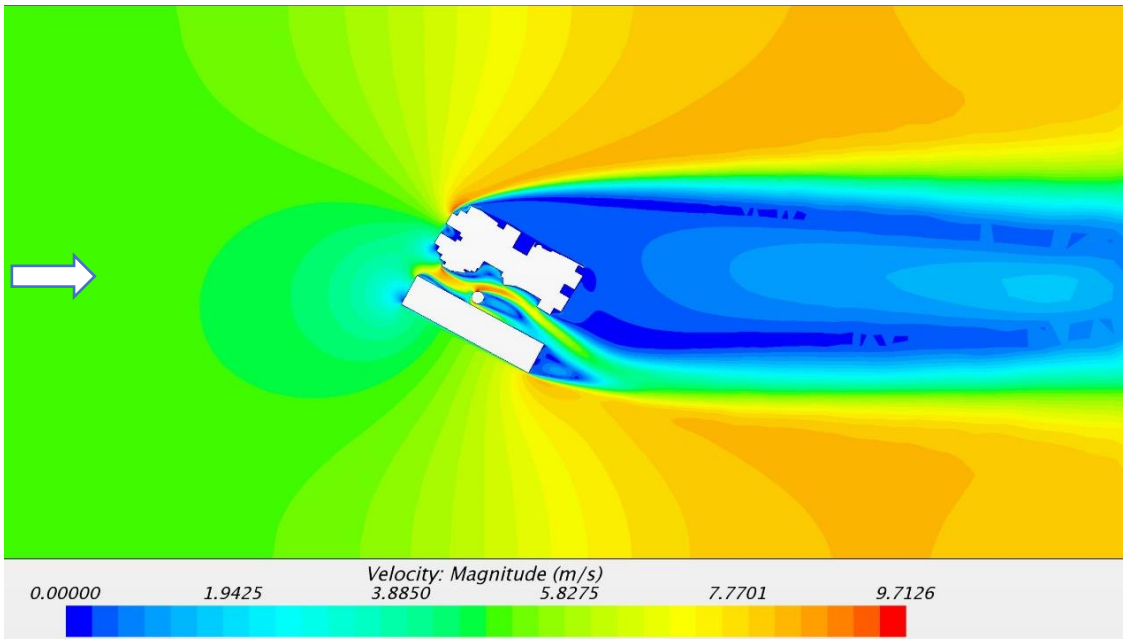


Figure 215. Simulation aéraulique sur une coupe horizontale à 12 m altimétries du bâtiment ENSAPVS (avec une vitesse d'air de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)

- *Étude du bâtiment à 25m*

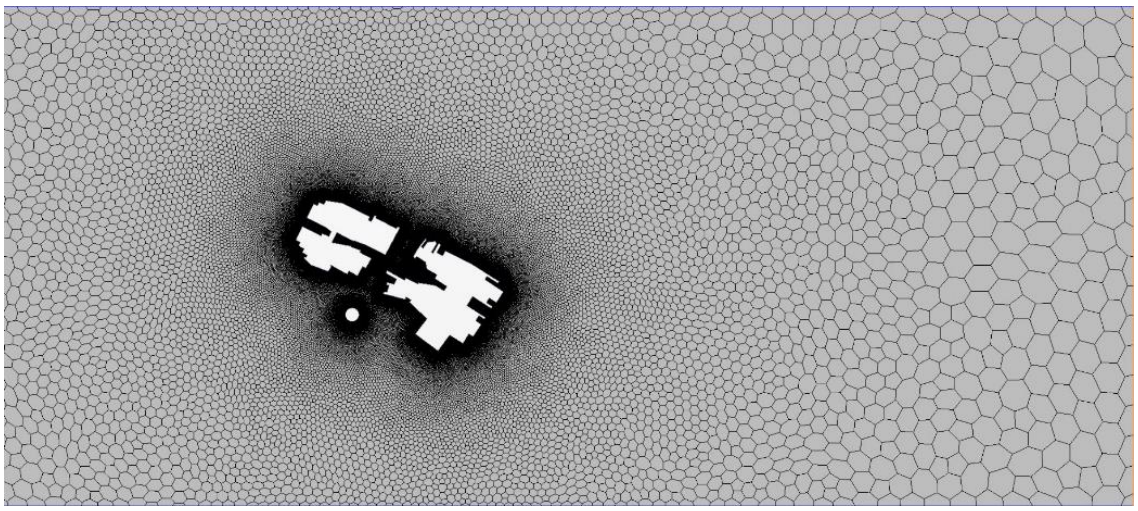


Figure 216. Maillage en plan d'analyse du bâtiment ENSAPVS avec densités accrues sur les zones proches du bâtiment

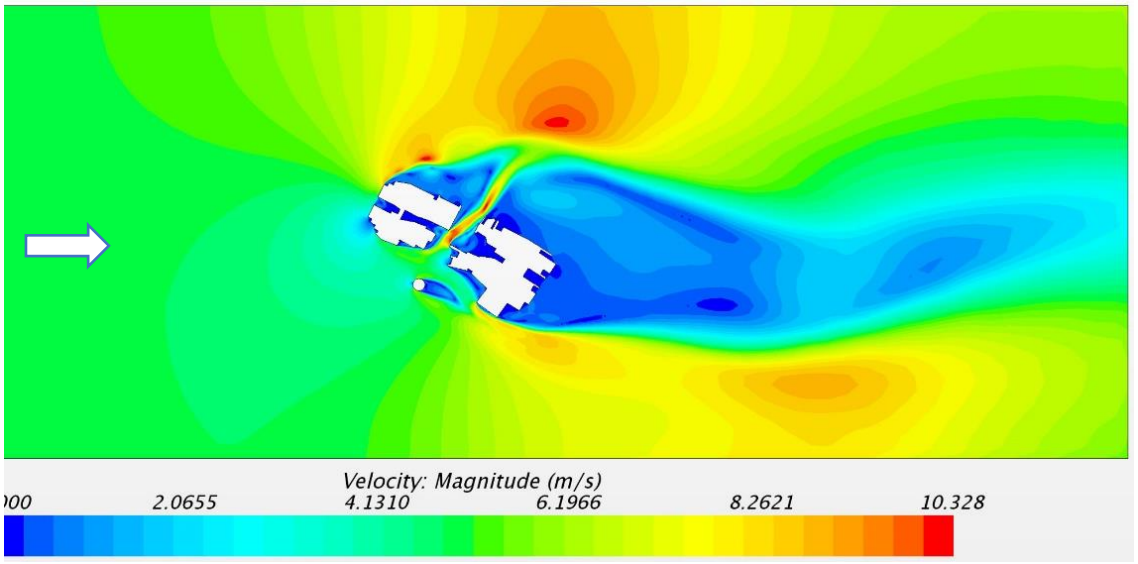


Figure 217. Simulation aéraulique sur une coupe horizontale à l'altimétrie de 12m du bâtiment ENSAPVS (avec une vitesse d'air de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)

- *Conclusion*

Cette étude montre l'impact du vent sur les tours coté Seine avec de fortes augmentations de la vitesse du vent dans cette zone. Dans un bâtiment aussi complexe, on note aussi bien en plan qu'en coupe, des effets de masques d'éléments tels que la cheminée, les tours avant et les tours arrières. Et que ces points durs génèrent une augmentation de vitesse du vent à leur périphérie.

La direction relative des éléments du volume architectural et la direction du vent dominant est très importante pour identifier les meilleures zones de captation d'énergie et l'impact des turbulences de vent sur les bâtiments alentours.

Cette étude montre que ce bâtiment-ilot joue aussi un vrai rôle de protection du vent des autres bâtiments du quartier plus petits à sa périphérie (Zone bleu foncé avec moins de 1m)

4.6.7 Étude d'une zone en détail au niveau des 2 tours

Les études du comportement du vent en différents niveaux des 2 tours coté Seine de l'ENSAPVS montrent une forte augmentation de vitesse du vent entre les 2 tours. Nous allons étudier, dans cette partie, un détail rapproché d'une zone à +70m au-dessus du sol, où 2 tours agissent comme amplificateurs des forces du vent sur le site. Avec un vent émergent de 5 m/s, une augmentation de la vitesse du vent entre les 2 tours est d'approximativement 17m/s (Fig. 217) soit une augmentation de 3,2 fois sa vitesse de base. Nous notons aussi un effet de bord sur l'arrête extérieure de la tour avec une augmentation de vitesse à 11m/s, soit une augmentation de coefficient 2 de la vitesse du vent sur leur coté extérieur (Figure 217).

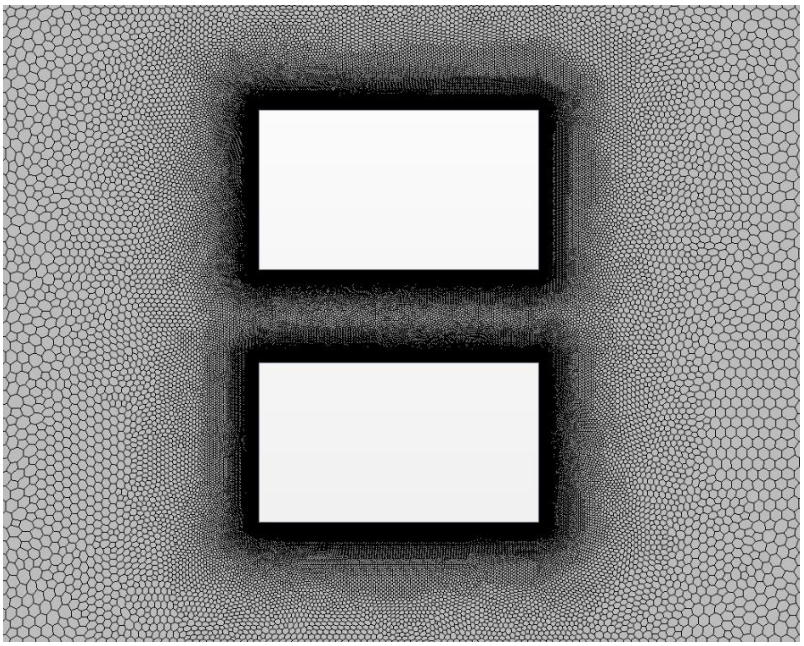


Figure 218. Maillage d'étude sur une coupe horizontale à +70m altimétrie du bâtiment ENSAPVS (dimensions tour : 25m de large X45m de long, échelle : 1 /1000 ème)

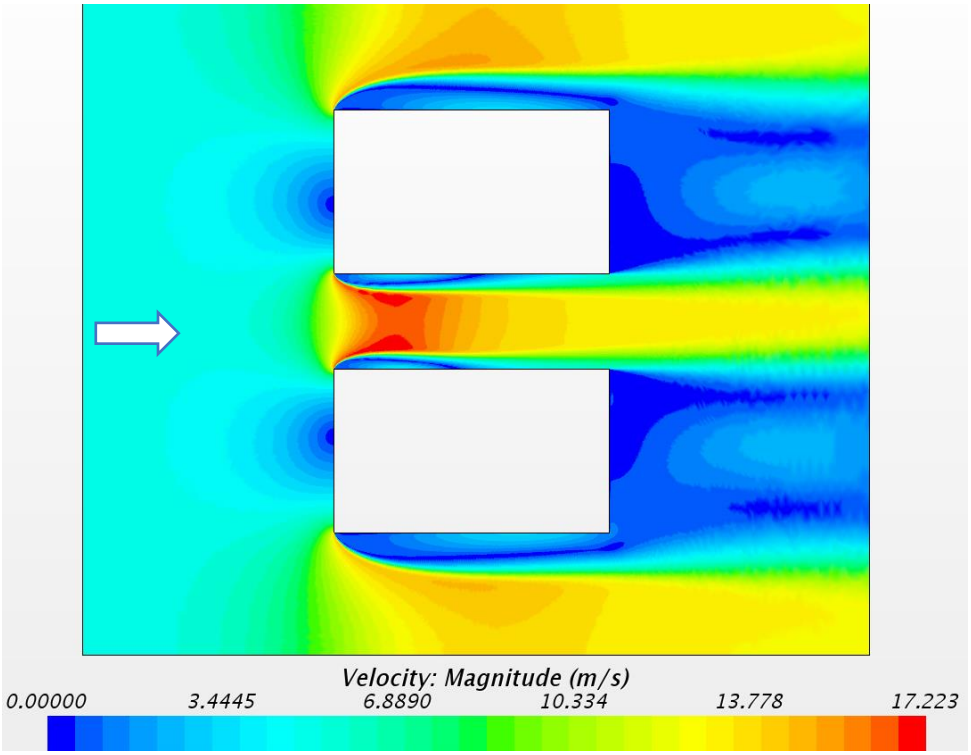


Figure 219. Etude aéraulique d'un détail de l'espace entre les 2 tours (à l'altitude + 70m)

4.6.8 Étude d'une zone du bâtiment avec l'ajout de « foil » d'amplification de vitesse du vent

L'espace entre les 2 tours, en dépit de ces bords à angle droit se comporte comme un amplificateur naturel de vent. Cet espace orienté coté Seine est particulièrement actif dès les plus basses vitesses de vent.

Nous proposons d'ajouter dans cette étude des dispositifs ponctuels pour rabattre le vent et concentrer l'écoulement dans une zone identifiée du bâtiment. Ces éléments sont constitués de panneaux rigides en coque (de type aile d'avion) que nous appellerons amplificateurs ou aérofoil visant à concentrer et améliorer la stabilité de la vitesse du vent autour de ces 2 tours.

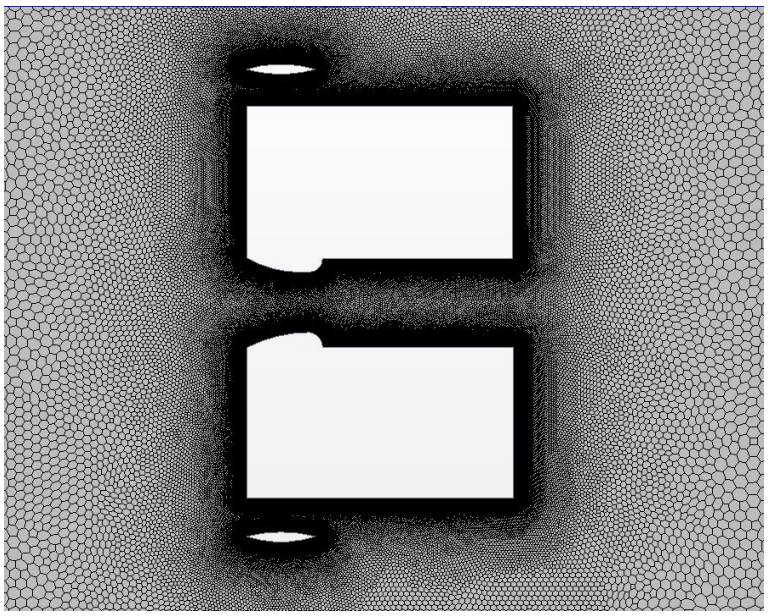


Figure 220. Maillage d'étude sur une coupe horizontale à +70m altimétrie du bâtiment ENSAPVS avec 4 aérofoils

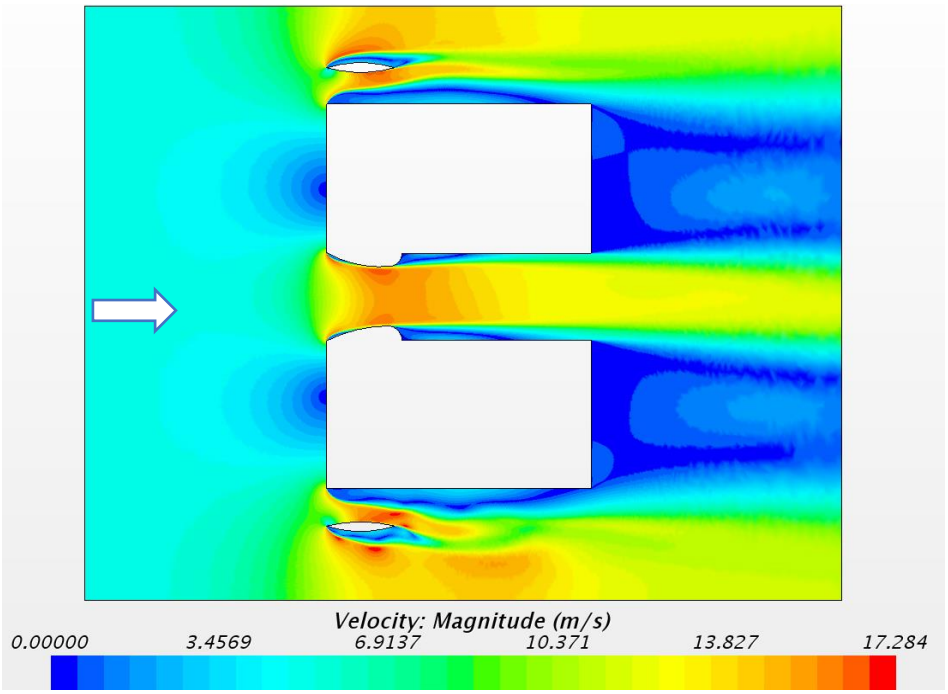


Figure 221. Simulation aéraulique au niveau des 2 tours avec l'ajout d'aérofoils)

4.6.9 Autre analyse avec des foils profilés pour créer une zone stabilisée de flux d'air

Nous proposons ensuite de modifier l'angle des aérofoils le long des tours pour permette de concentrer et d'améliorer la stabilité de la vitesse du vent. **Avec un vent émergent de 5 m/s la vitesse du vent entre les 2 tours est d'approximativement 16m/s soit une augmentation de 3 fois et 18m/s entre les tours soit 3,2 fois la vitesse du vent.**

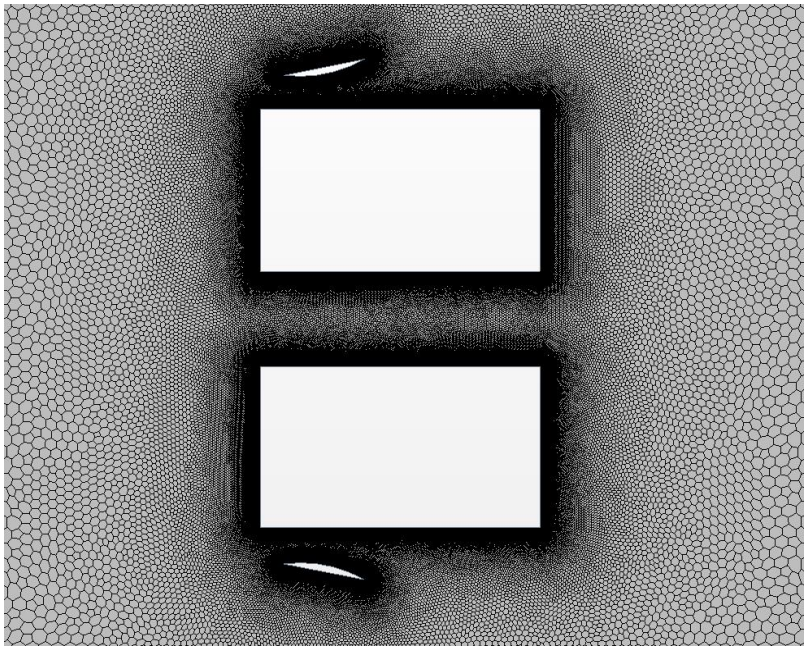


Figure 222. Maillage d'étude sur une coupe horizontale à +70m altimétrie du bâtiment ENSAPVS

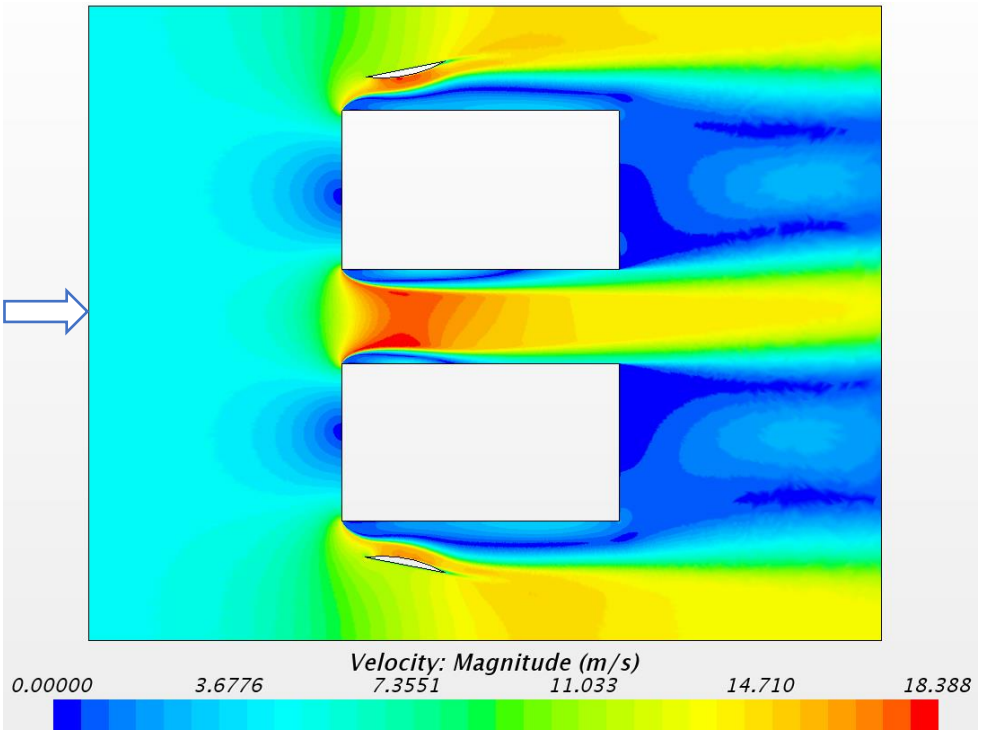


Figure 223. Simulation aéraulique au niveau des 2 tours avec l'ajout d'aérofoils

- *Conclusion*

Cette étude montre que dans le cas de tours jumelles, l'espace entre les tours crée un rôle important d'augmentation de la vitesse du vent, de l'ordre d'un coefficient 3 (Figure 221).

Concernant les bords extérieurs, des aérofoils légèrement inclinés vers l'extérieur stabilisent le flux d'air contre la tour (Fig 222) et proposent une zone d'accélération jusqu'à 14m/s.

Pour ces raisons, nous avons conservé l'implantation du dispositif de capture d'énergie principal à l'axe entre les 2 tours et des capteurs secondaires le long des aérofoils sur les arrêtes des côtés latéraux . (Voir un exemple d'intégration au chapitre 5.6.3)

La puissance électrique générée par une éolienne dans cette zone (voir chapitre 3.1.1) est dans un rapport dépendant du cube de la vitesse de l'air, à un endroit donné. En passant de 5 à 13 m/s , l'augmentation de la vitesse de l'air est de coefficient 2,5.

4.7 BILAN DE CES 4 ETUDES

Dans les chapitres 4.3 4.7, nous avons pu faire une simulation précise de l'écoulement du vent, lorsqu'il rentre en contact avec des architectures différentes : une toiture à 2 pentes, une acrotère, un toit à la mansart et un bâtiment complexe comme l'ENSAPVS. Chacun de ces profils offre un type d'accélération du vent autour du bâtiment.

Nous avons aussi étudié l'ajout d'une aile d'accélération et de régulation de la vitesse de l'air autour du bâtiment.

Ces études de cas sur l'impact des volumes architecturaux sur l'écoulement de l'air nous montrent que la volumétrie des bâtiments dans un environnement urbain ouvert, constitue de par sa simple présence une surface d'augmentation de la vitesse du vent sur site pouvant aller de de 150 à 200%.

L'intégration précise et attentive de profils de type aérofoil permet d'atteindre une augmentation de 35 à 30 % la vitesse de l'air en périphérie du bâtiment. Ceci nous permet d'augmenter au global de 200 à 350%, le coefficient d'augmentation de la vitesse du vent dans des zones précisément définies.

Des simulations 3D complètes sur la hauteur ou la longueur du bâtiment montrent que ces vitesses de vent ne sont pas toujours continues dans le temps. Cependant le principe d'une agrégation d'éoliennes en réseau ou en cluster[141] permet de multiplier les zones de forte augmentation de production d'énergie.

4.8 ETUDE DES EOLIENNES ADAPTEES A L'INTEGRATION ARCHITECTURALE

Nous allons étudier, dans la dernière partie, la réalisation et la modélisation 3D de plusieurs éoliennes. Si la question de l'optimisation et de la conception de la turbine ou de générateur électrique ne fait pas partie de cette recherche, il nous semble être un élément important pour l'intégration architecturale du dispositif.

Nous avons étudié avec beaucoup de précision les options de « design et de conception » de ces éoliennes allongées afin de comprendre et d'évaluer leur intégration au bâtiment. Nous avons pour cela réalisé des impressions 3D de plusieurs modèles. Ces modèles ont ensuite été testés

en soufflerie afin de vérifier leur fonctionnement et leur interaction avec le bâtiment. Nous étudions dans la partie suivante plus en détail, le mode de positionnement et d'interaction entre l'architecture et la turbine de production d'énergie. Concernant la modélisation, des logiciels de type Katia de Dassault Systèmes ou SolidWorks permettent d'intégrer à la conception les algorithmes de génération de surface à double courbure (de type hélice). Nous avons, dans un premier temps modélisé des turbines à 3 pales de type aiguille. La difficulté de fonctionnement de ces turbines est liée à la nécessité de devoir les lancer au démarrage (car elles ne démarrent pas seules). Leur vitesse d'enclenchement est haute. Nous avons aussi étudié une éolienne de type Savonius. Ce type Savonius est plus polyvalent et plus facile à intégrer à un volume. Cependant en fonction de l'étude de la vitesse de rotation de la turbine, la largeur des pales, la profondeur du godet, et la hauteur de la turbine doivent être ajustées (voir figures 223 et 224).

Nous avons ensuite proposé une turbine de type Savonius avec une torsion hélicoïdale dans sa hauteur afin de répartir et d'équilibrer plus facilement sa rotation. Ceci est le dispositif que nous avons utilisé dans la plupart des simulations 3D que nous avons réalisées[142].

L'impression 3D de ces turbines est réalisé par une imprimante de type filament chaud. Si ce type ne permet pas une très grande précision, quant à la génération de la surface (précision de l'impression inférieure à 0,1 millimètre) il nous a été cependant économique de réaliser ces prototypes.

Nous pouvons envisager à terme que l'analyse ou la simulation numérique précise permette de customiser la forme le type ou la longueur de l'éolienne en fonction du bâtiment.

Aujourd'hui des systèmes de turbine peuvent être imprimés ou renforcés à partir de lames de carbone car les pressions qui s'exercent sur les éoliennes sont importantes. Les impressions directes ne permettraient une durée de vie supérieure à 2 ou 3 ans.

Un autre intérêt de l'impression 3D c'est la capacité de tester et à multiplier à l'infini le profil de ces aérofoils en fonction de sa forme et de l'attraction exercée par le vent sur cette turbine.

L'utilisation d'une turbine directement imprimée en 3D (et non moulé) a été testé pour un de nos prototypes. Le foil doit être cependant habilement contreventé et attaché à la structure principale tout en limitant les effets de vibrations des éléments.

[142] Les impressions 3D de cette étude ont été réalisées au Fablab de l'école ENSAPVS et au Fablab indépendant VOLUMES avec l'aide de Corentin Boiteau.

Figure 224 Etude 3D des dispositifs éoliens intégrés au bâtiment de l'ENSAPVS

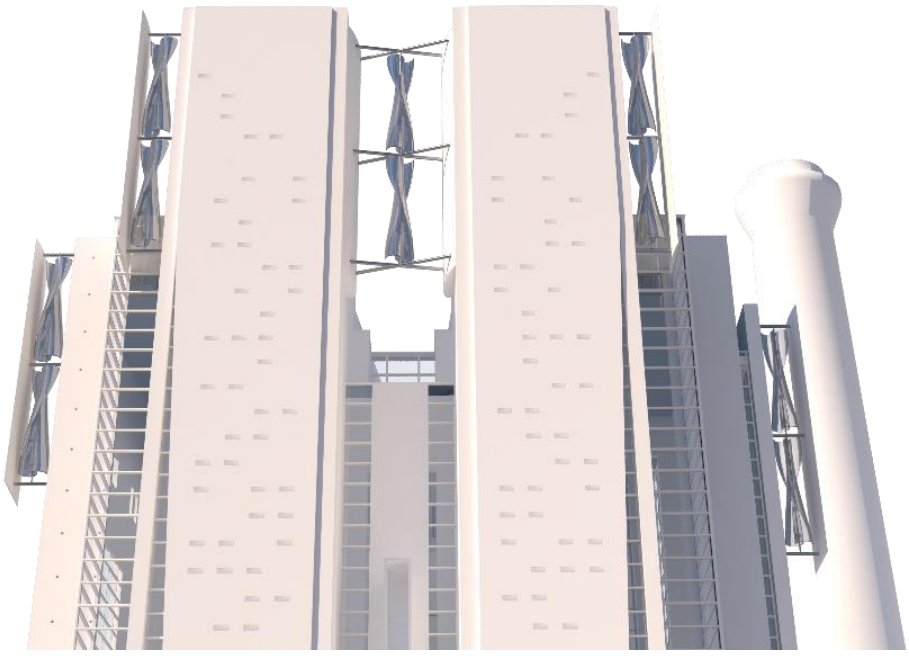


Figure 225. Étude dispositif sur le bâtiment ENSAPVS

PARTIE 5

CONCEPTION ET INTEGRATION ARCHITECTURALE DES DISPOSITIFS

Contenu :

- Présentation de la méthode de conception architecturale
- Typologies des turbines intégrées et maquettes d'étude expérimentale
- Quantification des performances des dispositifs
- Dendrogrammes actionnels d'aide à la conception
- Etudes de cas de d'intégration architecturale de dispositifs de production d'énergie éolienne
- Création d'une bibliothèque en accès libre des modèles des dispositifs éoliens sur une plateforme collaborative BIM

5.0 INTRODUCTION 207
5.1 PRESENTATION DE LA METHODE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE 208
5.1.1 L'aérofoil, un accélérateur et stabilisateur de vent 208
5.1.2 Conception des prises d'air sur une surface 209
5.1.3 Position relative de la turbine et de "l'aérofoil" 210
5.1.4 Les volumes architecturaux étudiés 210
5.1.5 Agrégation des dispositifs éoliens Redondance plutôt qu'optimisation 211
5.1.6 L'intérêt de l'utilisation des micro-éoliennes à axe vertical 212
5.1.7 Accélérateurs basés sur l'aérofoil 214
5.1.7.1 Coefficients hydrodynamiques 216
- La calage. 216
- Angle d'incidence d'un foil 216
5.1.8 Méthode d'intégration de l'aérofoil 217
5.1.9 Etude des systèmes aérauliques sur les voitures de course 218
- L'appui aérodynamique 219
- Les ailerons, les Spoiler, bas de caisse, lames DTM, … 219
- Les ailerons 220
- Les spoilers et jupes latérales 220
- Les lames DTM 220
5.1.10 Des éoliennes-sur-mesures profilées sur l'architecture et sur le site réel 221
- Des aérofoils à angles variables pour accélérer et maîtriser le flux d'air 221

5.2 TYPOLOGIES DES TURBINES INTEGREES ET MAQUETTES D'ETUDE EXPERIMENTALE 222
5.2.1 Principales typologies d'éoliennes 223
- Nomenclature des éoliennes intégrées étudiées 224
5.2.2 Méthode de travail : Maquettes d'études physiques comme source de la conception 225
5.2.3 Modélisation 3D de turbines à axe verticale optimisée pour Vent en site urbain 226
5.2.4 Impression 3D de turbines à axe vertical optimisé 226
5.2.5 Maquettes d'étude des dispositifs éoliens intégrés 229
5.2.6 Etude en maquette et profilage des dispositifs 230
5.2.7 Etude en soufflerie physique 230
5.2.8 Résultats et comparaison avec soufflerie numérique 230
5.2.9 Les modes d'intégration des dispositifs éoliens 231

5.3 QUANTIFICATION DES PUISSANCES DES DISPOSITIFS 233
5.4 ESTIMATION DE PRINCIPE DE L'ENERGIE GLOBALE PRODUITE DANS UNE VILLE TYPE 234
5.5 DENDROGRAMMES ACTIONNELS D'AIDE A LA CONCEPTION 235
5.6 EXEMPLES D'INTEGRATION ARCHITECTURALE DE DISPOSITIFS DE PRODUCTION D'ENERGIE EOLIENNE 238
5.6.1 Bâtiments anciens ou patrimoniaux 239
- Immeuble de logements hausmanien, hauteur 21m, Paris 11ème 239
5.6.2 Bâtiment de petite échelle en site isolé, ou site côtier 241
- Maison Marie Short, Kempsey – Australie 1975, arch : Glenn Murcutt 241
- Maisons le long de côtes ventées 242
5.6.3 Equipements publics 243
- Foundation Stavros Niarchos, Arch. Renzo Piano, 2016, Athens, Grece 243
- Bentini Headquarters, Arch. Piuarch, Faenza, Italie, 2018 244
- Bâtiments universitaire ENPC et IFSTTAR, Campus Cité Descartes, Champs-sur-Marne (77), 1983 245
- Maison de la recherche et de l'Innovation, Caen, 2016, Arch: Bruther 246
- Médiathèque de Bayeux, 2018, Arch: SERERO Architectes 247
- Centre de recherche Climat Planète, Université UGA, Grenoble, 2020, Arch: SERERO Architectes 248
5.6.4 Bâtiments de grande hauteur 249
- Ecole d'Architecture Paris Val de Seine, arch : F. Borel, 2008 Paris 13ème 249
- Grande Arche, Arch. Johan Otto von Spreckelsen, 1985, Puteaux , France 250
- Tour one thousand Museum, Arch.Zaha Hadid, 2026, Miami, Etats-unis 251
- Turning Torso Tower, Calatrava, 2001, Malmo, Suède 252
- Terrazas, Arch. Herzog et de Meuron, 2009, Beyrouth, Liban 253
- Intesa Sanpaolo Office Building, Arch Renzo Piano, 2011, Turin, Italie 254
- 206 Logements, Grand Quevilly, Arch. Frederic Borel, 2014, France 255
- Swedish Exhibition & Congress Centre , Arch.Tham & Videgård, 2024, Gothenbourg, Suède 256
- Tribunal de Grande instance, Renzo Piano Building Workshop, 2018, Paris 17ème 257

5.7 CREATION D'UNE BIBLIOTHEQUE EN ACCES LIBRE DES MODELES DES DISPOSITIFS EOLIENS SUR UNE PLATEFORME COLLABORATIVE BIM 258
5.6.1 Building information modeling 258
5.5.2 Un catalogue de modèles 3D de dispositifs éoliens intégrés 258

5.0 INTRODUCTION

Un architecte développe au fil des années une manière propre de concevoir les espaces, et une méthode de travail qui découle de cette vision. Pour lui, chaque **bâtiment est un prototype**. Il n'est donc pas aisé pour nous d'imaginer des solutions architecturales standardisées sans véritablement l'accompagner dans ses esquisses ou dans sa démarche de projet.

Cependant, depuis l'après-guerre, avec l'émergence d'un grand nombre de produits pour simplifier la reconstruction et la transformation du pays, les architectes sont progressivement **devenus des assembleurs de produits de construction industrialisés.** (Bardages façade, blocs de maçonnerie, panneaux de plâtre et plafonds,)

Les simulations aérauliques et la méthode d'analyse développées dans cette recherche, nous permettraient-elles de produire **un ensemble de solutions architecturales** ou d'outils d'aide à la conception que les constructeurs pourraient avoir à leur disposition dès le démarrage de leur projet ? Malgré la complexité de l'écoulement des flux autour d'un bâtiment[143], malgré la diversité des contextes urbains et l'unicité de chaque bâtiment[144] , les architectes pourraient-ils avoir à leur disposition des **principes d'analyse aéraulique et d'intégration de systèmes éoliens pour leur bâtiment** ?

C'est l'objectif de cette séquence de notre recherche qui vise à concevoir des modèles d'éoliennes avec leur structure support d'intégration et de les insérer dans des projets d'architectes existants ou futurs.

J'ai établi un **catalogue d'objets** et **de modèles 3D** (de type BIM) en accès libre (bibliothèque partagée en ligne sur www.RevitCity.com) pour l'intégration efficace de ces dispositifs dans le travail des architectes. Cette base de données est ouverte, et comporte un prédimensionnement **de l'énergie produite par ces dispositifs.** Ces typologies sont regroupées dans des **dendrogrammes actionnels ou arbres décisionnels** (voir figure 259) permettant de guider les architectes et les constructeurs.

Ce travail est ensuite illustré d'un grand nombre **d'insertions de modèles 3D dans des projets** d'architecture contemporaine, et nous proposons une **nomenclature des typologies de produits avec le mode d'assemblage et d'implantation** sur le bâtiment.

Cette méthode de conception, pour être précise, devra aussi s'appuyer, dans un second temps, sur **une simulation aéraulique spécifique** qui prend en compte la volumétrie exacte du bâtiment, la topographie du contexte alentour et ces bâtiments éventuels, et les couloirs de vents urbains.

Ces insertions virtuelles n'ont pas toutes fait l'objet d'une simulation numérique, elles sont plutôt conçues comme des **extrapolations possibles** de notre recherche.

[143] Sinisa STANKOVIC, Neil CAMPBELL et Alan HARRIES, *Urban Wind Energy*, Reprint., Routledge, 2015, 200 p.
[144] K. R. RAO, « Wind Energy: Technical Considerations – Contents », *in* K. R. RAO (éd.), *Wind Energy for Power Generation: Meeting the Challenge of Practical Implementation*, Cham, Springer International Publishing, 2019, pp. 1-426.

5.1 PRESENTATION DE LA METHODE DE CONCEPTION ARCHITECTURALE

Dans ce chapitre, nous étudierons plusieurs scénarios d'intégration de dispositifs éoliens à des bâtiments simples puis plus complexes. Chacune de ces études est réalisée à partir **de modèles numériques pour la conception du dispositif et pour la simulation aéraulique**. Des maquettes physiques à échelles réduites (1/5ème et 1/10ème) ont été réalisés pour tester chaque prototype. Elles n'ont pas fait l'objet de tests expérimentaux avec relevés des vitesses d'air par tubes Pitot en soufflerie physique (contexte pandémique), mais de nombreuses expérimentations en vent réel et en soufflerie ont permis de tester et d'améliorer des prototypes (impression 3D de turbines, avec mini-générateur et supports cordes à piano) par relevé d'énergie produite. Dans un 2ème temps, ces études seront comparées à une simulation en soufflerie numérique de modèles 3D des mêmes dispositifs.

De manière à pouvoir comparer l'étude en simulation numérique et l'étude en maquette physique et en particulier l'augmentation de la vitesse de l'air, les facteurs d'échelle et notamment le nombre de Reynolds[145] ont été attentivement définis entre modèle physique et modèle numérique. Nous avons comparé des solutions les unes par rapport aux autres dans chacun de ces modèles expérimentaux afin de progressivement améliorer le choix des solutions et de l'implantation des dispositifs sur le bâtiment.

5.1.1 L'aérofoil, un accélérateur et stabilisateur de vent

Après avoir pu très précisément implanter l'éolienne sur les zones des plus grandes vitesses de vent, nous avons étudié l'augmentation de la production d'énergie par un **« amplificateur »** de vent en complément de l'éolienne. L'**« aérofoil**[146] **»** permet d'accélérer localement la vitesse du vent, mais aussi de stabiliser les turbulences, et d'intégrer **le dispositif éolien dans une « lame », ou un « cadre »** qui, en applique sur le bâtiment, permet de laisser apparaître **une fente de prise d'air.**

Nous avons aussi étudié d'autres exemples **de foils et d'ailerons** mis au point par l'industrie nautique ou par l'industrie automobile et **les modes d'intégration ou de design** de ces systèmes. **Les calandres automobiles** sont progressivement devenues, malgré la grille qu'elle constitue sur le devant de la carrosserie d'une voiture, **l'identité visuelle d'un produit et parfois l'emblème d'une marque.**

Dans les mains de designers, des éléments purement techniques et sans qualité esthétique, sont devenus des **marques notables de différence** ou d'identité du produit.

L'étude réalisé ici porte sur plusieurs types de bâtiment qui ont été choisis et classés en fonction de leur échelle, de leur usage, de leurs interactions avec leur environnement urbain. Ils ne présentent qu'un échantillon de la grande diversité des bâtiments. Les architectures retenues sont plutôt des bâtiments d'une grande **clarté conceptuelle et des volumes fortement articulés**.

Nous n'avons pas étudié d'architecture monolithique dans lesquelles le volume global épuré du bâtiment se prête plus difficilement à l'intégration de composants supplémentaires.

[145] Rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses, mis en évidence par Osbourne Reynolds en 1883

[146] Terme anglais pour airfoil, issu du vieux français feuille. Une aile permettant de contrôler l'impact du vent, soit par soulèvement, par appui, ou par régulation des turbulences.

5.1.2 Conception des prises d'air sur une surface

La calandre d'un véhicule a pour fonction principale l'admission de l'air de refroidissement au radiateur de la voiture. Mais au fil des années et du design des véhicules par les marques de ce dispositif purement technique et relativement disgracieux (une grille métallique) est devenu l'un des principaux composants visuels à l'avant des véhicules. Comme l'évoque le designer automobile Angelo Young *« un dessin inspiré de la calandre en fait une voiture attrayante et façonne son identité en la liant à l'histoire et à la réputation du constructeur automobile*[147]*»* et a progressivement joué un rôle commercial important de séduction des conducteurs. L'aspect esthétique de la calandre du véhicule *« est beaucoup plus important que de savoir si les caractéristiques de conception servent vraiment. »*[148]

La calandre est devenue pour les marques automobile un élément d'identification principal. Par exemple, Rolls-Royce avec sa calandre Parthénon redresse l'angle des barres afin qu'elles apparaissent parfaitement verticales ; Bugatti est connu pour sa calandre en forme de son fer à cheval, BMW (en forme de narines), Ford, Jaguar ou Aston Martin s'inspirent des calandres de style réacteur d'avion de chasse pour leurs voitures Porsche, un fabricant de voitures à refroidissement à air, continue à écraser et minimiser l'importance d'une calandre sur ses véhicules modernes(voir figures 225 et 226). Tesla les a tout simplement fait disparaître au profit d'une simple fente à la place du parechoc qui est inexistant puisque les capteurs Lidar empêchent tout chocs sur la voiture.

Figure 226 : Comparaison de Calandres automobiles présentant comment une grille de ventilation est devenu un symbole de marque

Figure 227 Exemples de prise d'air sur le fuselage d'un avion à réaction

[147] Does Your Car Look Happy To You? Designers Talk About The Evolution Of Lights, Grilles And Bumpers, https://www.ibtimes.com/does-your-car-look-happy-you-designers-talk-about-evolution-lights-grilles-bumpers-1491974, consulté le 23 mai 2020.
[148] *Ibid.*

5.1.3 Position relative de la turbine et de “l’aérofoil”

Lors de l’étude de l'installation d'un dispositif éolien à axe horizontal sur le faîtage d'une toiture de maison à double pente, nous comparons la position de cette turbine et d'un accélérateur à vent de type aérofoil. Cet accélérateur est constitué d'une tôle pliée acier ou composite dont la rugosité sera définie pour limiter les turbulences dans l’écoulement de l’air. Le foil constitue une coque fixée sur la structure du bâtiment par un support triangulée[149] afin de garantir une grande rigidité de la surface et de limiter les effets vibratoires de cette structure.

La position relative du foil, de la géométrie du toit et de la turbine du dispositif éolien constitue un enjeu important de cette recherche. Nous avons expérimenté, dans le modèle numérique et dans la maquette physique, les différents angles entre ces éléments, mais aussi des glissements progressifs de la position respective de ces 3 éléments : la toiture, la turbine et le foil.

Nous avons cherché à augmenter la vitesse du vent en régime stationnaire. Nos simulations numériques montrent un potentiel important d'augmentation de 2 à 3 fois la vitesse du vent lorsque l’aérofoil et la toiture sont précisément positionnés.

Les structures support de l’aérofoil et de la turbine seront constituées de tubes acier, aluminiums ou composite contreventés par triangulation des éléments. Dans les prototypes à échelle réduite , nous avons utilisé des cordes à piano dont la rigidité et les diamètres fins, limitent les forces vibratoires avec le vent.

Les études numériques ont été confirmées dans différentes maquettes physiques qui intégraient des micro-turbines. En comparant la puissance électrique (en volts) générée par chacun de ces dispositifs, après ajustement de la position du foil et de la turbine, nous avons progressivement obtenu des résultats comparables aux simulations.

5.1.4 Les volumes architecturaux étudiés

Dans le cadre de cette étude nous avons étudié 4 typologies de bâtiments :

1- Typologie de petite échelle de 1 à 3 niveaux (échelle de la maison individuelle ou d’un petit collectif)
2- Typologie d’échelle moyenne de 3 à 7 niveaux (échelle de l’immeuble collectif urbain)
3- Typologie de grande échelle de 7 à 15 niveaux (échelle d’un bâtiment-ilot de type IGH)
4- Typologie de très grande échelle de 15 à 30 niveaux (échelle de bâtiments exceptionnels ou de tours de logements ou bureaux)

[149] La triangulation des structures supports de l’éolienne augmente la rigidité de l’assemblage et le contreventement du dispositif

Figure 228. Exemples de volumes architecturaux d'échelles différentes étudiées pour l'intégration de micro-éoliennes et de foils.

Figure 229. Exemples de volumes architecturaux de grande échelle étudiés pour l'intégration de micro-éoliennes et de foils. (Ecole Architecture Paris-Val-de-Seine, Paris 13ème/ la Grande Arche de la Défense, Puteaux (92)

5.1.5 Agrégation des dispositifs éoliens Redondance plutôt qu'optimisation

Le choix de dispositif éolien, le mode d'agrégation des dispositifs, le type de contexte ou le type d'intégration architecturale sont autant de paramètres qui permettent, non pas seulement, de définir la productivité ou la performance[150] de l'extraction d'énergie mais aussi les très faibles nuisances de ces dispositifs sur l'environnement.

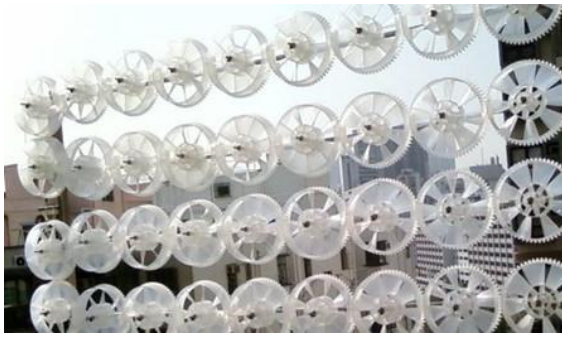


Figure 230 Mode de mise en « cluster » de dispositifs éoliens (fonctionnement en groupes de turbines rapprochées)

[150] Jorge L. ACOSTA, Kevin COMBE, Saša Ž DJOKIC et Ignacio HERNANDO-GIL, « Performance Assessment of Micro and Small-Scale Wind Turbines in Urban Areas », *IEEE Systems Journal*, mars 2012, vol. 6, n° 1, pp. 152-163.

Nous avons travaillé sur un paradigme de micro-éoliennes, dont la performance énergétique est réduite, mais dont leur quantité et leur mode d'agrégation participent à la régulation de l'énergie produite et à la diminution des turbulences de vent en sortie des dispositifs.

Nous prenons ici comme principe de base la **redondance de dispositif éoliens et répartis à cout réduit,** plutôt que l'optimisation énergétique de dispositifs isolés (prenant pour acquis un territoire d'implantation sans limites et sans contraintes de pollutions). L'étude de Caltech[151] montre que des micro-éoliennes à axe vertical limitent les turbulences de vent résultantes, et ceci permet la densification de leur agrégation sur une zone donnée.

Nous avons dans le cadre de cette étude, étudié deux scénarios d'agrégation :

- Un scénario de **groupement des dispositifs en série** de type linéaire
- Un scénario **d'assemblage en champs**, respectant des règles précises de répartition

Pour le groupement en série, les dispositifs s'enfichent les uns dans les autres de manière linéaire pour créer une ligne continue de dispositifs assemblés (exemple : dispositifs éoliens intégrés en garde-corps ou le long d'acrotères d'un bâtiment). Cette stratégie permet, lors des turbulences de vent, de capturer le mouvement du vent sur une grande hauteur ou longueur et de multiplier les sources et la continuité de production d'énergie, malgré le diamètre réduit des turbines.

L'autre typologie étudiée est celle de champs d'éoliennes qui sont groupées (en « cluster » ou grappe) sur le toit ou sur une surface d'un immeuble et permettent ainsi d'augmenter, par leur redondance, la captation de l'énergie des vents accélérés par le bâtiment.

Ce mode d'implantation est basé sur le principe d'une redondance des dispositifs plutôt que sur **l'optimisation de quelques systèmes plus performants** mais moins nombreux. Certaines structures végétales ou arborescentes, par exemple, utilisent souvent la multiplication des branchages et des feuilles et des fleurs, plutôt que la réduction du nombre de composants[152].

Ce paradigme est très différent de celui utilisé pour la conception de notre infrastructure énergétique, dans l'après-guerre, à savoir la **production centralisée d'énergie** sur quelques points du territoire et distribuée par un réseau complexe à tout un pays.

5.1.6 L'intérêt de l'utilisation des micro-éoliennes à axe vertical

Plusieurs études intéressantes menées par le département d'ingénierie environnementale des universités de Princeton, de Stanford et de Caltech sur l'agrégation synergétique[153] d'éoliennes multiples sur un même terrain montrent que, contre toute attente, le groupement d'éoliennes selon des agrégations précises basées sur des études de turbulences aérauliques, ou des études biomimétiques du comportement de bancs de poissons ne produisent pas moins d'énergie, voir démontre une augmentation de leur performance.

---

[151] Robert W. WHITTLESEY, Sebastian LISKA et John O. DABIRI, « Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design », *op. cit.*

[152] Janine M. BENYUS, *Biomimétisme: Quand la nature inspire des innovations durables*, 1re éd., Paris, HARMONIA MUNDI, 2011, 408 p.

[153] Seyed Hossein HEZAVEH, Elie BOU-ZEID, John DABIRI, Matthias KINZEL, Gerard CORTINA et Luigi MARTINELLI, « Increasing the Power Production of Vertical-Axis Wind-Turbine Farms Using Synergistic Clustering », *Boundary-Layer Meteorology*, 1 novembre 2018, vol. 169, no 2, pp. 275-296.

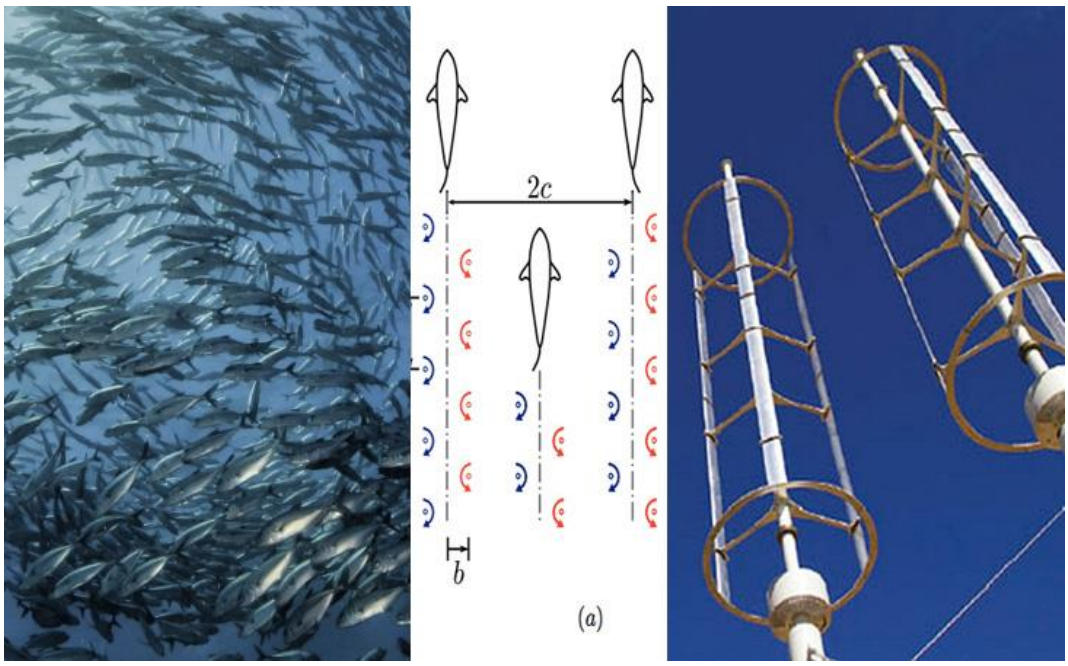


Figure 231 Modèle biomimétique de Dabiri de bancs de poissons pour définir le mode d'agrégation d'éoliennes[154]

> *« The simulations confirm that vertical-axis wind turbines have a positive influence on each other when packed in well-designed clusters: such configurations increase the power generation of a single turbine by about 10 percent. In addition, the cluster designs allow for closer turbine spacing resulting in about three times the number of turbines for a given land area compared to conventional configurations. Therefore, both the turbine and wind-farm efficiencies are improved, leading to a significant increase in the density of power production per unit land area »*[155]

La plupart des parcs éoliens sont constitués d'éoliennes à axe horizontal (HAWT) en raison du coefficient de puissance élevé d'une turbine isolée.[156] Cependant, à proximité des éoliennes voisines, les HAWT souffrent d'un coefficient de puissance réduit. En revanche, des recherches de ce laboratoire sur les éoliennes à axe vertical (VAWT) suggèrent que les VAWT étroitement espacées ne subissent **que de petites diminutions (ou même des augmentations)** par rapport au coefficient de puissance d'une éolienne individuelle lorsqu'elle est placée à proximité immédiate de voisins, produisant ainsi des puissances beaucoup plus élevées pour un terrain donné.

[154] Robert W. WHITTLESEY, Sebastian LISKA et John O. DABIRI, « Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design », *op. cit.*
[155] *Ibid.*
[156] Puissance mécanique divisée par la puissance de l'air libre à travers la section transversale de la turbine.

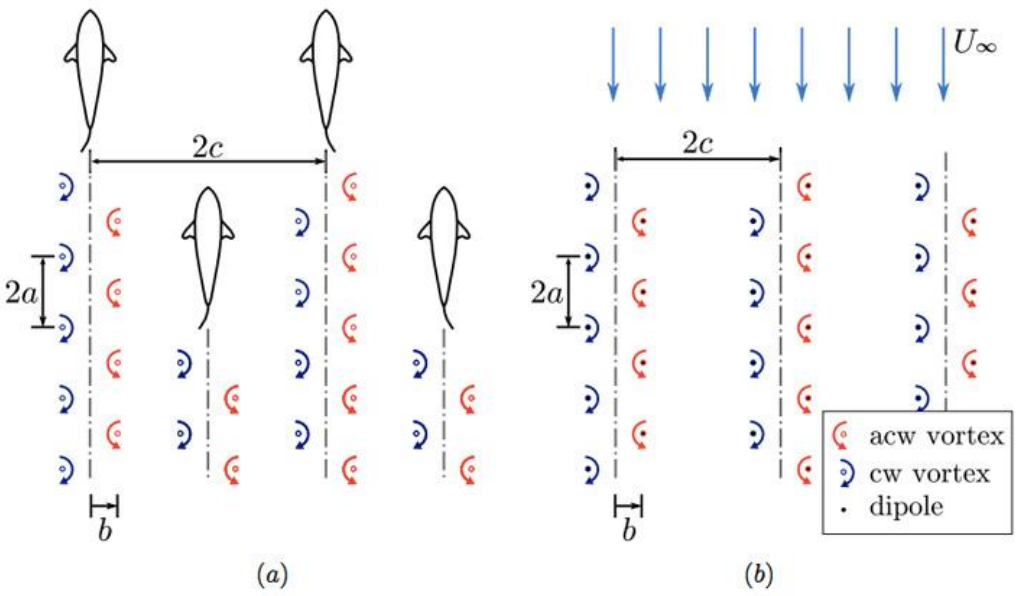


Figure 232 Etude des turbulences générées par l'effet de groupe de poissons et d'éoliennes extraite de la recherche mentionnée[157]

Un modèle **d'écoulement potentiel d'interactions inter-éoliennes à axes verticales** (VAWT) est développé dans cette étude par John Dabiri[158] et son équipe du Caltech Field Laboratory for Optimized Wind Energy (FLOWE) en Californie. Pour étudier l'effet des changements dans l'arrangement spatial des éoliennes à axe vertical VAWT sur le coefficient de performance du groupe rapproché d'éoliennes, il compare le coefficient de puissance moyen attendu des turbines d'un réseau à une turbine isolée dans l'espace. Une implantation en plan basé sur la **configuration biomimétique des sillages de bancs de poissons**[159] augmente considérablement le coefficient de performance de l'ensemble (cluster) basé sur un réseau d'éoliennes 16 × 16. Les résultats confirment un **doublement de la puissance d'énergie extraite pour une superficie donnée par rapport aux éoliennes à axe horizontal**.

5.1.7 Accélérateurs basés sur l'aérofoil

Issus latin *folia*, (feuille) les foils sont des surfaces de contrôle du vent qui permettent d'accélérer la vitesse de déplacement de véhicules et ou de voiliers.

Dans le cas de l'industrie nautique, les premiers foils ont été développés par Eric Tabarly et son trimaran à foil : le Paul Ricard[160]. Les foils se généralisent véritablement dans les années 2000 avec l'apparition des hydroptères[161]; ces multicoques à foils pouvant atteindre des vitesses

[157] Robert W. WHITTLESEY, Sebastian LISKA et John O. DABIRI, « Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design », *op. cit.*
[158] Ibid.

[159] Ibid.
[160] *Tabarly : la foil histoire du trimaran Paul Ricard*, https://www.voileetmoteur.com/voiliers/actualite-voile/regates-courses/tabarly-la-foil-histoire-de-paul-ricard/72662, consulté le 24 mai 2020.
[161] Jean-Mathieu BOURGEON, Stéphane DYEN, Davy MOYON, Daniel SCHMÄH, Robin AMACHER, Damien COLEGRAVE, Martin CALMON, Mohamed FARHAT, Pascal FUA, Konstantin STARTCHEV, Guillaume BONNIER, Jan-

extrêmement élevées grâce à leurs foils : plus de ce 100km/h2. Le record de vitesse à la voile a été nouvellement établi en 2012 par le Sailrocket 2 de Vestas (Voir figure 6), un engin à foil. Une pointe de vitesse de 121 km/h a été mesuré en 2012 en Namibie par Paul Larsen, un navigateur australien.

Figure 233.Vestas Sailrocket 2, piloté par Paul Larsen et conçu par l'architecte naval anglais Malcolm Barnsley

Figure 234. Le Greenbird, voiture propulsée par le vent bat le record de vitesse dans le désert du Névada à 201 km/H, piloté par l'anglais Richard Jenkins. Il utilise aussi une voile rigide en carbone de type Foil pour atteindre 3 à 5 fois la vitesse du vent.

La vitesse de déplacement génère sur le foil une portance hydrodynamique capable de soulever la ou les coques du bateau partiellement ou totalement hors de l'eau. Le but de ce transfert de portance est de réduire la traînée de la coque (frottement et vagues) et de réduire la puissance nécessaire à la vitesse de croisière.

La forme des foils[162] (profil et longueur) est générée pour des raisons hydrodynamiques, un fort allongement permet de réduire la traînée induite par la portance. Dans le cas des voiliers (poutre en flexion, moment fléchissant), les profils sont épaissis et allongés.

Selon l'effet Coanda[163] et la loi de Newton, du fait de la viscosité du milieu, la masse d'air en mouvement qui rencontre un profil cambré suit la surface de ce profil ; la masse d'air est déviée,

---

Anders MÅNSON, Véronique MICHAUD, Antoine SIGG, Marc OGGIER, Michel DEVILLE, Olivier BRAUN, Mark SAWLEY, Luc BLECHA et Joël CUGNONI, *L'Hydroptère: A story of a dream*, https://infoscience.epfl.ch/record/161566, consulté le 24 mai 2020.

[162] Matthew SHEAHAN, « The foiling phenomenon – how sailing boats got up on foils to go ever-faster », p. 19.

[163] *L'effet Coandă , (du nom de l'ingénieur roumain né en 1886 Henri Coandă, est l'attraction ou l'attachement d'un fluide sur une surface convexe sur laquelle il s'écoule. Le fluide suit la surface et subit*

c'est l'effet Coanda. En réaction à la quantité de mouvement de la masse d'air déviée dans un sens (vers le bas pour un profil porteur), l'aile est tirée dans l'autre sens (vers le haut).

Pour une incidence positive (bord d'attaque au-dessus du bord de fuite), la dissymétrie du profil crée des vitesses plus élevées sur l'extrados et plus faibles sur l'intrados. L'hypothèse d'incompressibilité du fluide étudié permet d'expliquer cela. En effet, cette hypothèse permet de montrer la conservation du débit volumique de l'écoulement. Sur l'extrados, les lignes de courant se resserrent, la surface diminue donc la vitesse augmente par conservation du débit volumique et l'inverse se produit sur l'intrados. Selon le théorème de Bernoulli[164], utilisable uniquement sous certaines hypothèses supposées vérifiées lorsqu'un foil fonctionne, (écoulement homogène, incompressible et stationnaire) la pression diminue quand la vitesse augmente et inversement. Ainsi, une surpression se crée sur l'intrados et une dépression sur l'extrados ce qui entraîne une force de portance vers le haut et permet au foil de se soulever. Les profils sont généralement définis par leurs caractéristiques géométriques principales et leurs caractéristiques hydrodynamiques (coefficients de portance, traînée, moment en tangage).

5.1.7.1 Coefficients hydrodynamiques

Le Cz ou coefficient de portance, dépend de la masse, de la surface portante et de la vitesse. Valeur fréquente : 0,4 à 0,7 à la vitesse de croisière. La portance est F = q S Cz avec q = pression dynamique = 1/2 rho V^2 et rho = masse volumique du fluide.

Le Cx ou coefficient de traînée du foil, dépend :

- Du profil et de son état de surface. La rugosité de surface influe sur le coefficient de traînée de frottement (effet de la laminarité),
- De la traînée induite par la portance (influence de l'allongement, de la forme en plan, des interactions),
- De la proximité de la surface (influence de l'immersion sur le champ de vagues).

    - *La calage (en anglais* incidence *ou* rake, est l'angle entre la corde du profil (droite joignant le *bord d'attaque au bord de fuite) et la référence de position (en général l'assiette de fonctionnement nominal, à la vitesse de croisière). Le calage peut être réglable pour modifier la portance.*

    - *Angle d'incidence d'un foil*

      L'angle d'incidence (en anglais AoA, *angle of attack*) d'un foil est l'angle entre la corde du profil (droite joignant le bord d'attaque au bord de fuite) et l'écoulement (le vecteur vitesse local). Quand l'assiette augmente, l'incidence et la portance augmentent.

      La portance augmente avec l'incidence (pente de portance). À partir d'un certain angle, dont la valeur varie en fonction du profil et de l'allongement de la surface portante, il y a un décollement de l'écoulement dit *décrochage et perte de la portance.*

une déviation avant de s'en détacher avec une trajectoire différente de celle qu'il avait en amont. Ce phénomène est une bifurcation stationnaire dans un écoulement fluide.

[164] Etabli en 1738 par Daniel Bernoulli, énonce que dans le flux d'un fluide homogène et incompressible soumis uniquement aux forces de pression et de pesanteur, une accélération se produit simultanément avec la diminution de la pression.

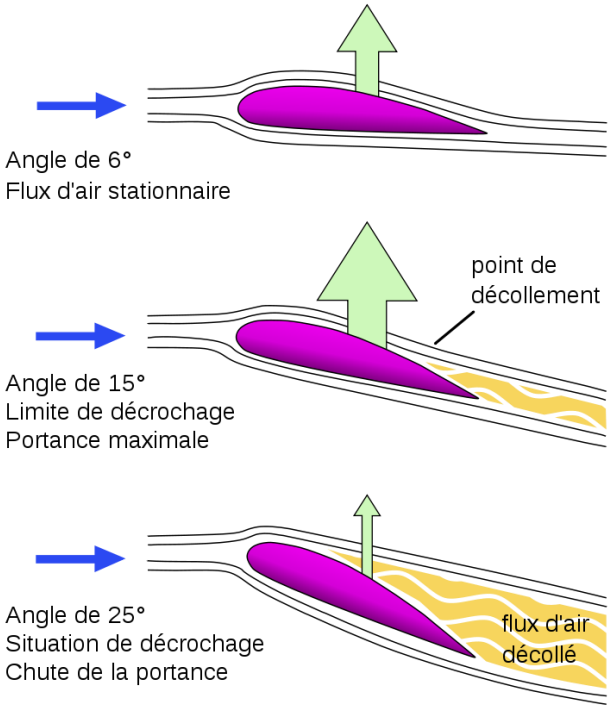


Figure 235. Angle d'incidence d'un foil (source : Wikipédia, portance)

5.1.8 Méthode d'intégration de l'aérofoil

L'insertion de dispositifs de production d'énergie éolien aux bâtiments pose un vrai challenge aux architectes.
Les dispositifs ont besoin d'être largement exposés au vent en s'implantant aux extrémités des constructions (des toitures et des enveloppes), mais les architectes ne souhaitent aujourd'hui pas les montrer et les utilisateurs, malgré leur intérêt pour les bâtiments passifs, ne veulent voir aucun mouvement dans leur environnement et n'entendre aucun bruit. Comment peut-on réellement proposer un dispositif éolien sans **défigurer le paysage urbain ou altérer le projet architectural de l'architecte** ?

Il est important savoir si un dispositif éolien est pertinent et rentable dès la conception du projet. L'architecte et l'équipe de conception pourraient dès les premières esquisses et l'implantation du profil du bâtiment dans le site penser cette relation entre système énergétique et projet. Nous pouvons citer l'exemple de **l'ascenseur** qui est aujourd'hui implanté dès les premiers croquis du projet comme un élément structurant du bâtiment, alors que pendant des années ce n'était qu'un ajout technique en périphérie ou à l'arrière du bâtiment. Nous pouvons aussi citer des éléments comme débords de toiture, brise-soleil, acrotères, qui sont autant de dispositifs inventés par les architectes modernes et devenus les bases du langage architectural contemporain. Les règles de construction influencent, certes, la systématisation de l'usage de ces dispositifs, mais l'image architecturale innovante et l'aide à la **prescription massive des industriels** du bâtiment **stimuleront leur émergence et leur banalisation**.

Il faudrait ainsi que les principes d'implantation soient suffisamment simples et didactiques pour que les architectes puissent les insérer à leur processus de conception dès leurs premières esquisses.
Nous pouvons aussi envisager une autre hypothèse de développement de ces systèmes : L'architecture ne serait pas conçue avec ces dispositifs, ils lui seraient greffés. C'est-à-dire que le temps de la conception du projet resterait un temps différent de celui de la question de la production énergétique. Dans ce cas-là **comment transmettre les bases et les principes pour proposer une grande diversité et une liberté de mise en œuvre ?**

2 types de méthode d'intégration peuvent être envisagées: une méthode par l'ajout, par greffe du dispositif; Ceci peut être réalisé soit par le design d'un dispositif ou u**ne architecture qui traite les systèmes techniques comme un mécano** dans la pensée des architectes-constructeurs , on parle de l'architecture hi-tech, ou les systèmes techniques sont rendues lisibles, ils révèlent avec transparence, le fait que toute architecture est construite à partir d'un assemblage de composants, équipements et systèmes. Certains architectes tels que de Renzo Piano ou Richard Rodgers en ont même fait une approche architecturale, visible dans le Centre Pompidou à Paris ou dans l'aéroport de Madrid Bajaras. Ceci s'exprime dans des bouches de ventilations surdimensionnées qui deviennent des éléments de mobiliers urbains (Centre Georges Pompidou, Paris), ou des luminaires qui sont des éléments supportés par une voûte (Aéroport Barajas, Madrid).

La deuxième méthode serait de travailler en **intégration complète de l'accélérateur ou de la turbine**, les traitant en creux dans le bâtiment, pour rendre **l'élément non visible et non discernable**. Ceci est le principe de l'aérateur intégré, que l'on peut trouver sur les calandres de voitures ou les réacteurs certains avions de chasse, où une simple fente à la surface des objets permet de profiler et de réguler flux d'air constant.

5.1.9 Etude des systèmes aérauliques sur les voitures de course

Figure 236 Etude Aéraulique d'une McLaren F1, 2019 (Soucre : MacLaren entreprise)

- *L'appui aérodynamique*

À des vitesses aussi importantes, les voitures de course interagissent fortement avec l'air qui les entoure. Les ingénieurs se sont servis de cette interaction afin de plaquer au sol la voiture. Si une aile d'avion engendre une force verticale, nommée portance, grâce sa vitesse dans l'air, un aileron de voiture oriente l'aile vers le sol afin d'obtenir une force en direction du sol. Cette force verticale en direction du sol est l'**appui aérodynamique**.

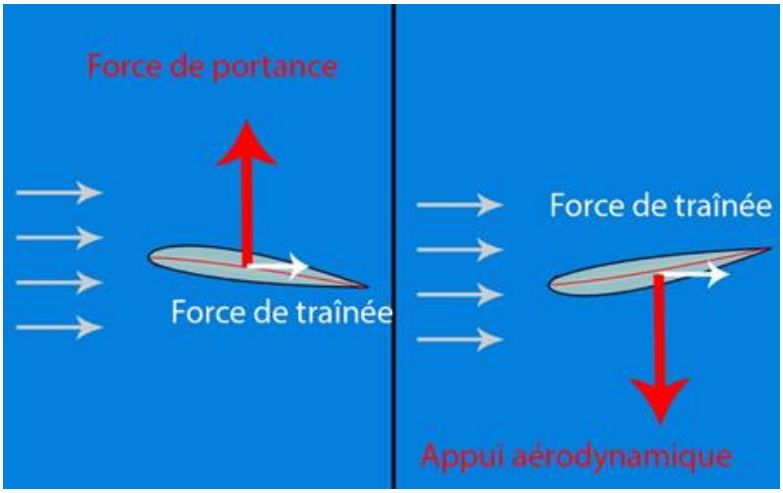


Figure 237 Profil d'aile à gauche : Force de portance, Profil d'aile à l'envers à droite : appui aérodynamique.

L'**aileron** peut également être incliné à la guise du pilote, afin d'augmenter ou de diminuer cette force verticale. Mais plus la force verticale qui plaque la voiture au sol est élevée, plus la force de résistance à l'air est élevée (force de traînée). Pour aller vite dans les virages, un appui aérodynamique élevé est nécessaire, ce qui a pour effet d'augmenter l'adhérence dans le virage. Cependant, une force de résistance à l'air (force de traînée) d'autant plus présente. Cette dernière s'oppose au mouvement de la voiture, ce qui ralentit cette dernière en ligne droite. Il faut donc ajuster précisément l'angle de ces ailerons. C'est pourquoi le réglage des ailerons est propre pour chaque véhicule et chaque circuit de compétition.

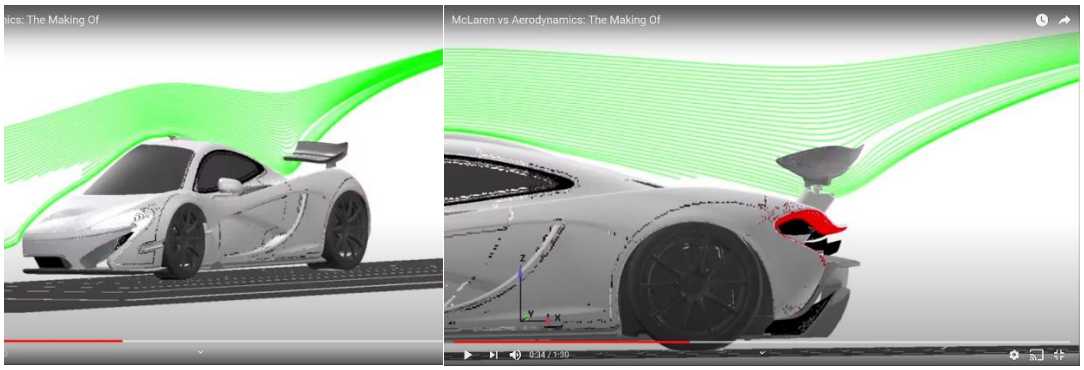


Figure 238 Simulation aéraulique d'un aileron arrière sur l'appui aérodynamique d'une McLaren F1 (Source MacLaren)

- *Les ailerons, les Spoiler, bas de caisse, lames DTM, …*

Dans la conception d'une voiture, les deux éléments aérodynamiques essentiels pour une automobile sont la traînée et la portance. La plupart des voitures possèdent un profil proche de celui d'une aile d'avion avec un dessus incurvé et un fond quasiment plat. Cette différence entre l'air au-dessus de la voiture et l'air en dessous crée une dépression qui soulève la voiture, c'est la portance. L'objectif de la conception des ailerons est de diminuer la portance avec plusieurs solutions :

- *Les ailerons*

Figure 239 Exemples d'ailerons de voitures intégrés à la carrosserie voiture

L'aileron propose une alternative à la portance en y opposant une force de compensation. Son design est spécialement étudié pour rajouter du poids sur une partie de la carrosserie (arrière en général). En effet sa coupe semi-circulaire dirigée vers le haut récupère l'air. Plus la vitesse est élevée plus la pression est forte et le poids conséquent. Seul défaut son dessin ne favorise pas la pénétration dans l'air et freine le véhicule qui en est équipé. La forme des ailerons est spécialement étudiée pour être efficace à partir d'une certaine vitesse et au-delà. Les véhicules dont la puissance sera trop faible ne profiteront pas des qualités mais seulement des défauts. Conseils : au niveau de l'aileron arrière le réglage portera sur l'inclinaison. Plus il sera incliné plus il y aura de poids sur l'arrière et plus la voiture sera stable (mais aussi freinée).

- *Les spoilers et jupes latérales*

Le rôle des spoilers est double, ils profilent la voiture pour améliorer son Cx (coefficient de pénétration) ce qui a pour effet de réduire la traînée. Ils permettent aussi de diminuer la portance en abaissant la face avant du véhicule. Ainsi moins d'air s'engouffre en dessous et donc il y a décroissance de la force de soulèvement. Enfin les différentes nervures qui se dirigent souvent vers le haut jouent le rôle (à haute vitesse) d'autant de petits ailerons pour asseoir le train avant. Cependant, les spoilers sont étudiés pour ne pas créer de turbulences aérodynamiques sous peine de générer un déséquilibre à haute vitesse et/ou une augmentation de la traînée. Les jupes latérales jouent un rôle similaire mais de façon moins importante. Elles permettent de diminuer la portance et la traînée en améliorant le Cx et en abaissant les côtés du véhicule. De plus, elles canalisent l'air en provenance des roues avant et en direction des roues arrières.

- *Les lames DTM*

Figure 240 Exemples de lames DTM sur l'avant d'une voiture

Au ras du sol, pourfendant l'air, la lame DTM (Deustche Tourenwagen Masters) tire son nom du trophée Grand Tourisme allemand. Son rôle est une fois de plus de diminuer la portance. Son dessin horizontal permet de canaliser sur les côtés l'air qui arrive de la face avant : le pare-chocs, la calandre, … Il y a donc moins d'air dessous, donc … moins de portance.

Découvert sur la Enzo, les nouveaux appendices aérodynamiques de cette voiture sont pilotés par l'électronique. En fonction de toutes les informations récupérées par les capteurs : vitesse, angle de braquage, … l'électronique va se charger de définir une inclinaison pour les mini-ailerons placés dans le spoiler avant et à l'arrière. Ces nouveaux éléments sont réactifs et permettent à l'automobile d'avoir une assise de 70% plus efficace qu'un véhicule standard.

5.1.10 Des éoliennes-sur-mesures profilées sur l'architecture et sur le site réel

L'objectif de cette partie de la thèse est de pouvoir dans un premier temps, schématiser les principes de conception simples et efficaces pour les architectes et les ingénieurs, pour proposer des modes d'intégration en fonction de données du vent, (depuis une cartographie éolienne ou des relevés anémométriques du site), de pouvoir fabriquer sur mesure le dispositif pour l'adapter à l'architecture, et d'évaluer la performance l'énergie extraite lors de l'augmentation de la vitesse du vent. Nous parlerons alors de **dispositif-sur-mesure** (tailored wind devices)

- *Des aérofoils à angles variables pour accélérer et maîtriser le flux d'air*

Nous pouvons comparer cela à la manière dont les ailerons de voitures de course utilisent à grande vitesse (plus de 220km/h) l'appui aérodynamique pour conserver la voiture sur le sol et compenser l'effet de portance aérodynamique qui tend à soulever la voiture du sol.

Nous pouvons aussi comparer cela aux foils sous le navire d'un catamaran de profilés pour faire sortir à plus d'un mètre de haut des bateaux voiliers de plus de 7 tonnes de poids, décollant la coque de l'eau. Ces foils limitent les forces de friction entre la surface de la coque et l'eau aux grandes vitesses de déplacement du voilier.

Pouvons-nous imaginer un profilage architectural où des ailerons sur les volumes extérieurs pourraient ajuster la vitesse du vent et l'amélioration de production d'énergie mais aussi d'autres performances de la façade comme brise-soleil, récupération des eaux de pluie, cheminement réseau technique (tel que câblage et réseau d'eau, brise-vue de protection ou d'intimité), élément d'affinement de la silhouette, élément de ventilation naturelle du bâtiment, élément de pression et dépression terre sur la paroi de l'architecture ?

5.2 TYPOLOGIES DES TURBINES INTEGREES ET MAQUETTES D'ETUDE EXPERIMENTALE

Malgré nos recherches intensives, nous ne pourrions présenter ici **l'ensemble des types d'éoliennes existantes**[165] **aujourd'hui tant** elles sont nombreuses et diverses. Depuis les systèmes éoliens au XIXe siècle, pour pomper l'eau jusqu'aux turbines à axe vertical (Savonius et Darrieus)[166] et jusqu'aux éoliennes sans engrenages à entrainement direct[167] et il est surprenant de constater, que malgré une utilisation qui reste marginale, il existe une très grande quantité de produits nouveaux sur le marché.

Figure 241. 4 2 Typologies de turbines éoliennes à axe vertical

Cependant notre étude montre que **les technologies de fabrication robotique** de type **impression numérique 3D**[168] permet d'imaginer la fabrication d'éoliennes performantes[169] précisément adaptées au type de vent, au type d'aérofoil et au type de bâtiment à construire.

Ces technologies permettent d'envisager une **fabrication sur mesure** selon les besoins du bâtiment ou des constructeurs avec **la possibilité d'un remplacement rapide en cas d'avarie**, grâce à l'impression numérique. Cependant les différentes forces qui s'appliquent sur les pales, lors de vents importants, obligent aujourd'hui à renforcer ces produits par l'utilisation **de fibres de carbone, de fibres de verre, ou de lames métalliques cintrées**. La turbine sera choisie en fonction des différentes situations d'implantation.

---

[165] D. A. SPERA, « Wind Turbine Technology », *The U.S. Department of Energy's Office of Scientific and Technical Information*, 1994.

[166] Ion PARASCHIVOIU, *Wind Turbine Design. With Emphasis on Darrieus Concept - Ion Paraschivoiu*, Polytechnic International Press, 2002.

[167] B.J. CHALMERS et E. SPOONER, « An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, juin 1999, vol. 14, n° 2, pp. 251-257.

[168] K. BASSETT, R. CARRIVEAU et D. S. -K. TING, « 3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 1 septembre 2015, vol. 11, pp. 186-193.

[169] Nuomin HAN, Dan ZHAO, Jorg U. SCHLUTER, Ernest Seach GOH, He ZHAO et Xiao JIN, « Performance evaluation of 3D printed miniature electromagnetic energy harvesters driven by air flow », *Applied Energy*, 15 septembre 2016, vol. 178, pp. 672-680.

5.2.1 Principales typologies d'éoliennes

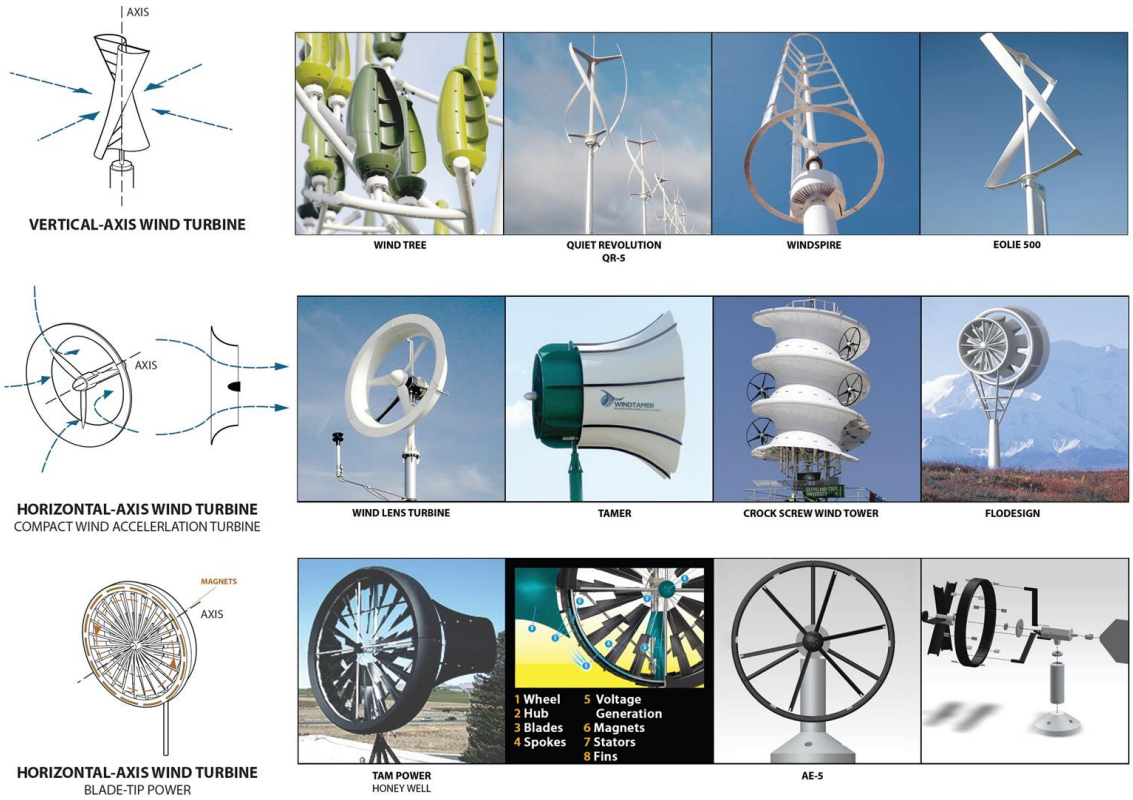


Figure 242 Principales typologies des dispositifs éoliens intégrables aux bâtiments

Pour les typologies de turbines (se référer à ce sujet, à la partie 2)

	TAM TURBINE	HELIX WIND S594	WIND TREE	QR6 Quiet Revolution wind turbine	POWER FLOWERS	HORIZONTAL WIND TURBINE (conventional)	MOTORWIND	CSU	AEROCAM	520H AEROTURBINE
IMAGE										
TYPE	Blade Tip Power	Vertical	Vertical	Vertical	Vertical	Horizontal	Horizontal	CWAT	Horizontal/Vertical	Horizontal/Vertical
LOCATION	**Charleston, SC, US** Rooftop	**Chicago, US** Roof Top: recommend 2 ft above roof line.	**Paris, France** Open space	**London, UK** Rooftop (6m tall) Ground (15-18 m tall)	**Deft, the Netherlands** Open space	**Manama, Bahrain Wolrd Trade Center** Bridge between skyscrapers	**Hong Kong** Rooftops of buildings Balconies at home	**Roof top of a baseball stadium**	Rooftops of buildings	**Chicago, US** Rooftops of buildings
DIMENSIONS	1,8 m in diameter	Rotor dimension: 4.87 m x 1.2 m	The steel tree stands 11 m tall and 8 m in diameter	5.5m tall, 3.1m diameter, 16m2 swept area	3.4 m tall Each unit is 3m in diameter	Blade Diameter: 3,7 m	**Unit**: 26 cm in diameter **Frame**: 1.02 l x 0.54 m h x 0.14 m		2-2,5 m in diameter, 3-3,5 m tall	1,83m in diameter, 3,04m long for each unit
ECHELLE / WIND RANGE	0,2- 15,7 m/s	> 2 m/s	2.5 m/s	3.5 - 26 m/s	12- 33 m/s	7,5 m/s	> 2 m/s	wind amplification to be at about 1.5 times the regular rate	2-17 m/s	11 m/s
GENERATION / ENERGY OUTPUT	6,67 kW/h	4,5 kW/h	3.1 kW/h	8,5 kW/h	152 kW/h	7 kW/h	1.2 kW/h	83 kW/h	35 - 93 kW/h	1,5 kW/h
INVENTEURS / RESEARCH TEAM	**TAM Energy** Charleston, SC, US	**HOK** United States	**Jérôme Michaud-Larivière** France	**Quietrevolution** United Kingdom	**NL Architects** The Netherlands	**Atkins** UK	**Lucien Gambarota / Hong Kong University** Hong Kong	Majid Rashidi, Ph.D Cleveland State Univ. U.S,	**BroadStar** TX, CT, United States	**Aerotecture International Murphy/Jahn Architects** United States
DATE	2011	2010	2015	2011	2011	2007	2007	2012	2007	2007

5.2.2 Méthode de travail : Maquettes d'études physiques comme source de la conception

Les maquettes physiques sont pour les architectes un outil pour mettre au point l'espace et le volume d'un bâtiment. Elles permettent en particulier d'étudier les questions d'échelle et de proportion de ce bâtiment dans son contexte. Dans cette recherche, la maquette a plutôt été utilisée comme un prototype[170], pour modifier et sculpter les éléments de l'enveloppe, en évaluant sa performance dans le vent d'un simple ventilateur. Sans précisément quantifier les vitesses d'air ou l'énergie extraite, nous avons pu rapidement améliorer l'implantation et le **type d'accélérateur de ces dispositifs.**

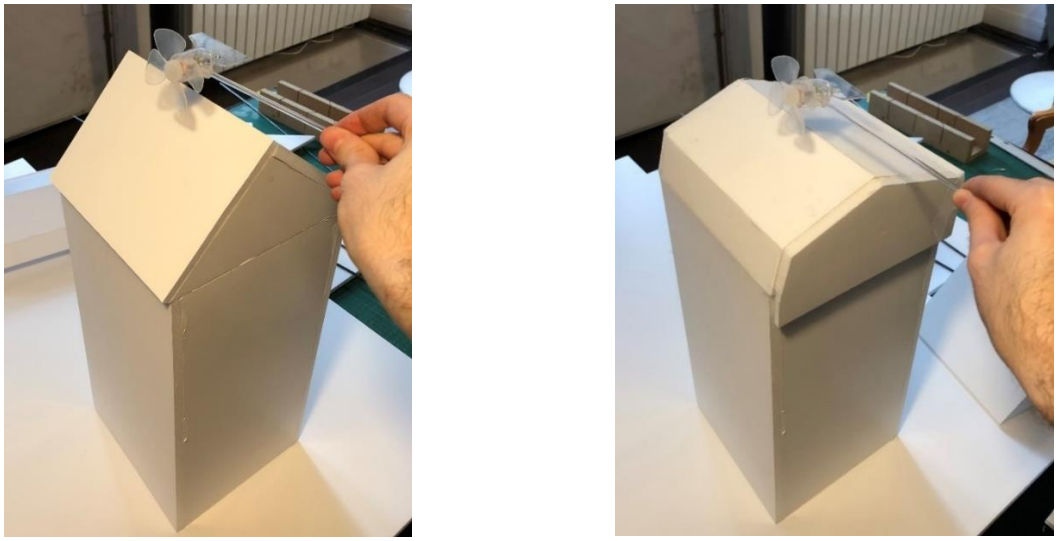


Figure 243. Premières maquettes d'études physiques avec test éolienne à axe horizontal

Etude des localisations possible (toit double pente, toit Mansart, toit plat) de la turbine sur le toit avec et sans Foil :

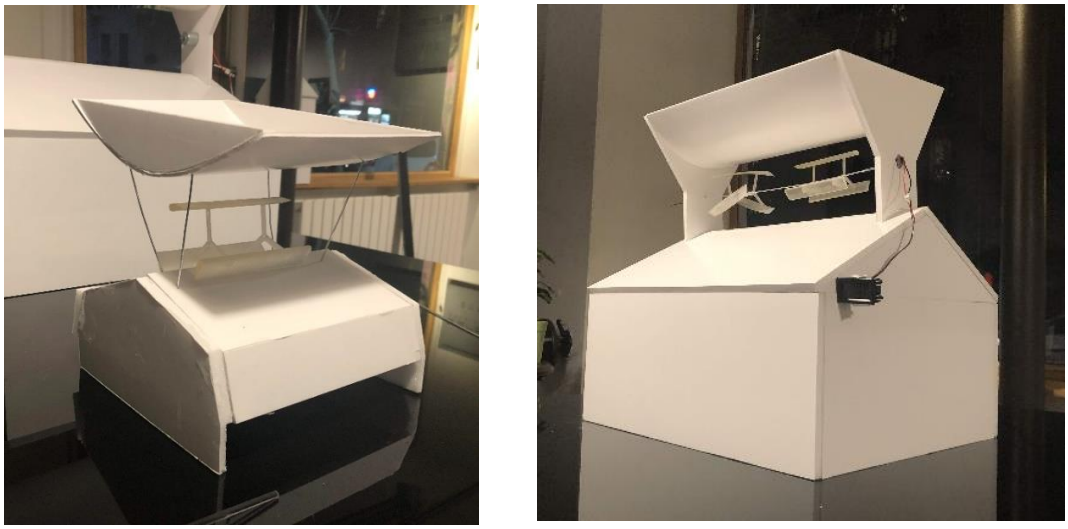


Figure 244. Evolution des maquettes et études des localisations possibles

[170] Mode de conception des designers

Le design du dispositif et notamment, son carénage et son profilage bas, a été amélioré par de simples tests en soufflerie, sans prise de mesures, à la manière dont les designers modifient le prototype d'une chaise pour améliorer son ergonomie (fig 242, puis fig 245).

5.2.3 Modélisation 3D de turbines à axe verticale optimisée pour Vent en site urbain

Pour la réalisation de maquettes d'études, nous avons modélisé en 3D puis imprimé des turbines à l'échelle de la maquette et intégré des micro-générateurs de modélisme. Cette maquette permet de tester l'énergie extraite et le nombre de tours minutes en fonction de l'implantation de la turbine sur le bâtiment et du type d'accélérateur associé à ce dispositif.

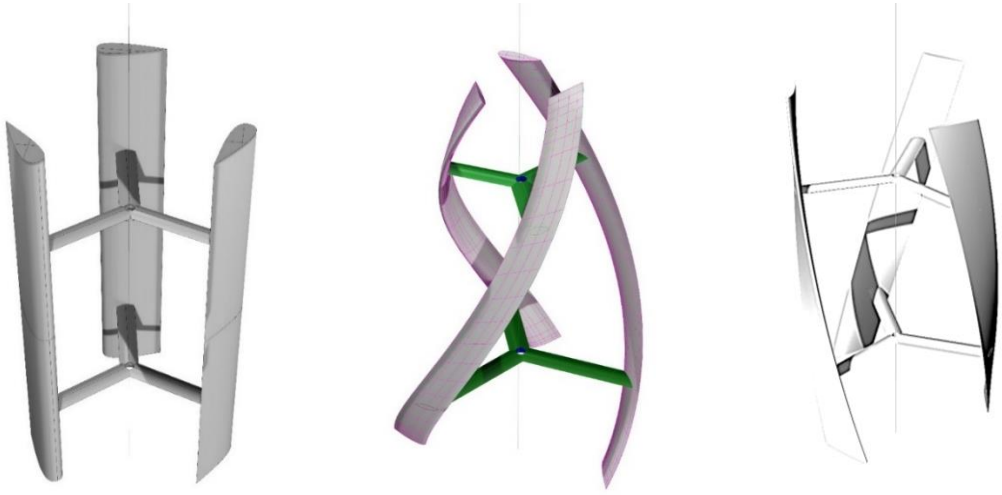


Figure 245. Modèle 3D des turbines étudiées modélisées sur le logiciel Rhinoceros

5.2.4 Impression 3D de turbines à axe vertical optimisé

Le travail en maquette a consisté à analyser la puissance ou la vitesse du vent accélérée par le bâtiment et de proposer l'implantation d'une turbine avec sa structure-support sur celui-ci. C'est donc un travail d'expérimentation avec essais et erreurs qui a permis d'améliorer au fil des maquettes chacun de ces paramètres.

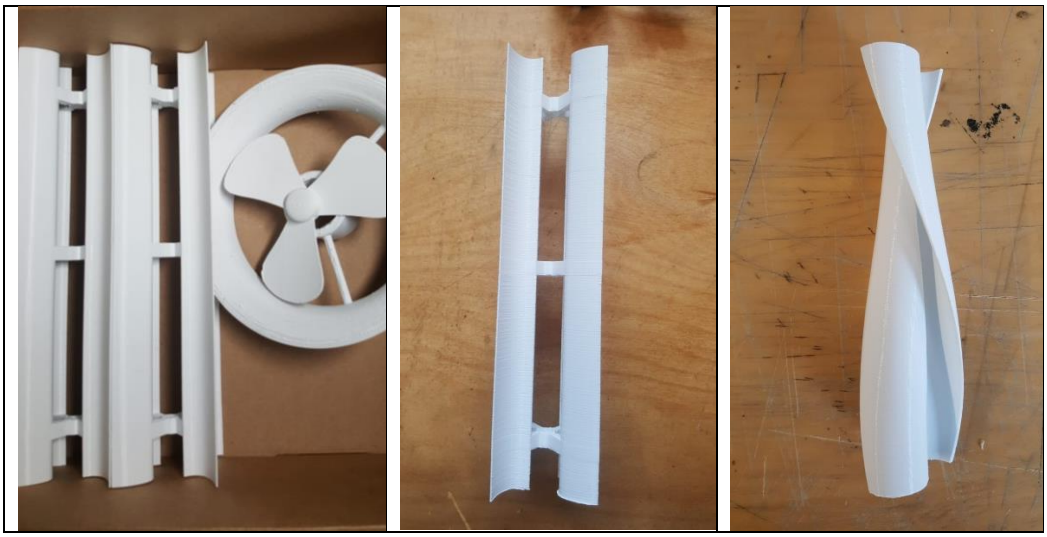


Figure 246 Impression 3d des éoliennes pour la réalisation de maquettes d'étude d'intégration du dispositif ; Etape intermédiaire

L’échelle des turbines a été réduite en diamètre et allongé en longueur afin de pouvoir plus facilement l’ajuster dans le volume de l’architecture étudié. Les accélérateurs sont devenus plus fins, plus allongés, et surtout beaucoup plus précisément implantés dans les zones d’augmentation de la vitesse du vent (identifiées comme des zones rouges par la simulation numérique). (voir le point 3.2, sur le nombre de Reynolds concernant le rapport d’échelle entre la maquette à échelle réduite et le comportement du vent à l’échelle 1)

Augmentée de 2 à 3 fois en fonction des typologies, la vitesse du vent a ensuite progressivement été contrôlée, réorientée vers le dispositif éolien pour augmenter le flux d’air. Le dispositif a ensuite été affiné pour s’intégrer avec élégance et harmonie dans le bâtiment. Chacune de ces maquettes ont fait d’objet d’une simulation numérique afin de pouvoir travailler en parallèle sur une étude expérimentale en maquette, et une étude aéraulique numérique plus précise et plus rapide à réaliser qu’une étude en soufflerie.

Les turbines qui ont été progressivement sélectionnées sont passées de turbines à pales fines de type Darrieus, puis à des éoliennes fines de type Windspire, puis à un type torsadé pour limiter les effets de vibrations, puis à des turbines de type Savonius dont la vitesse est généralement plus réduite mais dont le démarrage à vitesse réduite de vent permet une plus grande régularité de fonctionnement. Il est à noter que ces turbines offrent l’intérêt d’un démarrage seul avec le vent alors que des systèmes Darrieus ne peuvent démarrer qu’à très grande vitesse de vent avec l’aide d’un démarreur.

Nous avons ensuite, à partir de l’éolienne de type Savonius, progressivement twisté sa géométrie permettant une plus grande régularité de la rotation et une diminution des vibrations de la turbine.

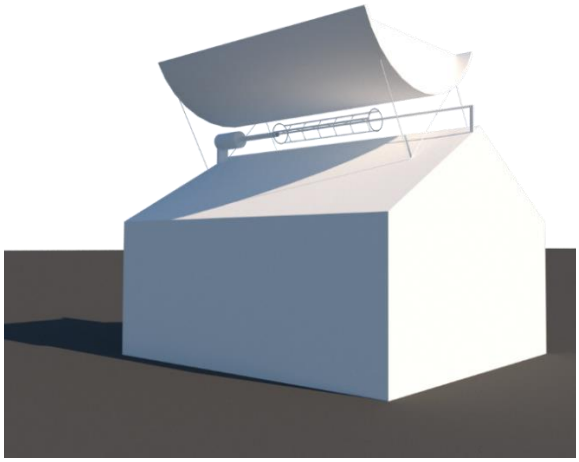
Nous vous présentons ici plusieurs recherches d’impression 3D, réalisées au fil des maquettes.

Figure 247 Mise au point des maquettes d'étude en soufflerie avec G. Bouchet

Figure 248 Maquettes d'étude pour soufflerie

Figure 249.Maquette d'étude initiale avec 2 turbines. Leur géométrie n'est pas adaptée au foil avec un régime moins important sur la turbine en hélice.

Figure 250. Maquette finale optimisée avec allongement de la turbine et contreventement du foil de l'étude



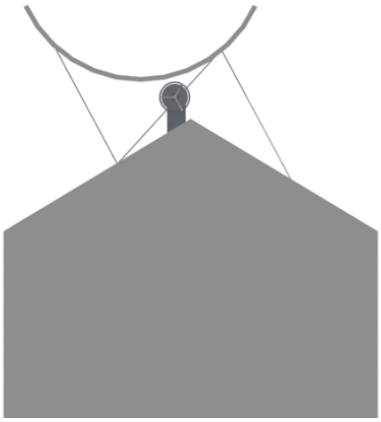


Figure 251. Modélisation 3d du dispositif de foil d'amplification du vent

5.2.5 Maquettes d'étude des dispositifs éoliens intégrés

Les maquettes ont été réalisées en carton blanc et carton plume à la fois très léger et résistant. Elles sont lestées par des poids en plomb afin de rester stables pendant les tests en soufflerie. Les mini-éoliennes et l'aérofoil ont fait aussi l'objet de la mise en œuvre de mini-tubes en treillis réalisé avec des cordes à piano soudées et qui permet une très grande rigidité du prototype et de la turbine avec une très faible prise au vent. Cette structure tubulaire de maquette pourrait exprimer une structure de tubes aciers soudés pour le support des éoliennes à l'échelle 1.

Dans les maquettes, un voltmètre a été intégré à la turbine et montre en temps réel la puissance électrique dégagée par chacune des solutions. Ce dispositif à faible coût a permis à la réalisation d'un très grand nombre de maquettes dans un environnement peu technique et une très forte amélioration du design de l'échelle de l'implantation des éléments sur l'espace.

Figure 252. LED Voltmètre Ampère, Indicateur de Courant/Tension (KKmoon Nouveau DC1-100V 10A Multimètre Numérique)

Dans une extension de cette étude, nous pourrions avoir une augmentation progressive de l'échelle de ces maquettes et une évaluation affinée des performances de turbine et d'accélérateur en regard de l'énergie produite.

Chacune de ses maquettes ont fait l'objet de la réalisation d'un modèle 3D numérique à la même échelle de manière à servir à la simulation numérique et de comparer précisément les résultats entre **étude expérimentale en maquette à petite échelle et étude numérique aéraulique** dans un logiciel tel que **STAR-CCM+** pour préciser le fonctionnement et l'intégration des dispositifs.

Figure 253. Visualisation de clusters en drapeau (flag) sur un bâtiment parisien. (Horizontaux et verticaux) Ce dispositif permet de capturer les vents induits par l'effet couloir des rues de tissu dense et homogène, mais est trop « étrangère » à l'architecture présente.

Ce modèle numérique a servi ensuite à réimprimer la turbine et l'accélérateur à partir de la modélisation 3D du dispositif. Il a aussi servi à la réalisation d'insertion virtuelle photoréaliste dans les bâtiments afin de vérifier **architecturalement l'intégration et l'élégance du système**.

5.2.6 Etude en maquette et profilage des dispositifs

Figure 254. Etude de la maquette du bâtiment de petite échelle.

5.2.7 Etude en soufflerie physique

Figure 255 Soufflerie physique à l'ENPC[171]

La proposition est de réaliser une maquette simple de type prototype qui permet avec le minimum de mise en place d'évaluer les dispositifs éoliens. Ces études seront comparées avec une étude numérique aéraulique en soufflerie.

5.2.8 Résultats et comparaison avec soufflerie numérique

Nous reprenons dans ce chapitre les études réalisées en soufflerie à partir de simulation en soufflerie numérique de modèle 3D. La méthode de simulation consiste en la réalisation un

[171] Pour information, les Caractéristiques de la soufflerie ENPC (l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).: Veine d'air 80cmX80cm avec coffre en plexiglass, Veine d'air libre à aspiration, Longueur de la veine 15m, Vitesse de vent de 5m/s à 30m/s

modèle 3D sur le logiciel Rhinocéros à l'échelle 1/20. Ce modèle est ensuite exporté sur le logiciel de soufflerie numérique **STAR-CCM+**. Nous avons ensuite réalisé un maillage modèle 3D en coupe en augmentant le nombre de mailles à étudier en périphérie de la zone d'implantation de la turbine et du foil et en limitant le nombre de mailles globales. Cette simulation permet de visualiser la vitesse du vent par une vue en fausses couleurs. La création de zones rouges montre une augmentation de 2 à 3 fois la vitesse du vent. Dans cette étude nous n'avons pas modélisé la turbine et sa capacité à tourner en fonction de la vitesse du vent cette étape et en dehors de notre étude initiale.

En synthèse le schéma suivant résume les 3 modèles d'analyse et de simulation aéraulique, le modèle traditionnel en soufflerie physique, le modèle de simulation numérique, et le modèle simplifié de type dendrogramme.

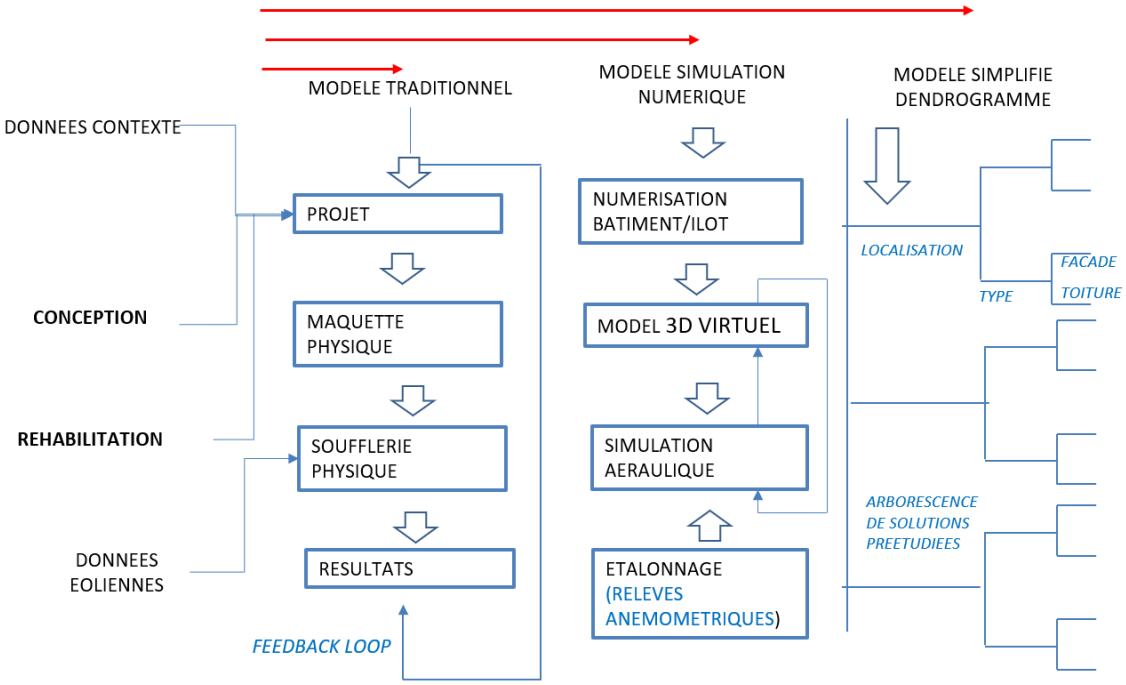


Figure 256 Comparaisaon des méthodes de simulation aéraulique, D. Serero

5.2.9 Les modes d'intégration des dispositifs éoliens

Les dispositifs éoliens ont été catégorisés par leur type de positionnement (vertical, Horizontal) par leur mode d'intégration (en applique, encastré, associé à un accélérateur) ou leur mode d'agrégation (indépendant, en série, en groupe…)

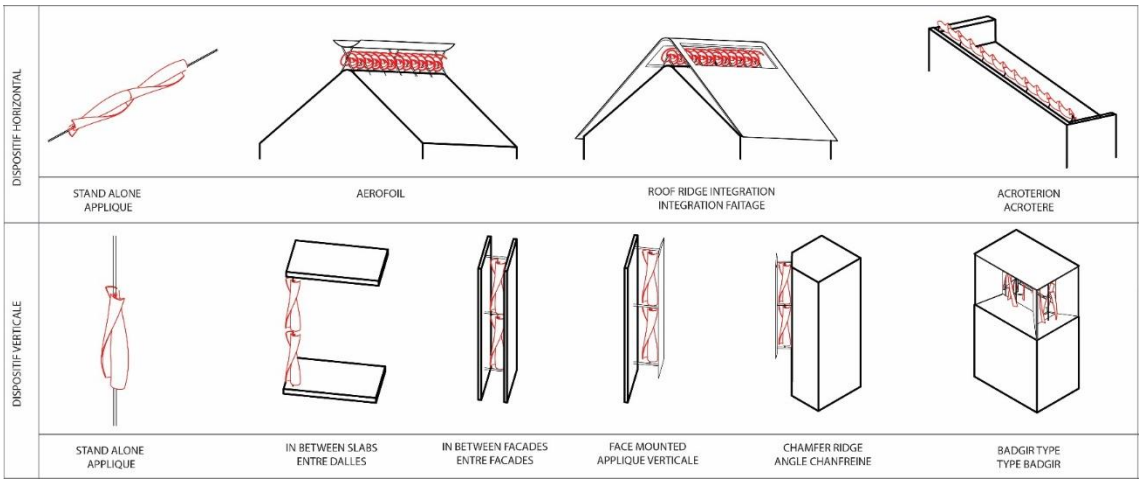


Figure 257 Principales typologies des dispositifs éoliens intégrables aux bâtiments

5.3 QUANTIFICATION DES PUISSANCES DES DISPOSITIFS

La quantification de l'énergie produite est basée sur plusieurs principes liés au dimensionnement des éoliennes et au contexte. Les données du générateur sont mises en relation avec la force rotative produite par les pales de la turbine. La distribution statistique des vitesses du vent varie d'un endroit à l'autre vu qu'elle dépend des conditions climatiques locales, le paysage alentour (notamment la topographie) et la rugosité de sa surface. La distribution de Weibull[172] tend donc à varier, tant en forme qu'en valeur moyenne. L'intermittence des vents et la distribution de Weibull (figure 255), permettant d'identifier la répartition statistique des vents sur un site et de dimensionner les éléments de vente.

Le calcul est donc réalisé en multipliant le nombre de dispositifs répartis sur la hauteur du bâtiment ou la largeur d'une toiture en fonction des connaissances sur l'intermittence des vents à cet endroit-là.

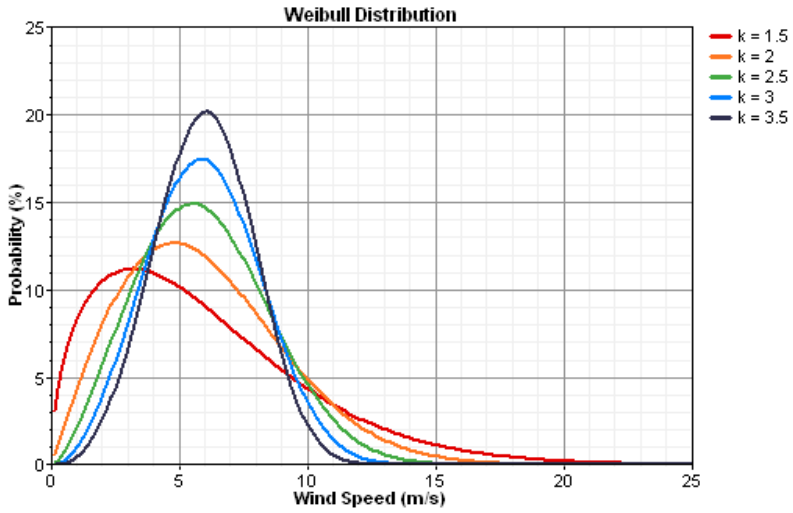


Figure 258 Exemple d'une distribution de Weibull pour estimer la répartition des vents sur l'année, où k est le paramètre de forme.

Ces calculs permettent un dimensionnement relativement précis de l'énergie extraite. Cependant des éléments plus spécifiques telles que le comportement climatique ou la précision de la saisie du contexte du dispositif peut faire évoluer en positif ou en négatif la quantité d'énergie produite.

[172] Loi de probabilité des vitesses de vents sur l'année, du nom du mathématicien Suédois Waloddi Weibull. La courbe de Weibull est une représentation statistique du vent présent sur un site. Les deux coefficients A et K permettent de caractériser le vent sur n'importe quel site.

Le coefficient A correspond au point où le vent est le plus important de la courbe.
Le coefficient K correspond à la forme de la courbe, il oscille entre 1 et 3. Les valeurs les plus petites de ce coefficient correspondent à une courbe très resserrée sur la valeur de A.

La quantification des puissances est précisé au chapitre 5.4 Estimation de l' énergie produite dans une ville type et dans le chapitre 5.6 Exemples d'intégration architecturale de dispositifs de production d'énergie.

Nous pouvons cependant précisé ici qu'une puissance théorique peut être estimé par la multiplication de :

La puissance crête X le coefficient de rendement du vent X le nombre de dispositifs.

Dans nos études de cas, nous prendrons une référence de puissance de dispositifs pour une longueur de 1m de pales d'éoliennes. Cette longueur sera multiplié par le développé de la longueur de dispositifs sur la façade ou la toiture du bâtiment.

5.4 ESTIMATION DE PRINCIPE DE L'ENERGIE GLOBALE PRODUITE DANS UNE VILLE TYPE

En connaissant maintenant la production énergétique d'une éolienne, pouvons-nous évaluer quel serait leur performance si on les déployait en suivant les études que nous avons faites sur une ville entière ?

Nous esquissons ici une évaluation du nombre de foyers qui pourraient être alimentés par ce type de dispositif éolien sur une grande ville telle que Paris. Cette évaluation n'est pas basée sur une simulation numérique de toute la ville, mais bien sur une extrapolation à partir de plusieurs typologies étudiées. Nous pouvons estimer les éléments suivants :

Calcul de la consommation énergétique d'une ville :

- Prenons ici l'exemple d'une ville de 2 millions d'habitants soit $2x10^6$ (Paris Intramuros)
- La surface par habitant est de 25 m^2
- La consommation annuelle par habitant : 50kw.h/m^2/hab.
- Calcul de la consommation pour 25m^2: 50X25 = 1 250 kw.h/hab/an, soit 1,25Mw.h/hab/an
- Calcul de la consommation par jour : 1,25Mw.h/hab/365j =3,42kw.h/hab
- Calculons l'énergie consommée par tous les habitants de la ville :
- 3,4kw.h/hab*$2x10^6$ =6,8 Gw.h/jour

La consommation de 2 millions d'habitants est de 6,8 Gw.h/jour

Si nous installons une micro-éolienne d'une puissance de 500w.h avec un rendement de 0,25.

L'énergie produite par l'éolienne est de l'ordre de 125w/h

Alors pour générer 6,8Gw.h/jour, nous aurions besoin d'installer de l'ordre de 54 400 éoliennes de ce type.

Quelle serait la surface de toiture ou de façade nécessaire pour cette quantité de dispositifs ?

Sachant qu'il y a 100 889 bâtiments à Paris, nous pourrions soit mettre une éolienne tous les 2 bâtiments, ou 2 éoliennes sur le toit d'un bâtiment sur 4.

Mais ces bâtiments ont des surfaces très différentes les uns des autres. Si nous approximons la surface des toitures et façades au-dessus de la couche limite urbaine d'une ville comme Paris à 70 millions de m2, il faudrait alors implanter une éolienne tous les : $70x10^6/54400= 1286$ m^2

Ce calcul montre que, pour un ville très densément habitée telle que Paris (20754 hab/km^2) la densité de dispositifs éoliens en toiture pour atteindre une compensation à 100% de l'énergie consommée par la ville serait réaliste avec les études d'écoulement d'air réalisées en site urbain autour des bâtiments ainsi qu'au niveau de la densification en cluster des éoliennes limitant l'impact des turbulences liées aux éoliennes adjacentes.

> Comme présenté dans l'étude du MIT[173] de Bossanyi et al. sur la densification en cluster d'éoliennes à axes verticales, ces typologies ont un faible impact sur les turbulences d'air générées par les lames. Une densification de leur nombre sur un espace est donc réalisable (60 à 80m2 par éolienne) et ce groupement, comme vu au chapitre 5.1 .7 peut dans certaines conditions, améliorer leur performance par une implantation en configuration biomimétique à celle des bancs de poissons.
>
> Nous pourrions aussi étudier l'hypothèse de répartir ces éoliennes sur un doublement de la surface du territoire urbain (200 millions de m^2 au lieu des 100 millions de m^2).

5.5 DENDROGRAMMES ACTIONNELS D'AIDE A LA CONCEPTION

Pourrions-nous, à l'issu de cette recherche, proposer une méthode d'aide à la conception des architectes et ingénieurs du bâtiment, pour l'intégration architecturale et technique de systèmes de production d'énergie éolienne ?

Nous avons identifié les typologies les plus courantes et les plus rencontrées dans les projets d'architecture et avons analysées les solutions optimales de conception de ces systèmes. Ces implantations comparées avec l'augmentation de la vitesse de vent sur le grand nombre de simulations aérauliques de bâtiments que nous avons réalisées, nous permet de catégoriser des typologies idéales d'implantation et de fonctionnement d'éoliennes intégrées.

Ces résultats sont agrégés dans un guide de type arbre décisionnel ou **dendrogramme** , qui par étape successive conseil les designers dans leur choix. Le dendrogramme ne peut cependant présenter ici tous les types d'architecture ou tous les types intégration.

Dans ces simulations et l'expérimentation en maquette, nous avons très vite identifié **les effets de bord et de surface de l'enveloppe des bâtiments** (Voir figure 256). Les typologies de toiture de type acrotères ou double toiture permettent d'accélérer significativement la vitesse d'air et donc de tirer profit d'un champ d'éoliennes en toiture.

[173] E. A. BOSSANYI, G. E. WHITTLE, P. D. DUNN, N. H. LIPMAN, P. J. MUSGROVE et C. MACLEAN, « The efficiency of wind turbine clusters », 1980, pp. 401-416.

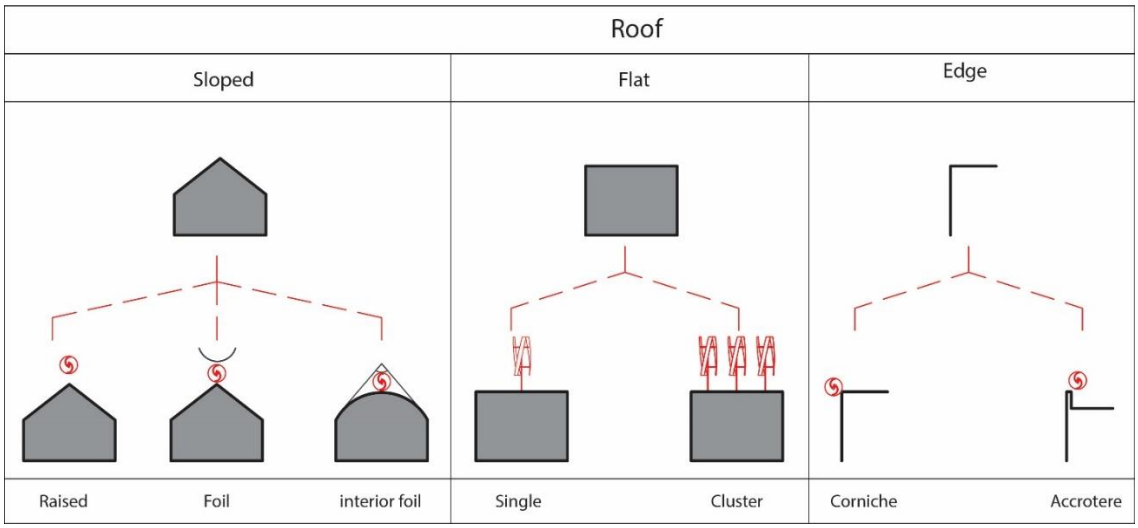


Figure 259. Typologies d'intégration de dispositifs éoliens aux bâtiments sur toiture

Concernant les façades, **les bords de l'architecture, les angles et les arrêtes de ces volumes constituent autant de sources d'augmentation de la vitesse du vent** qui sont mises à profit dans beaucoup de prototypes par des dispositifs d'aérofoils allongés et linéaires sur toute la hauteur ou toute la périphérie d'un bâtiment (voir figure 257).

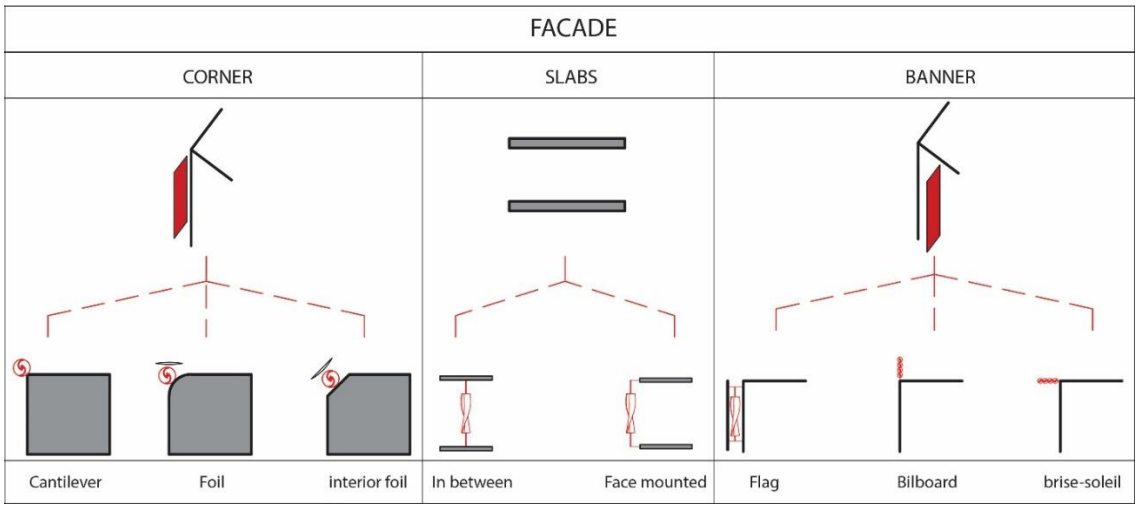


Figure 260 Typologies d'intégration de dispositifs éoliens aux bâtiments sur façade

Les typologies les plus intéressantes **devraient être développées avec la conception du bâtiment afin que la production d'énergie, la ventilation des espaces, les protections solaires ou cheminée de rafraîchissement d'air participent au concept fonctionnel et architectural du bâtiment**. Ceci représente un challenge important pour les architectes dans leurs projets actuels et futurs.

Notre recherche permet de proposer un catalogue de dispositifs éoliens intégrés qui pourront être facilement ajoutés par les architectes dans les bâtiments et dans leur conception. Les mouvements d'air autour d'un bâtiment représentent une force qui ne peut être ignorée dans les futures conceptions au vu de la démocratisation de l'accès aux logiciels de simulation aéraulique (CFD).

Dès l'esquisse, le dendrogramme et le catalogue des dispositifs éoliens que nous avons partagé permettent une conception rapide et simple de ces dispositifs. La simulation numérique STAR CCM+ permet à l'architecte ou l'ingénieur environnemental du bâtiment, de proposer une

étude en **simulation numérique aéraulique** dans un premier temps à partir du dendrogramme actionnel puis à partir d'un modèle 3D complet pour évaluer et ajuster la performance du dispositif choisi.

Cette étude combinée à un relevé de vents sur une période de 6 mois à 18 mois grâce aux anémomètres numériques permet d'envisager une évaluation très précise de l'énergie possible à extraire sur un bâtiment, un ilot urbain, ou une ville.

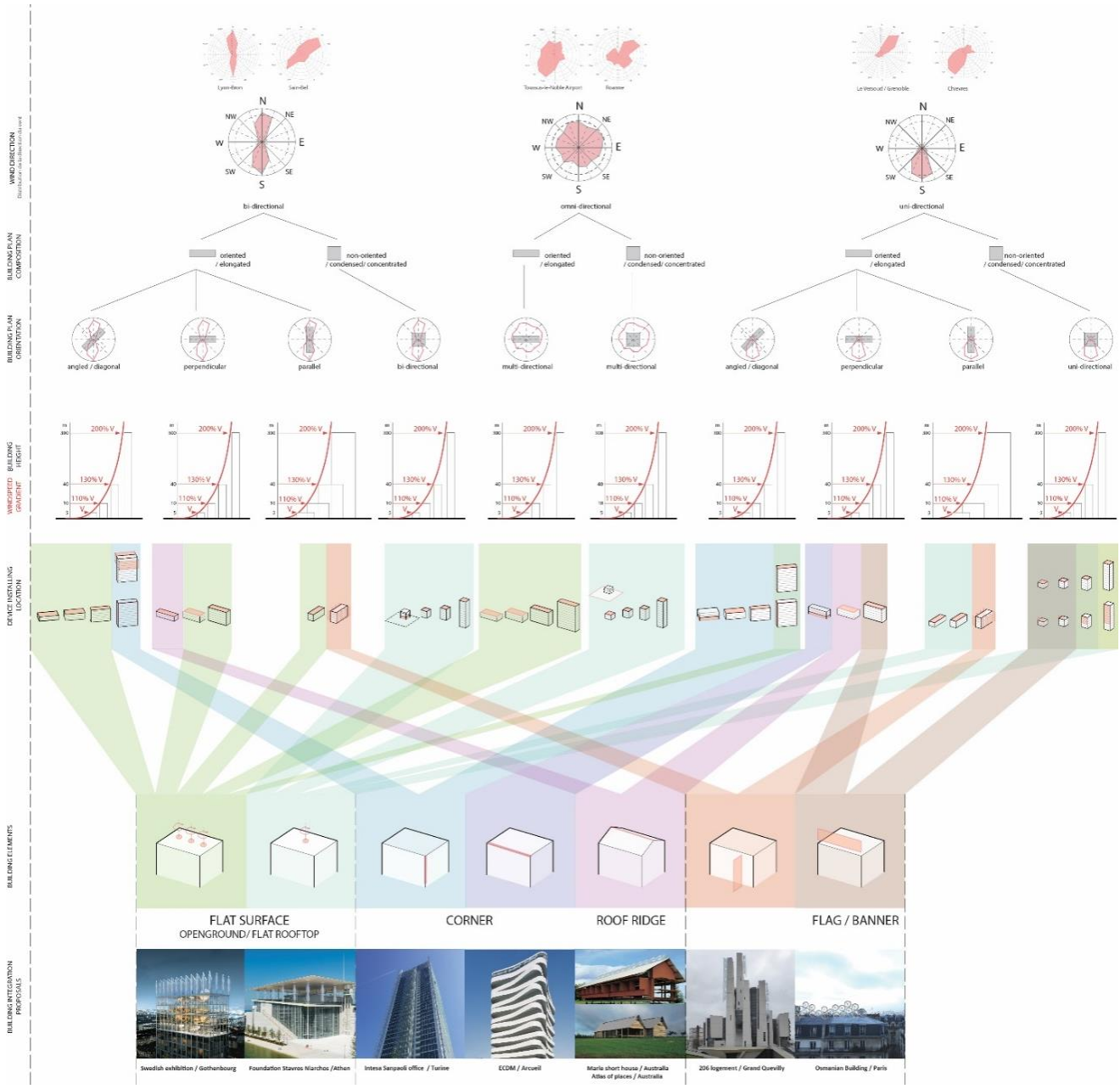


Figure 261. Dendrogramme actionnel éolien à l'usage des architectes et ingénieurs

Ce dendrogramme, du haut vers le bas, permet de guider le concepteur dans le choix du dispositif à implanter sur la bâtiment en fonction de questions filtrantes à chaque ligne. Nous montrons dans le schéma suivant le cheminement de la démarche en marquant en ligne rouge une option et en ligne verte une alternative si les vents dominants sont parallèles à la longueur du bâtiment.

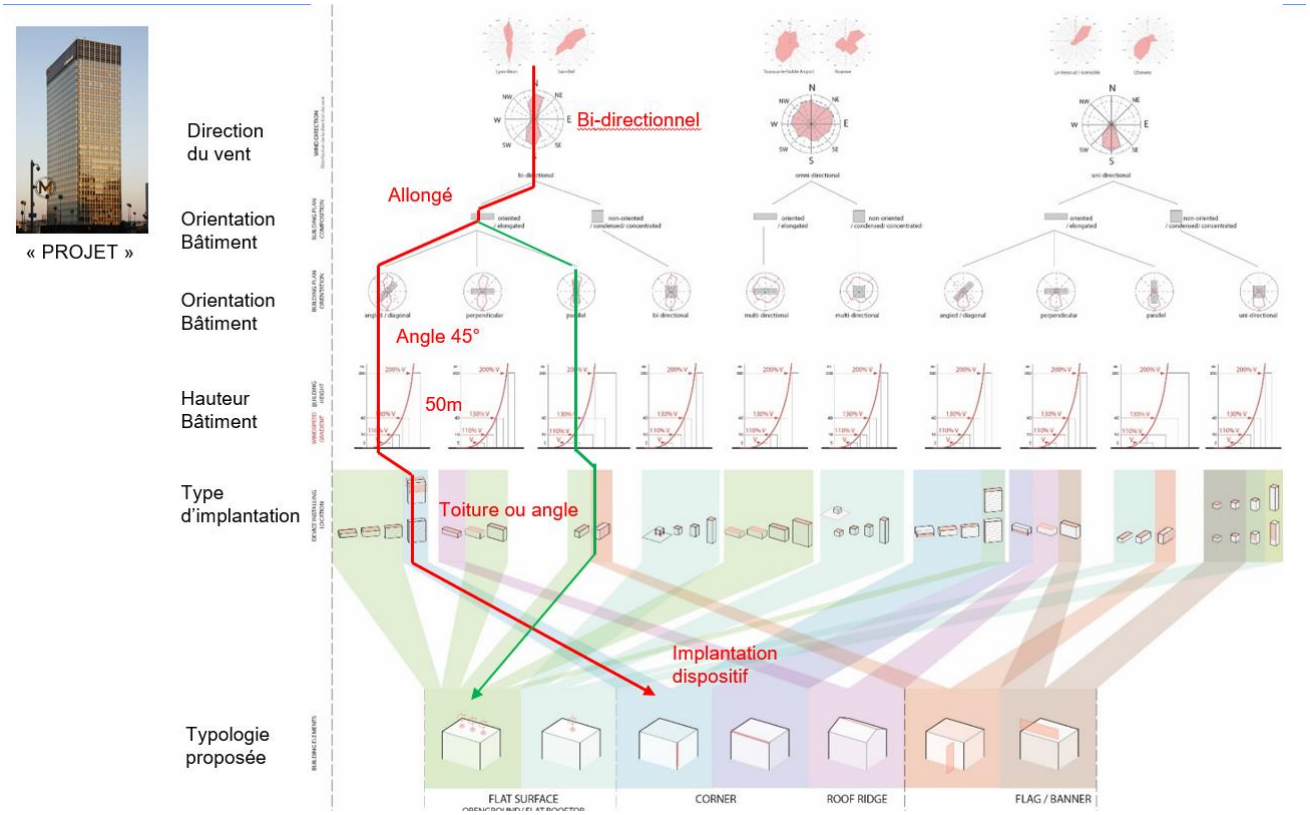


Figure 262 Exemple d'une analyse d'implantation de dispositifs éoliens sur un bâtiment de type tour.

5.6 EXEMPLES D'INTEGRATION ARCHITECTURALE DE DISPOSITIFS DE PRODUCTION D'ENERGIE EOLIENNE

Dans cette partie, des simulations architecturales et performatives ont été faites sur de nombreux exemples internationaux (voir illustrations chapitres 5.6.1 à 5.6.4) afin de mesurer l'impact que cette recherche pourrait avoir sur la construction.

L'insertion de dispositifs de production d'énergie éolien aux bâtiments pose un vrai challenge aux architectes.
Les dispositifs ont besoin d'être largement exposés au vent en s'implantant aux extrémités des constructions (des toitures et des enveloppes), mais les architectes ne souhaitent aujourd'hui pas les montrer et les utilisateurs, malgré leur intérêt pour les bâtiments passifs, ne veulent voir aucun mouvement dans leur environnement et n'entendre aucun bruit. Comment peut-on réellement proposer un dispositif éolien sans **défigurer le paysage urbain ou altérer le projet architectural de l'architecte** ?

Il est important savoir si un dispositif éolien est pertinent et rentable dès la conception du projet. L'architecte et l'équipe de conception pourraient dès les premières esquisses et l'implantation du profil du bâtiment dans le site penser cette relation entre système énergétique et projet. Nous pouvons citer l'exemple de **l'ascenseur** qui est aujourd'hui implanté dès les premiers croquis du projet comme un élément structurant du bâtiment, alors que pendant des années ce n'était qu'un ajout technique en périphérie ou à l'arrière du bâtiment. Nous pouvons aussi citer des éléments comme débords de toiture, brise-soleil, acrotères, qui sont autant de dispositifs inventés par les architectes modernes et devenus les bases du langage architectural contemporain. Les règles de construction influencent, certes, la systématisation de l'usage de ces dispositifs, mais l'image

architecturale innovante et l'aide à la **prescription massive des industriels** du bâtiment **stimuleront leur émergence et leur banalisation**.

Il faudrait ainsi que les principes d'implantation soient suffisamment simples et didactiques pour que les architectes puissent les insérer à leur processus de conception dès leurs premières esquisses.
Nous pouvons aussi envisager une autre hypothèse de développement de ces systèmes : L'architecture ne serait pas conçue avec ces dispositifs, ils lui seraient greffés. C'est-à-dire que le temps de la conception du projet resterait un temps différent de celui de la question de la production énergétique. Dans ce cas-là **comment transmettre les bases et les principes pour proposer une grande diversité et une liberté de mise en œuvre ?**

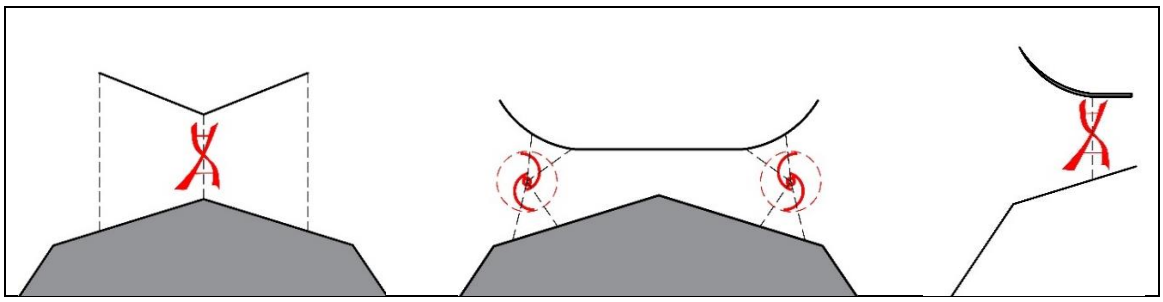
2 types de méthode d'intégration peuvent être envisagées :

- Une méthode par l'ajout, par greffe du dispositif ; Ceci peut être réalisé soit par le design d'un dispositif ou u**ne architecture qui traite les systèmes techniques comme un mécano** dans la pensée des architectes-constructeurs, on parle de l'architecture high-tech, ou les systèmes techniques sont rendues lisibles, ils révèlent avec transparence, le fait que toute architecture est construite à partir d'un assemblage de composants, équipements et systèmes. Des bâtiments comme l'architecture de Renzo Piano ou Richard Rodgers envisagent même une sur-articulation de tous ces dispositifs avec l'architecture. Ceci s'exprime dans des bouches de ventilations surdimensionnées qui deviennent des éléments de mobiliers urbains (Centre Georges Pompidou, Paris), ou des luminaires qui sont des éléments supportés par une voûte (Aéroport Barajas, Madrid).
- La deuxième méthode serait de travailler en **intégration complète de l'accélérateur ou de la turbine**, les traitant en creux dans le bâtiment, pour rendre **l'élément non visible et non discernable**. Ceci est le principe de l'aérateur intégré, que l'on peut trouver sur les calandres de voitures ou les réacteurs certains avions de chasse, où une simple fente à la surface des objets permet de profiler et de réguler flux d'air constant.

5.6.1 Bâtiments anciens ou patrimoniaux

- *Immeuble de logements hausmanien, hauteur 21m, Paris 11ème*

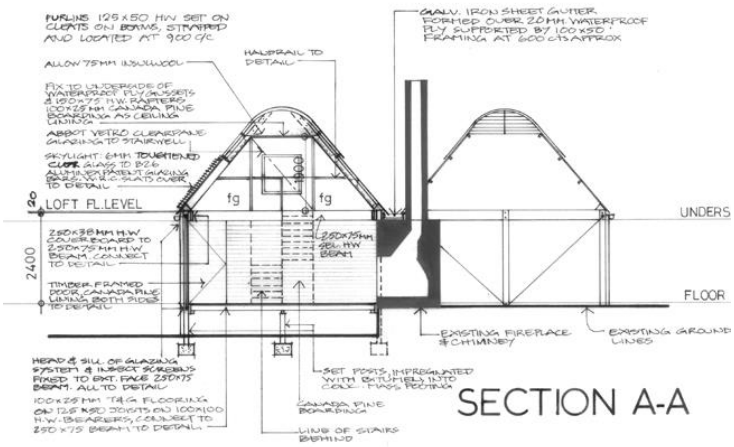
NB DE DIB : 6 (DE 10ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 1,50M
LONGUEUR TOTALE : 9 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : PARIS (75)
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 10M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X9
SOIT 1125W

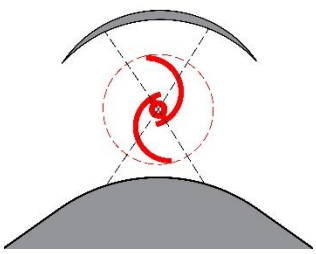


5.6.2 Bâtiment de petite échelle en site isolé, ou site côtier

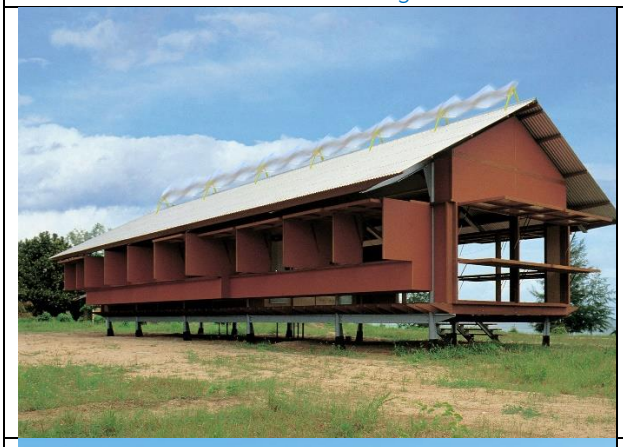
- *Maison Marie Short, Kempsey – Australie 1975, arch : Glenn Murcutt*

NB DE DIB : 2 (DE 14ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 3,20M
LONGUEUR TOTALE : 28 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : SAVONNIUS DROITE
ACCELERATEUR : NON
LOCALISATION : KEMPSEY, AUSTRALIE
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 10M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X28
SOIT 3500W/AN

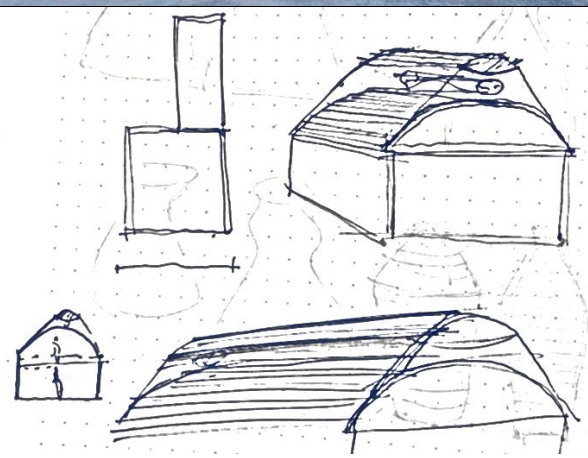


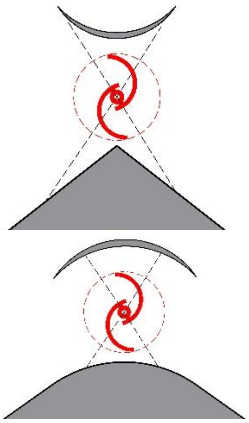


- *Maisons le long de côtes ventées*



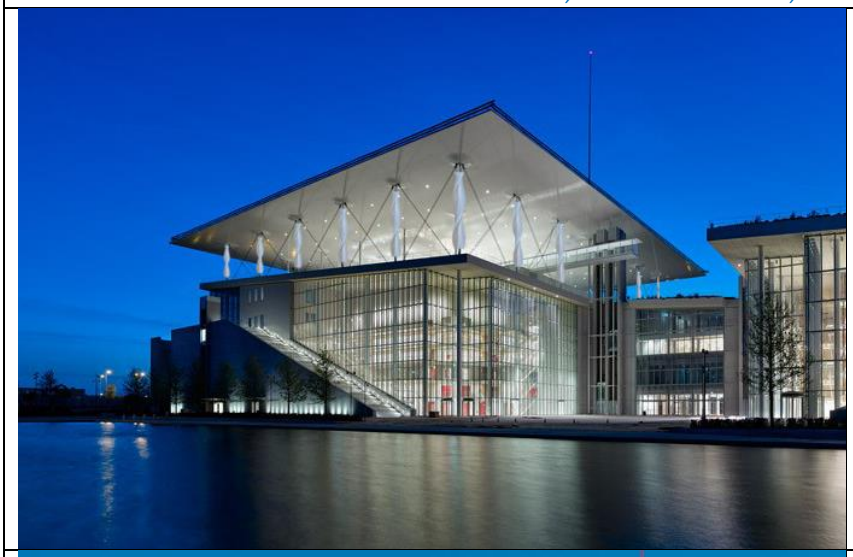
NB DE DIB : 1 (DE 10ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 1,20M
LONGUEUR TOTALE : 10 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : SAVONNIUS DROITE
ACCELERATEUR : NON
LOCALISATION : LORIENT, (56)
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 13M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X10
SOIT 1250W



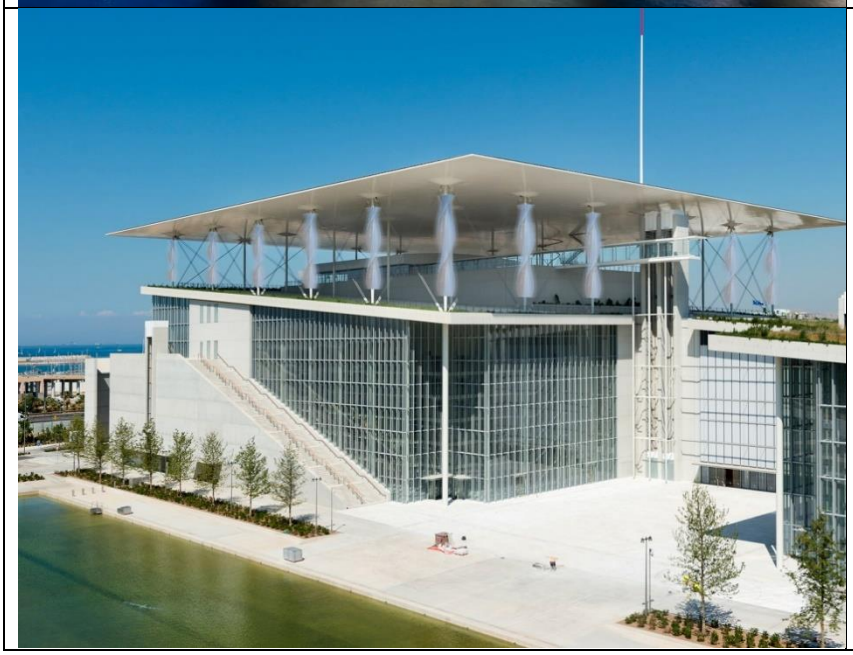


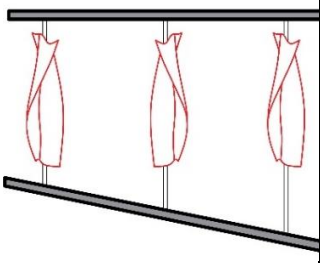
5.6.3 Equipements publics

- *Foundation Stavros Niarchos, Arch. Renzo Piano, 2016, Athens, Grece*



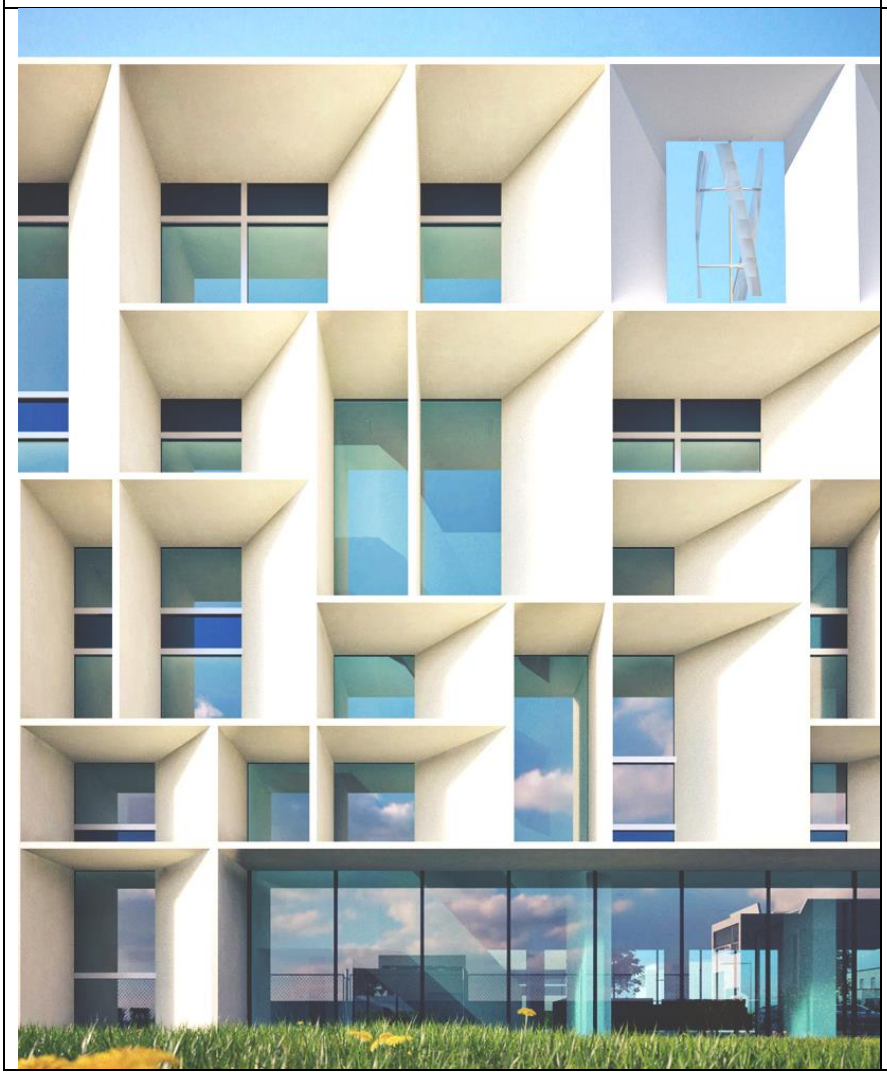
NB DE DIB : 16 (DE 2ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 16M
LONGUEUR TOTALE : 32 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : ATHENES, GRECE
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 15M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X32
SOIT 4000W

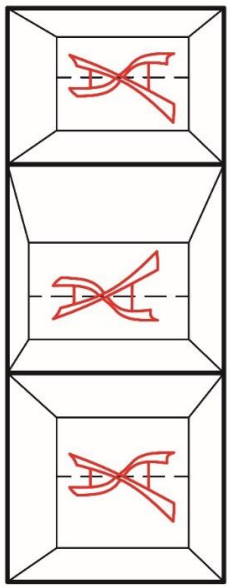




- *Bentini Headquarters, Arch. Piuarch, Faenza, Italie, 2018*

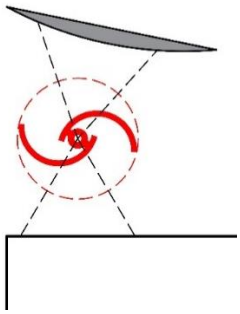
NB DE DIB : 12 (DE 18ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 1,50M
LONGUEUR TOTALE : 18 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : FAENZA, ITALIE
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 1EM/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X18
SOIT 2 250W





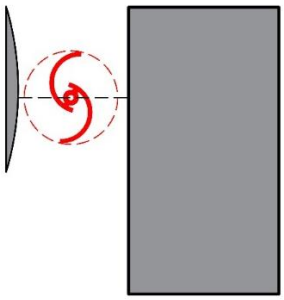
- *Bâtiments universitaire ENPC et IFSTTAR, Campus Cité Descartes, Champs-sur-Marne (77), 1983*

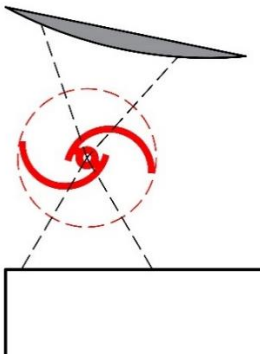
NB DE DIB : 8 (DE 12ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 1,50M
LONGUEUR TOTALE : 12 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : PARIS (75)
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 10M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X12
SOIT 1500W



- *Maison de la recherche et de l'Innovation, Caen, 2016, Arch: Bruther*

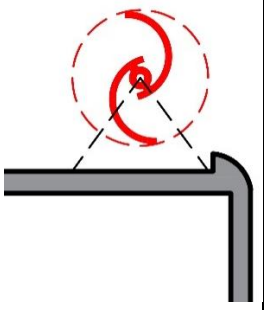
NB DE DIB : 10 (DE 15ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 1,50M
LONGUEUR TOTALE : 15 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : CAEN (14)
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 15M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X15
SOIT 1875W





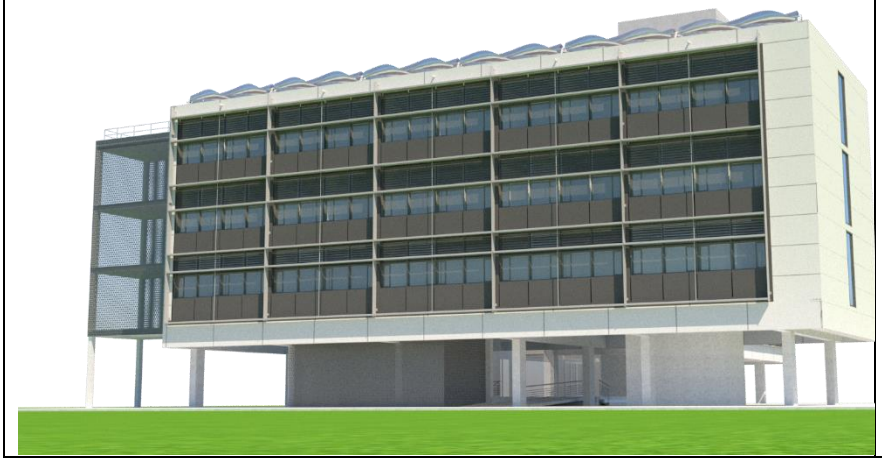
- *Médiathèque de Bayeux, 2018, Arch: SERERO Architectes*

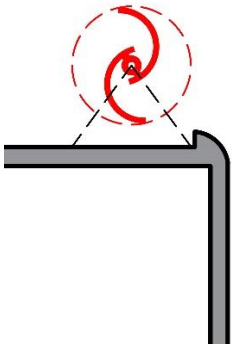
NB DE DIB : 30 (DE 60ML)
LONGUEUR DISPOSITIF : 2M
LONGUEUR TOTALE : 60 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : BAYEUX (14)
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 18M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X60
SOIT 7 500W



- *Centre de recherche Climat Planète, Université UGA, Grenoble, 2020, Arch: SERERO Architectes*

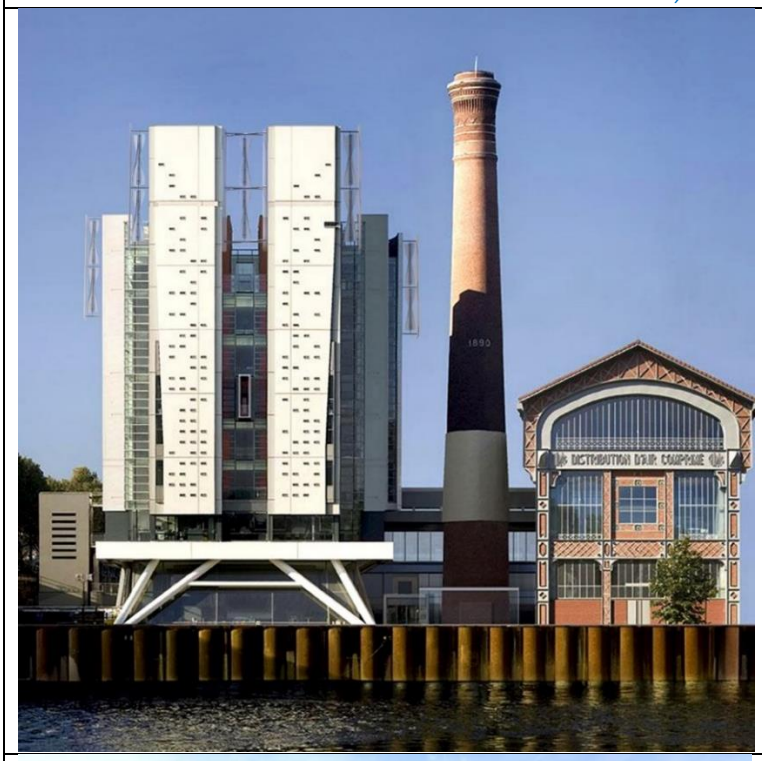
Nb de DIB : 24 (DE 36ml)
Longueur dispositif : 1,50m
LONGUEUR TOTALE : 36 m
Diamètre : 80 cm
Type : Darrieus twisted
Accélérateur : oui
Localisation : Grenoble (38)
Vitesse de vent moyen annuel : 15m/s
Puissance/dispositif : 500W
Puissance extraite : 500X0,25x36
Soit 4 500W



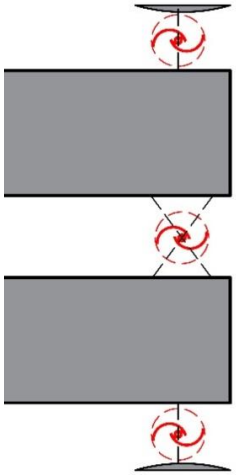


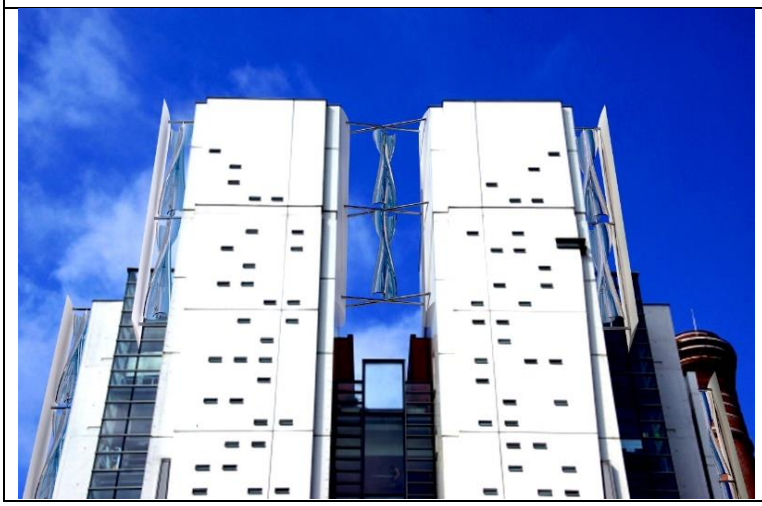
5.6.4 Bâtiments de grande hauteur

- *Ecole d'Architecture Paris Val de Seine, arch : F. Borel, 2008 Paris 13ème*



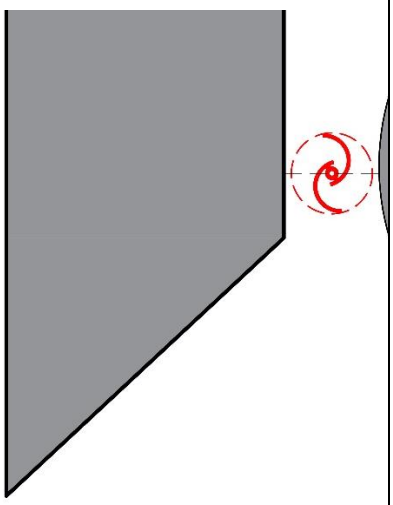
Nb de DIB : 15 (DE 22,5ml)
Longueur dispositif : 1,50m
LONGUEUR TOTALE : 22,5 m
Diamètre : 80 cm
Type : Darrius twisted
Accélérateur : oui
Localisation : Paris (75)
Vitesse de vent moyen annuel : 12m/s
Puissance/dispositif : 500W
Puissance extraite : 500X0,25x22,5
Soit 2 812W





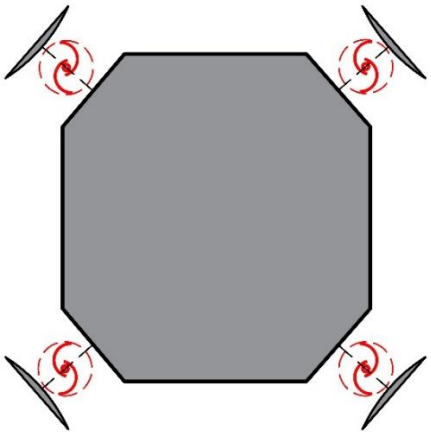
- *Grande Arche, Arch. Johan Otto von Spreckelsen, 1985, Puteaux , France*

Nb de DIB : 22 (de 10ml)
Longueur dispositif : 2,50m
Longueur totale : 55 m
Diamètre : 80 cm
Type : Darrieus twisted
Accélérateur : oui
Localisation : Paris (75)
Vitesse de vent moyen annuel : 10m/s
Puissance/dispositif : 500W
Puissance extraite : 500X0,25x55
Soit 6 875W

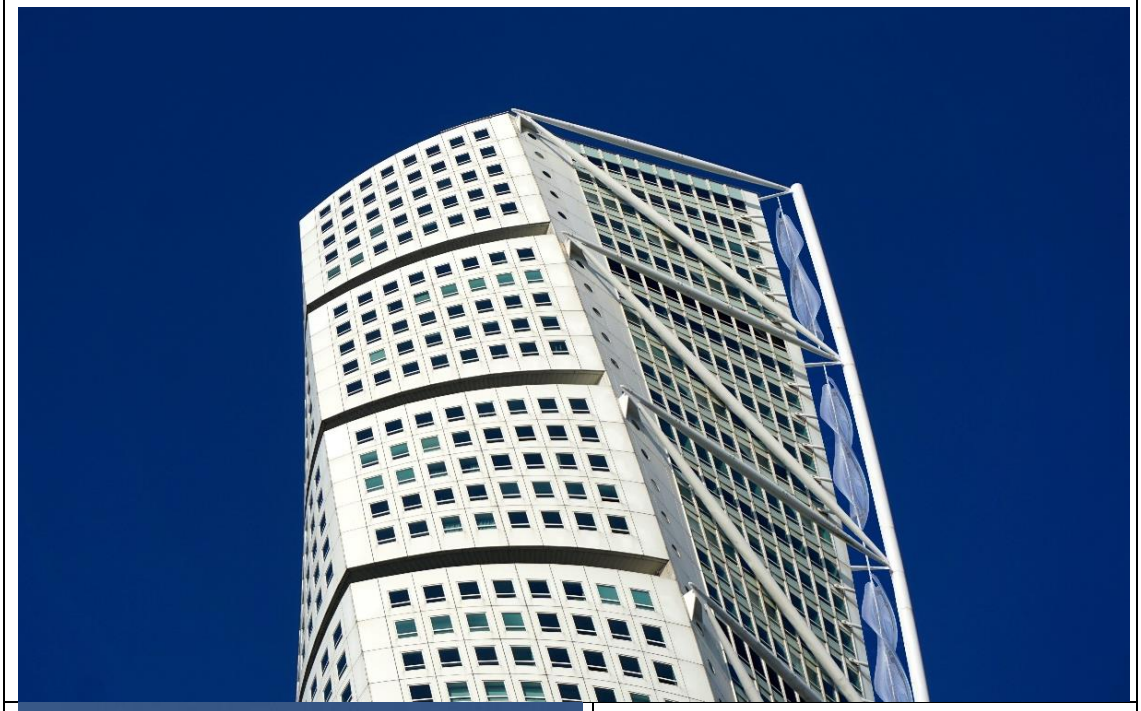


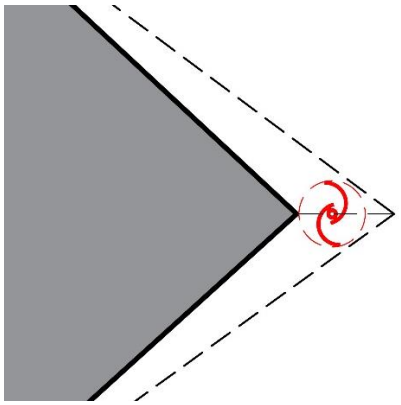
- *Tour one thousand Museum, Arch.Zaha Hadid, 2026, Miami, Etats-unis*

NB DE DIB : 12
LONGUEUR DISPOSITIF : 2,50M
LONGUEUR TOTALE : 30 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : MIAMI, USA
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 12M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X30
SOIT 3 750W



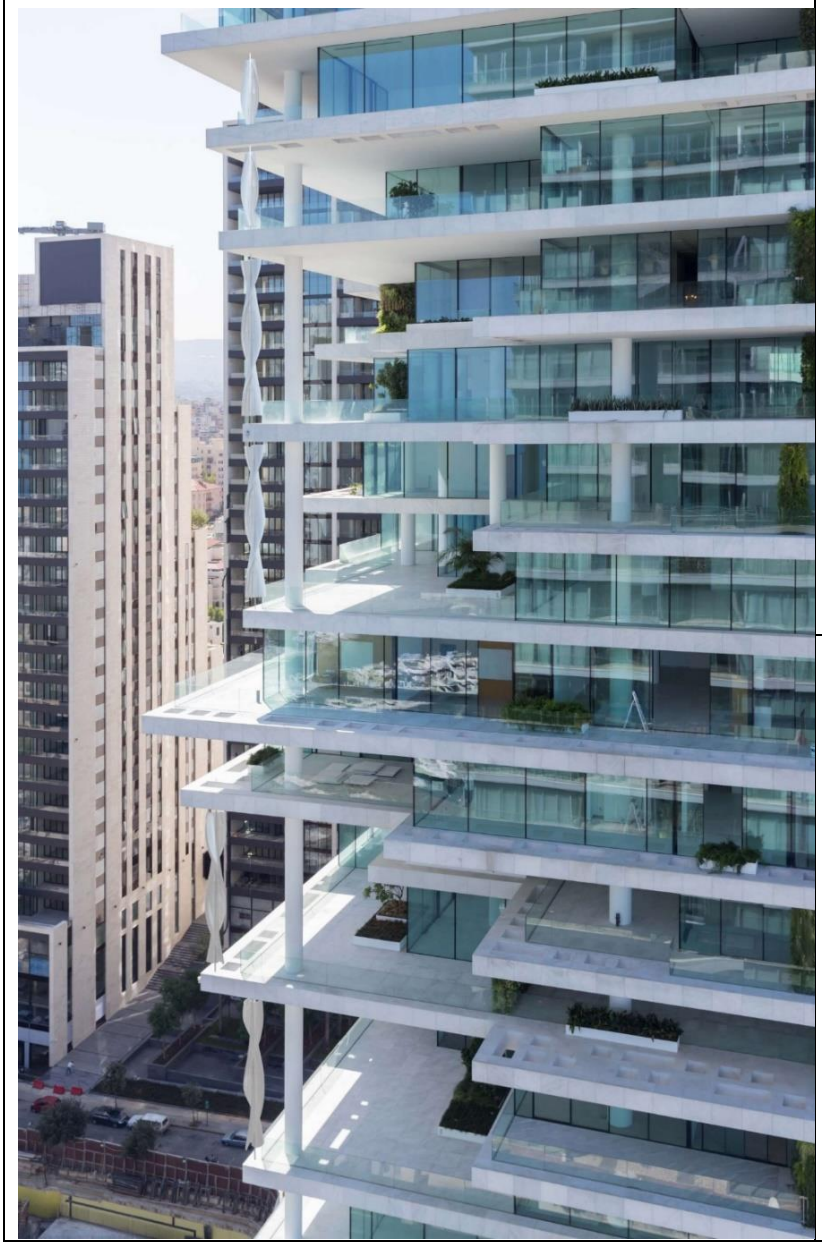
- *Turning Torso Tower, Calatrava, 2001, Malmo, Suède*

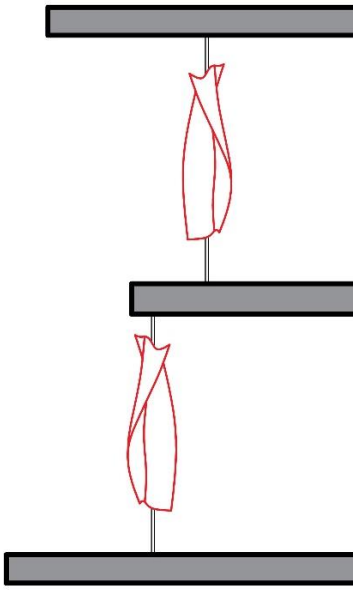




NB DE DIB : 16
LONGUEUR DISPOSITIF: 3.50M
LONGUEUR TOTALE : 56 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : MALMO , SUEDE
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 14M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X56
SOIT 7 000W

- *Terrazas, Arch. Herzog et de Meuron, 2009, Beyrouth, Liban*

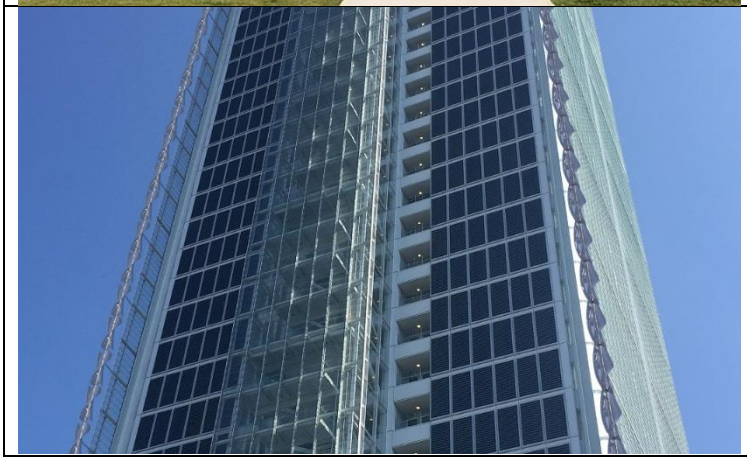


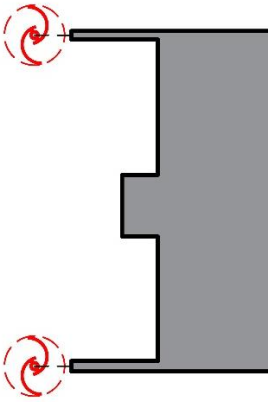


NB DE DIB : 18
LONGUEUR DISPOSITIF : 3,50M
LONGUEUR TOTALE : 63 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : BEYROUTH, LIBAN
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 15M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X63
SOIT 7 875W

- *Intesa Sanpaolo Office Building, Arch Renzo Piano, 2011, Turin, Italie*

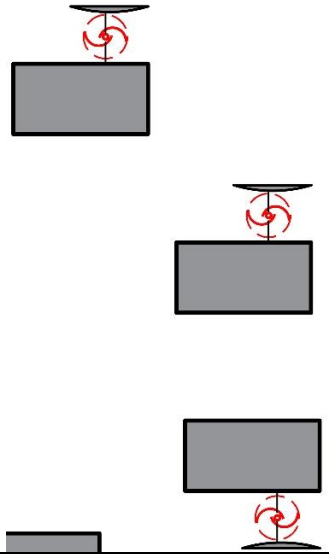
NB DE DIB : 30X2
LONGUEUR DISPOSITIF : 3,50M
LONGUEUR TOTALE : 210 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : TURIN, ITALIE
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 16M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X210
SOIT 26 250W





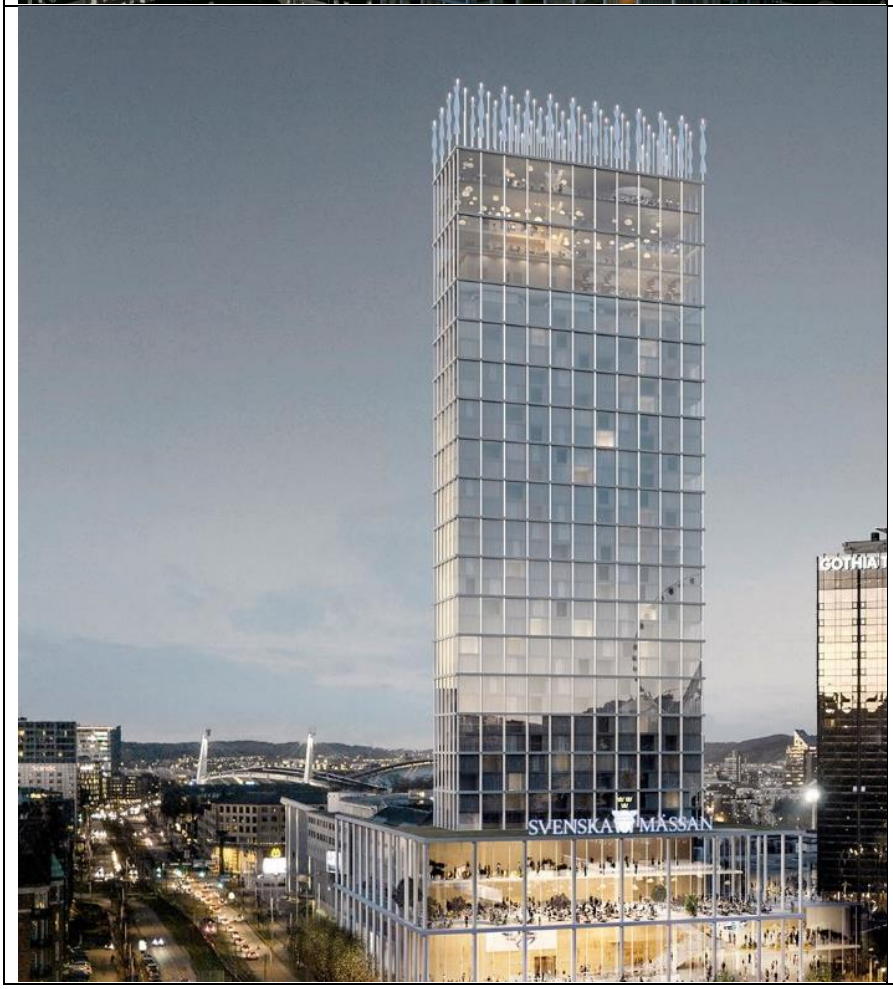
- *206 Logements, Grand Quevilly, Arch. Frederic Borel, 2014, France*

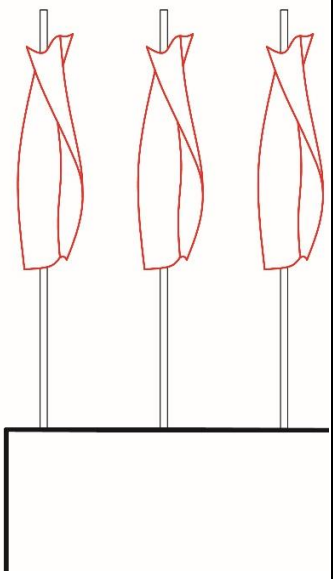
NB DE DIB : 22
LONGUEUR DISPOSITIF : 2,50M
LONGUEUR TOTALE : 55 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : GRAND QUEVILLY (76)
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 12M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X55
SOIT 6 875W



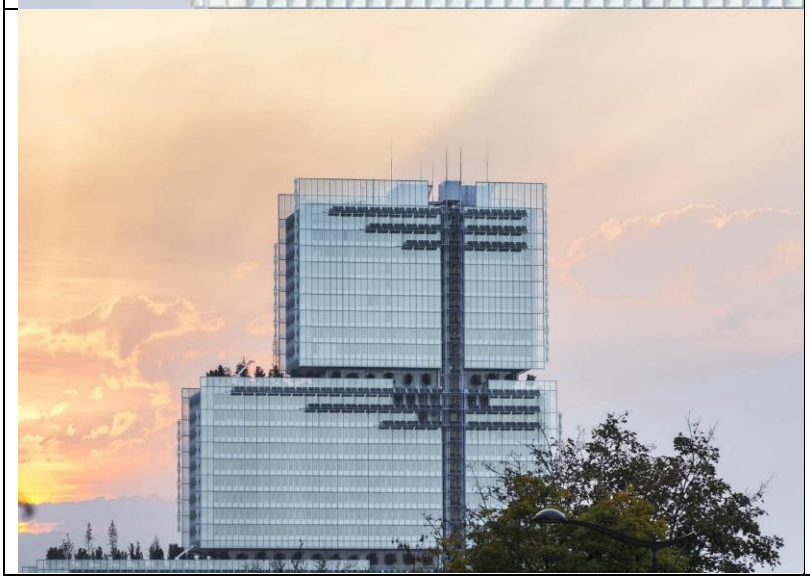
- *Swedish Exhibition & Congress Centre , Arch.Tham & Videgård, 2024, Gothenbourg, Suède*

NB DE DIB : 48
LONGUEUR DISPOSITIF : 3,50M
LONGUEUR TOTALE : 168 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : GOTHEMBOURG, SUEDE
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 15M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X168
SOIT 21 000W

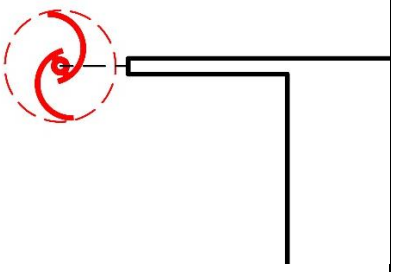




- *Tribunal de Grande instance, Renzo Piano Building Workshop, 2018, Paris 17ème*



NB DE DIB : 60
LONGUEUR DISPOSITIF : 3,50M
LONGUEUR TOTALE : 210 M
DIAMETRE : 80 CM
TYPE : DARRIUS TWISTED
ACCELERATEUR : OUI
LOCALISATION : PARIS (75)
VITESSE DE VENT MOYEN ANNUEL : 12M/S
PUISSANCE/DISPOSITIF : 500W
PUISSANCE EXTRAITE : 500X0,25X210
SOIT 26 250W



5.7 CREATION D'UNE BIBLIOTHEQUE EN ACCES LIBRE DES MODELES DES DISPOSITIFS EOLIENS SUR UNE PLATEFORME COLLABORATIVE BIM

Nous avons vu récemment l'émergence de bibliothèques en ligne de partage de modèles 3D à l'usage des concepteurs de bâtiments. Ces plateformes proposent à la fois des exemples de projets et des produits de fournisseurs de l'industrie du bâtiment de type BIM (Building Information Modeling). C'est une méthode de travail collaborative développée par le secteur de la construction, avec pour objectif d'améliorer la conception des bâtiments, mais surtout de mieux anticiper le suivi de chantier et la gestion de la maintenance du bâtiment. L'ensemble des acteurs de la construction sont progressivement en train de transformer la conception numérique du projet, par une conception multi-acteurs de type « BIM ».

5.7.1 Building information modeling

Au cœur du processus BIM se trouve **une maquette numérique 3D**. Cette maquette 3D contient l'ensemble des données et des éléments nécessaires à la construction d'un bâtiment, mais aussi à l'économie de la construction. Toutes ces informations sont centralisées dans **un même modèle numérique informationnel** qui intègre plusieurs données :

L'architecte, l'ingénieur structure et l'ingénieur fluides réalisent chacun la modélisation de leur composant sur le même modèle 3D. Ceci permet de vérifier que les fondations, la structure, les réseaux (eau, chauffage, gaz, télécom, électricité) sont correctement dimensionnés et implantés sans qu'ils n'interfèrent entre eux.

Les entreprises peuvent anticiper les problèmes de chantier dans un **jumeau numérique du bâtiment** et consulter le modèle 3D pendant le chantier afin de s'assurer de la bonne exécution des travaux.

L'aspect collaboratif du BIM, permet à la fois **une simultanéité de conception** des acteurs et une **continuité dans le processus de conception**. Plusieurs architectes peuvent travailler en simultané sur le même document numérique. Au fur et à mesure des étapes du projet, le projet est progressivement affiné à partir d'un modèle global, évitant tout problème de synthèse technique[174].

5.7.2 Un catalogue de modèles 3D de dispositifs éoliens intégrés

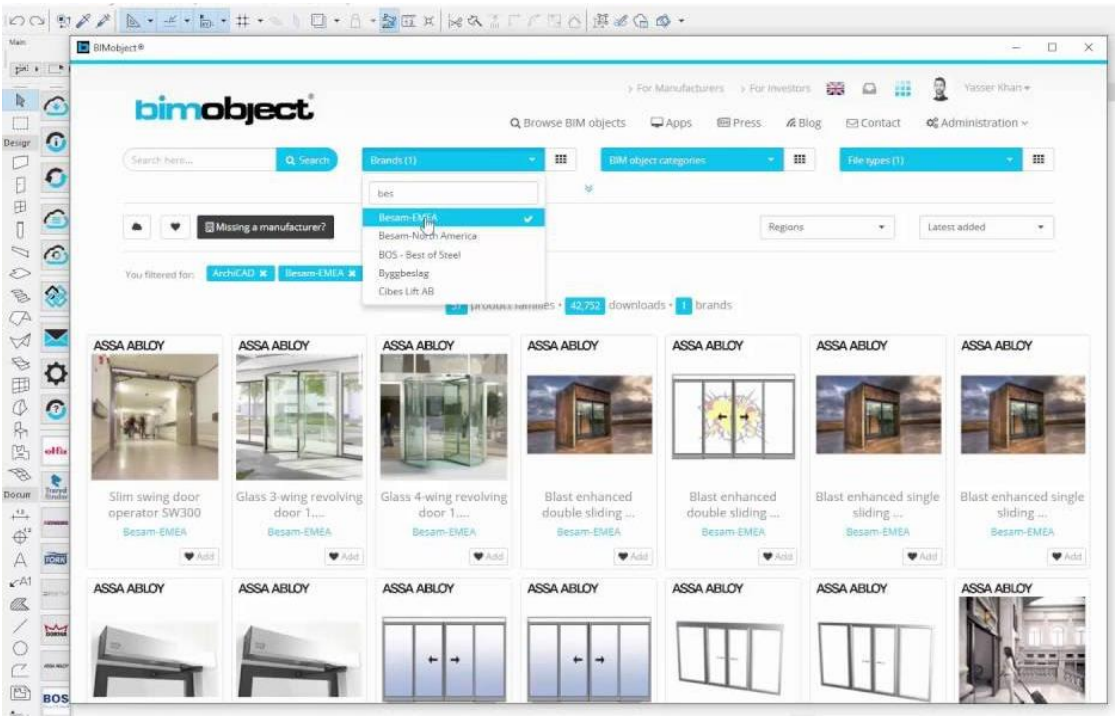
Dans le cadre de cette recherche, nous avons mis à disposition un catalogue[175] de plusieurs modèles 3D d'éoliennes intégrées de type IFC. L'objectif est de pouvoir permettre aux architectes de facilement les intégrer dans leur bâtiment et dans leur conception.

Dès l'esquisse, par l'utilisation du dendrogramme actionnel et du catalogue de familles IFC, l'équipe de conception du bâtiment peut évaluer la pertinence d'un dispositif en termes de production d'énergie, d'encombrement ou d'esthétique.

[174] Pendant la phase d'étude d'exécution, la mission de synthèse assure la cohérence spatiale des ouvrages de l'ensemble des corps d'état, ceci dans le respect des dispositions architecturales, techniques, d'exploitation et de maintenance. Elle permet d'assurer la corrélation des détails d'exécution, le passage des réseaux techniques et l'implantation des terminaux et équipements.

[175] Catalogue disponible sur www.bimobject.com et www.revitcity.com sur le compte David Serero

Dans un 2ème temps, la normalisation et la diffusion de ces modèles 3D partagés, permettra rapidement de réaliser une simulation numérique aéraulique (de type STAR CCM+) par l'expert aéraulique ou l'ingénieur environnemental du bâtiment, à partir d'un modèle 3D complet pour évaluer et ajuster la performance.



Nous pensons que les mouvements d'air autour d'un bâtiment représentent **une force qui ne peut plus être ignorée** dans les futures conceptions au vu de la démocratisation de l'accès aux logiciels de simulation aéraulique (CFD).

Cette étude combinée à un relevé de vents sur une période de 6 mois à 18 mois, grâce aux anémomètres numériques décrits dans cette recherche [176] constituent la base d'une évaluation très précise de l'énergie extractible sur un projet.

[176] Voir chapitre 2 : Relevés du vent par anémomètre connectées

6 CONCLUSION GENERALE

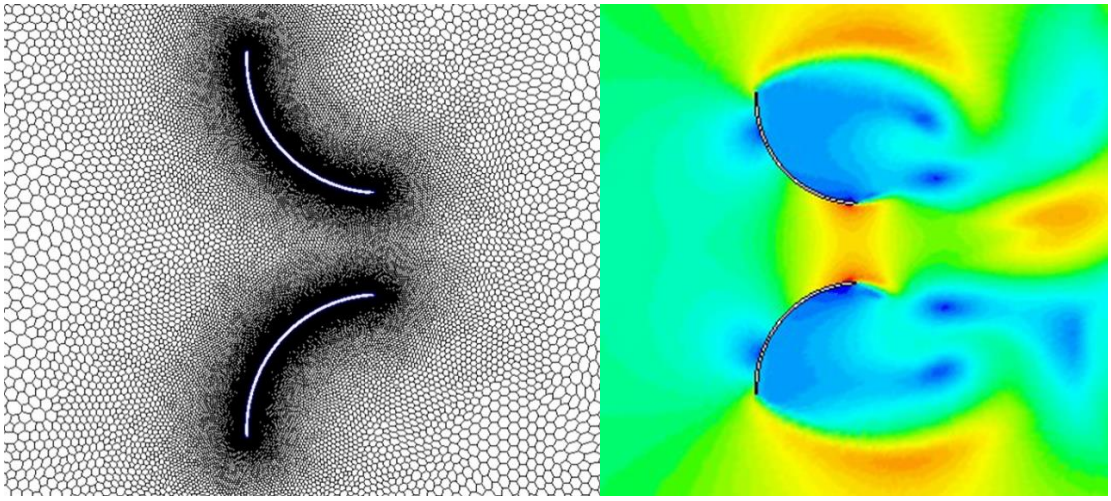


Figure 263 Etude d'écoulement d'air sur un Foil pour accélérer ponctuellement le vent.

Ces années de recherche montrent que la question de **l'aéraulique architecturale** dépasse largement les simples problématiques de l'effet **vibratoire des enveloppes** ou celui de **l'aérodynamique des structures** dans lequel architectes et ingénieurs ont souvent circonscrit ce sujet.

En synthèse les apports principaux de cette recherche sont :

1- La création **de données** éoliennes sur l'écoulement d'air autour des bâtiments (par relevés et par simulation)

2- La définition et étude d'**accélérateurs de type « aérofoil »** permettent localement d'augmenter la vitesse du vent et de stabiliser ses turbulences

3- Une approche et estimation **du potentiel de l'énergie éolienne extractible d'un bâtiment et d'une villes**

4- La mise au point d'une **méthode d'intégration architecturale de dispositifs éoliens de production d'énergie**

5- La conception d'u**n dendrogramme**, arbre décisionnel ou **guide de conception** pour les architectes et ingénieurs

Il est clair maintenant que les bâtiments sont de véritables **« organismes aérauliques »** et qu'ils entretiennent une relation forte avec la physique de leur environnement et en particulier celui de l'écoulement d'air autour de leurs enveloppes extérieures.

De par **son échelle, sa colonisation importante et continue de nouveaux territoires**, la conception architecturale et urbaine de futurs environnements est un sujet primordial pour **repenser notre relation à notre environnement, aux ressources locales et à la production d'énergie.** Cet aspect a souvent été négligé dans la conception architecturale au profit du coût, de la rationalisation des structures, ou au profit d'une pure idéologie formelle (Modernisme, Minimalisme, Régionalisme, …)

Cependant, la localisation de projets dans des zones **climatiques extrêmes** (climats tropicaux ou équatoriaux) ou des zones aux ressources limitées ont obligés les constructeurs à intégrer

la ventilation naturelle comme une fore ce conception (Badgir en Iran, ventilation traversante à La Réunion, parois filtrantes au Vietnam). Quelques architectes précurseurs de la **conception bioclimatique des bâtiments ont aussi développé une approche ultra-sensible à leur environnement** (Glenn Murcutt, Renzo Piano, Lacaton Vassal…) qui est malheureusement restée marginale dans la très grande majorité de notre environnement construit aujourd'hui.

Cette recherche en combinant **analyse numérique aéraulique** de type CFD (computational fluid dynamic) et relevés in situ par **anémomètres connectés**, présente les corrélations entre vitesse de vent et plusieurs types de conditions urbaines afin de prévoir **le potentiel de l'énergie éolienne extractible dans les villes**.

Tout bâtiment, tout mur, génère par sa présence sur un terrain, **un différentiel de pression d'air** sur ces parois extérieures lié aux déplacements d'air environnants. Cette étude a montré que **la volumétrie et la position d'un bâtiment** dans son contexte peuvent ainsi être « **profilé » et « orienté »** pour une augmentation et un contrôle de la vitesse du vent en sa périphérie.

Nous avons développé ici une **méthode de conception des bâtiments** pour les architectes et ingénieurs, afin d'intégrer, dans le développement de leurs projets, **des dispositifs éoliens de production d'énergie**. Des accélérateurs de type « aérofoil » permettent localement de stabiliser les turbulences du vent et d'accélérer la vitesse du vent. En convoquant la **limite de Betz**, (loi cubique entre vitesse de l'air et production énergétique d'un dispositif éolien) **une petite augmentation de la vitesse de l'air montre une augmentation considérable de la production d'énergie**.

Cette recherche identifie **un gisement d'énergie éolien urbain** qui reste à ce jour largement **inexploité**. Les **phénomènes de turbulence en zone urbaine**, **associés à des vents non réguliers** ont désintéressé la plupart des acteurs de l'industrie des énergies renouvelables. Mais l'amélioration des **technologies de micro-éoliennes** et des recherches nouvelles sur **leur assemblage en grappe** (clustering) permet d'envisager la mise en réseau d'un grand nombre de dispositifs à faibles nuisances dans des environnements urbains.

Cette recherche apporte des solutions sur la manière de concevoir des bâtiments avec ces dispositifs de captation d'énergie, en les intégrant à l'enveloppe et au design du bâtiment, et en **ajustant leur structure et leurs enveloppes pour éviter vibrations, et pollution sonores résultantes** ?

L'amélioration de la **conception bioclimatique des bâtiments** associée aux politiques environnementales mondiales de réduction des gaz à effets de serres permet d'envisager l'émergence **d'un écosystème de partage de d'énergie**.

L'émergence de **l'Internet des objets** (IOT) qui permet de faire dialoguer ces dispositifs entre eux, mais aussi avec les utilisateurs et les systèmes de gestion du bâtiment (GTC). C'est une infrastructure naissante, **l'internet de l'énergie** (IOE) qui vise à proposer une organisation pour le partage et l'échange de l'énergie localement. Ce nouveau paradigme projette une vision d'environnements urbains intelligents où les ressources, la production et la consommation d'énergie seraient **hyper-localisés avec un impact environnemental négatif**.

Cette démarche, en rapprochant **des zones de production et de consommation d'énergie**, en limitant les couts d'infrastructure support des éoliennes ainsi que les déperditions électro-

magnétiques lors du transport d'énergie (estimées à 30%) est aussi une réponse nouvelle aux **attaques croissantes de l'industrie énergétique des éoliennes**[177]**.**

Cette recherche a permis la mise au point et le partage de « **dendrogrammes actionnels »** (arbres de décision) comme **outil de conception de système de production d'énergie embarqué** ainsi **qu'une méthode de profilage architectural** pour stimuler et faciliter auprès des architectes et constructeurs la mise en œuvre **d'une architecture zéro-énergie.**

La réalisation d'une étude dans la soufflerie de l'école des Ponts (ENPC) aurait pu être réalisée pour comparer les données des simulations numériques avec des relevés dans une soufflerie physique. Cependant suite au confinement Covid-19 et à la fermeture du campus Descartes de Champs-sur-Marne, cette étude n'a pas pu être développée. Elle pourrait faire l'objet d'un développement futur afin de confirmer les hypothèses étudiées et d'affiner les détails de conception.

Il faut aussi préciser que dans le déroulement de cette réflexion, certaines hypothèses ont été simplifiées et les paramètres du calcul ajustés (notamment sur le type de turbulence, et sur le calcul en régime instationnaire ou stationnaire, sur la résolution du calcul), avec pour objectif d'aller aux principes d'implantation, au comportement général de l'écoulement du vent sur le bâtiment dans un contexte spécifique.

Comme présenté dans l'avant-propos de ce document, ce travail vise l'obtention d'un doctorat en architecture et à proposer une réponse aux questions telles que : Qu'est qu'une thèse d'architecture ? Est-ce une discipline du domaine des sciences sociales, ou de l'ingénierie ? Une œuvre architecturale n'est-elle pas déjà un acte de recherche ?

Ce travail tente de générer et de partager des connaissances nouvelles sur l'art de construire, afin de repositionner le travail de l'architecte dans un contexte de crise environnemental et énergétique de l'acte architectural.

Deux directions d'ouverture de cette recherche peuvent être envisagés : la mise au point de dispositifs de production d'énergie hybrides (solaire/éolien) et l'impression numérique de pales d'éoliennes afin de pouvoir adapté l'éolienne au bâtiment et à la conception de l'enveloppe.

- Optimiser l'énergie produite par hybridation des typologies

Afin d'améliorer **le lissage de la production d'énergie,** des systèmes de production d'énergie renouvelables autres que éoliens pourraient être intégrés à ces dispositifs éoliens. Le mix énergétique[178] consommé par un bâtiment ou une zone urbaine pourrait voir **sa part d'énergies renouvelable fortement augmentée**. Un dispositif de captation d'énergie éolien avec un accélérateur aérofoil pourrait combiner la production énergétique solaire de type énergie photovoltaïque.

[177] Fabien BOUGLE, *Eoliennes : la face noire de la transition écologique*, *op. cit.*

[178] Le **mix énergétique**, ou bouquet **énergétique**, est la répartition des différentes sources d'énergies primaires consommées dans une zone géographique donnée. La part des énergies primaires dans la consommation mondiale, d'un pays, d'une collectivité, d'une industrie est généralement exprimée en pourcentages

Cet assemblage montre que le foil est un dispositif intéressant d'entraînement et d'augmentation du vent. Si les foils sont traditionnellement conçus comme des ailes portantes mobiles, nous l'imaginons ici comme un élément fixe, accélérateur de vent. Pourrions-nous aussi intégrer d'autres usages et fonctions à ce dispositif pour permettre dans des situations urbaines spécifiques d'enrichir la performance du dispositif, tels que :

- Un support pour l'intégration de panneaux photovoltaïques quand l'aile du foil est exposée et orientée côté sud.

- Un système de ventilation par extraction de d'air, ce dispositif utilise la géométrie de l'aile du foil comme accélérateur d'extraction d'air en utilisant l'effet Venturi.

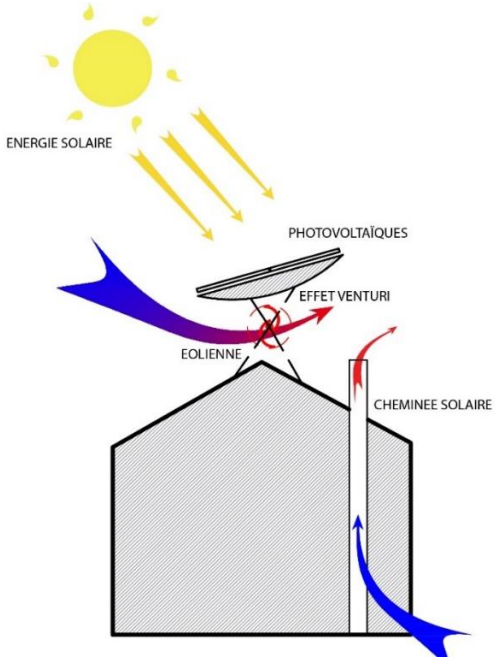


Figure 264. Schéma présentant la possibilité d'un fonctionnement hybride du foil à la fois capteur solaire et accélérateur éolien.

Figure 265. La Girafe de l'entreprise suédoise Innoventrum, un dispositif hybride de production d'énergie éolien et photovoltaïque créant aussi un carport

Cet assemblage de 2 systèmes offre une surface de guidage de l'air (aérofoil) comme une surface-support de capteur du rayonnement solaire. Si ce dispositif, en combinant des sources différentes de production d'énergie, fait l'objet de nombreuses études dont celle de Elhadidy et Shaahid pour la ville de Dhahran en Arabie Saoudite[179], il est cependant complexe de trouver la position et l'angle du foil optimale à la fois pour la course du soleil et la direction des vents.

- L'impression numérique 3D d'éoliennes

Avec le développement des technologies de fabrication numérique, et de l'impression 3D de grandes pièces permettent d'envisager d'ajuster précisément le dispositif énergétique à l'architecture et non l'inverse. Ceci est un changement de paradigme important de la situation

[179] M. A. ELHADIDY et S. M. SHAAHID, « Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia », *Renewable Energy*, 1 janvier 1999, vol. 16, nº 1, coll. « Renewable Energy Energy Efficiency, Policy and the Environment », pp. 970-976.

actuelle, où les éoliennes DEI sont détournées d'une conception pour un autre usage et adaptée à un usage en site urbain.

Les technologies impression 3D, qui ont subi une accélération récente de leur usage et notamment pendant la période de confinement du Covid-19 où un grand nombre de produits ont été fabriqués pour faire face aux problèmes d'accès et d'approvisionnement de certaines régions du monde.

Cette méthode pourrait avoir plusieurs formes, impression 3D après simulation numérique d'une éolienne verticale, dont le type, la longueur et le diamètre sont précisément dimensionnés en fonction d'une implantation, un vent, un assemblage ou une architecture.

L'impression peut permettre la fabrication d'un moule de fabrication de la pale renforcée (fibre de carbone, fibre de verre...), l'impression d'un pièce support de renfort de fibres et de résines, ou directement la pale finale de l'éolienne (impression de matériaux très résistants à l'usure tels que l'ABS, ou utilisant une optimisation formelle et structurelle en utilisant l'intelligence artificielle[180].

Pour réaliser les maquettes d'étude de cette recherche nous avons utilisé une technologie d'impression numérique différentes (SLA, Filaments, frittage, ABS, …), aujourd'hui les technologies permettent non pas simplement imprimer un prototypage ou moulage, mais véritablement d'imprimer une pièce finale pour l'utilisation des produits de bonne performance ou à fort durabilité tels que celles utilisées dans l'industrie automobile ou aérospatiale.

On peut citer l'exemple que du porte-avion Charles de Gaulle qui s'est doté en 2020 d'une imprimante 3D FDM, un équipement qui aide les marins à bord à créer toutes sortes de petites pièces du quotidien et de manière à pouvoir réparer immédiatement les pièces abîmées pendant la traversée. Ce dispositif permet d'éviter le transport de stock de pièces de rechange importantes, d'améliorer la rapidité de réparation des pièces et de limiter le poids des équipements nécessaires lors de long trajet.

Figure 266. Porte Avion Charles de Gaulle qui abrite un atelier d'impression 3D de pièces pour réparation/entretien

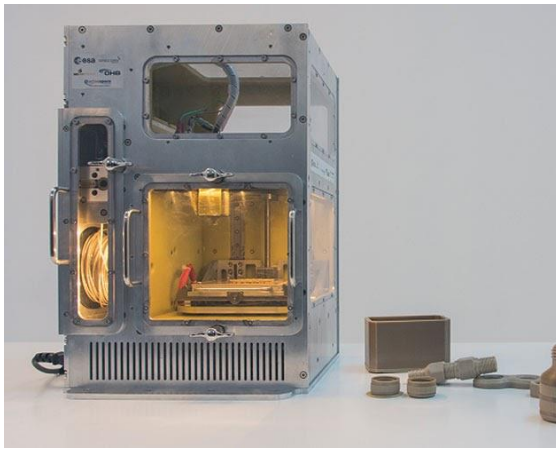


Figure 267. Imprimante 3D de ASE qui fonctionne en situation d'apesanteur.

[180] Tel le logiciel Autodesk fusion 360

L'Agence Spatiale Européenne (ASE) a aussi développé une imprimante 3D[181] capable de fonctionner en apesanteur, conçue par différents partenaires internationaux telles que SONACA et BEECREATIVE. Elle a été fabriquée pour imprimer des polymères techniques possédant des propriétés mécaniques et thermiques élevées permettant aux astronautes de concevoir toutes sortes de pièces directement dans l'espace. La Station Spatiale Internationale a travaillé en collaboration avec Made in Space[182] pour créer la première imprimante 3D capable de fonctionner en apesanteur.[183]

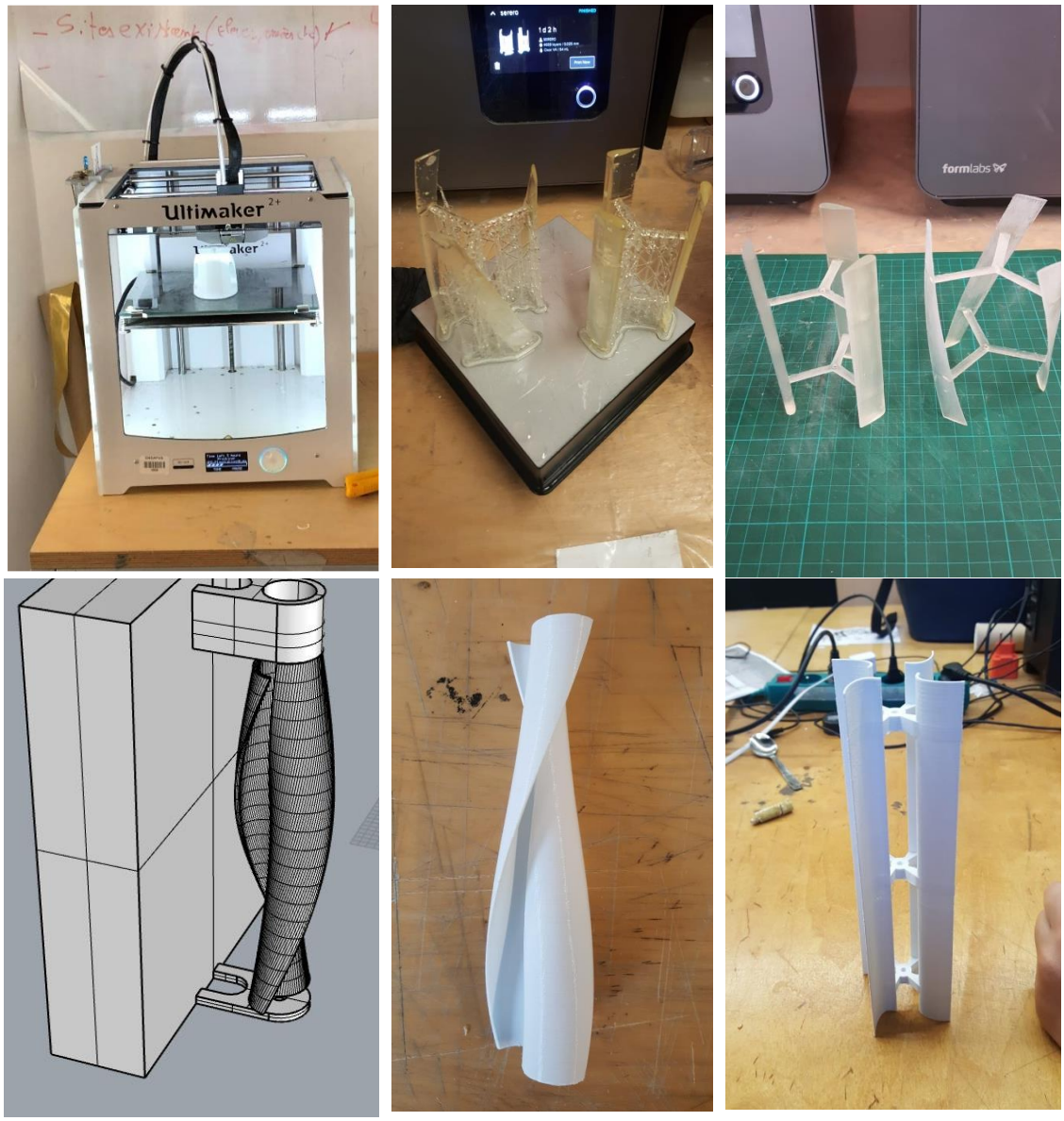


Figure 268. Impressions numériques pour la recherche (SLA, filament, frittage, ...)

Pourrions-nous imaginer que ces dispositifs éoliens soient imprimés et réparés grâce à l'impression 3D de pièces définitives ? Les dispositifs que nous proposons ont des diamètres inférieurs à 1,20m de large avec une longueur du dispositif allant de 1,20m à 3,60m de long. Ce

[181] Après avoir remporté un appel d'offre public lancé par l'ASE, le consortium d'entreprises – constitué du fabricant portugais BEECREATIVE, des allemands SONACA Space et OHB-Sytem, ainsi que d'Active Space Technologies – a lancé le projet MELT. Celui-ci avait pour objectif de développer et tester entièrement une imprimante 3D qui pourrait fonctionner à bord de l'ISS, la station spatiale internationale.

[182] *3D PRINTING IN SPACE*, https://beeverycreative.space/, consulté le 24 mai 2020.

[183] *Une nouvelle imprimante 3D à bord de la Station Spatiale Internationale?*, https://www.3dnatives.com/imprimante-3d-espace-23052018/, consulté le 24 mai 2020.

gabarit de turbine est adapté au volume de fabrication de ces imprimantes 3D, d'autre part les réparations de ces dispositifs peuvent être fait localement et de manière immédiate.

Cette technologie permet aussi d'améliorer ou de choisir les matériaux en fonction de la performance demandée, de la résistance du matériau, de la couleur du produit, où du temps d'impression. L'aérofoil ou l'accélérateur peut aussi faire l'objet une impression 3D. Cette technologie permet, lors du design des dispositifs, d'imaginer des foils à profil variable de manière à améliorer et contrôler la vitesse de l'air sur un point singulier.

ANNEXE 1 : ETUDE INITIALE DE LA RECHERCHE : FABRICATION D'UNE SOUFFLERIE EXPERIMENTALE ET ETALONNAGE DU MODELE NUMERIQUE DE LA SIMULATION

- Etalonnage des résultats de la simulation numérique sur une soufflerie physique expérimentale

Afin de vérifier et étalonner notre soufflerie virtuelle, nous avons comparé les résultats avec ceux d'une soufflerie analogique que nous avons réalisée dans notre agence à partir de panneaux de carton et aluminium rigide, des bandes adhésives, et un extracteur d'air et une machine à fumer. La puissance du ventilateur en extraction d'air ne permet pas une grande vitesse dans la veine d'air. Cependant elle permet de comparer point par point les résultats, ainsi que les proportions et les échelles de modification des vitesses par l'ajout d'obstacles de type bâtiments.

- Construction d'un prototype de soufflerie expérimentale (Agence Serero)

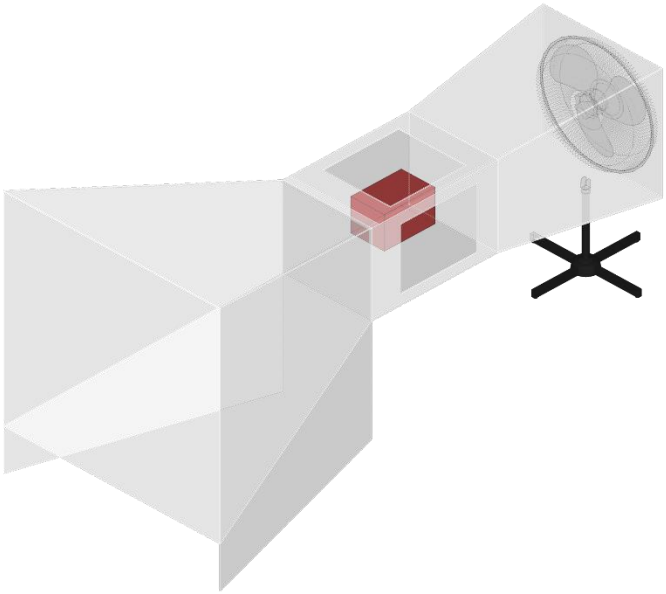


Figure 269. Simulation 3D du prototype de tunnel à vent expérimental

La taille de la chambre d'étude est 0.2m(L)*0.3m(W)*0.2m(H)

Figure 270. Prototype de tunnel à vent réalisé par D.Serero pour comparer l'échelle des phénomènes

Figure 271. Détail de notre maquette de bâtiment dans la veine d'air

Le prototype de soufflerie réalisée est un tunnel à vent à veine ouverte, dimensionné pour mettre en place nos maquettes d'étude dans la veine.

Dimensions chambre d'essai analogique

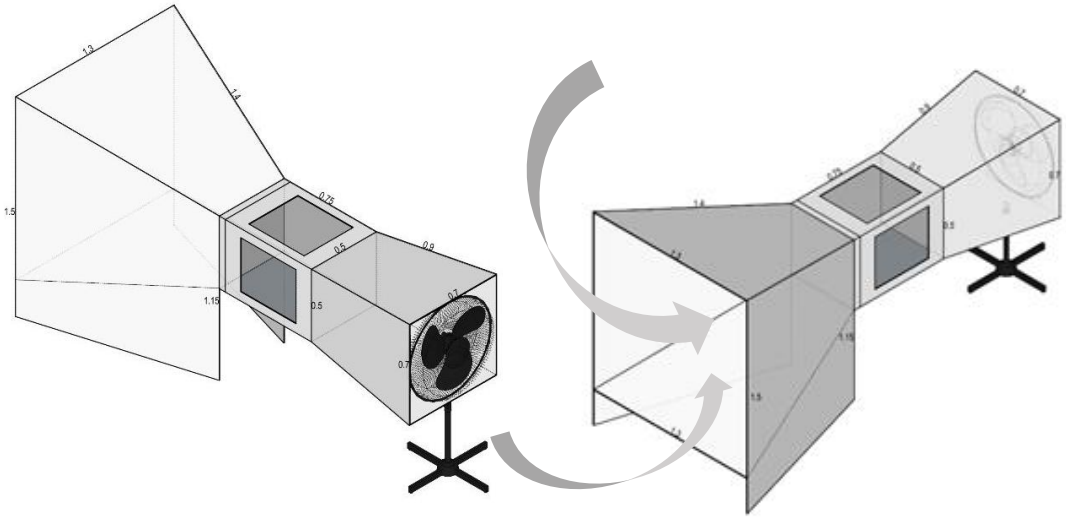


Figure 272. Schéma de fonctionnement du tunnel à vent analogique construit pour l'expérimentation

- *Calcul du coéfficient de similarité – Nombre de Reynolds*

Nous pouvons ici, afin de comparer les résultats vérifier le coefficient de similarité (le nombre de reynolds)

Pour rappel le nombre de Reynolds est un nombre sans grandeur qui permet de vérifier la similitude entre 2 expérimentations.

$$\boldsymbol{R_e} = \frac{VD_H}{v}$$

$\boldsymbol{R_e}$= (3.41*0.666)/ ($15.23*10^{-6}$) = **149,266** ⟶ régime turbulent

V (Vitesse du vent) = 3.41 m/s

D_H (diamètre hydraulique) = 4A/P = 0.666 m

A (surface de la section transversale) = 0.25 m^2

P (périmètre) = 1.5 m

v (viscosité de l'air 25˚c) = μ/p =$15.23*10^{-6}$

Dans le cas de surfaces plates, le point critique de l'écoulement laminaire est de 30000.

Pour réduire le nombre de Reynolds pour atteindre un écoulement laminaire, nous devons suivre les étapes ci-dessous :

1. Réduire la vitesse du vent à 1 m / s.

2. Réduire à 1/2 le diamètre hydraulique de la section d'essai. (Nouvelle DH = 0,333 m)

Après avoir changé les dimensions et la vitesse du vent, le nombre de Reynolds va être réduit à 21 864, ce qui présente un écoulement laminaire.

Ces modifications, appliquées à notre prototype de soufflerie, permettrait d'améliorer le coefficient de similarité du dispositif. Cependant la réduction d'un débit d'air à 1m/s n'est pas aisée à réaliser en mode expérimental et peut faire l'objet d'erreur au vu de sa faible vitesse.

- *Expérimentation 1 : Mesures à l'intérieur du tunnel à vent*

La vitesse du vent à l'intérieur de la veine d'air est mesurée avec un anémomètre de marque Voltcraft, basé en **(m/s)** avec une température variable de 23.5 **°c. à 24.5 °c**. La vitesse de l'air mesuré dans la veine d'air sont reportées sur les coupes suivantes et comparées à la maquette numérique.

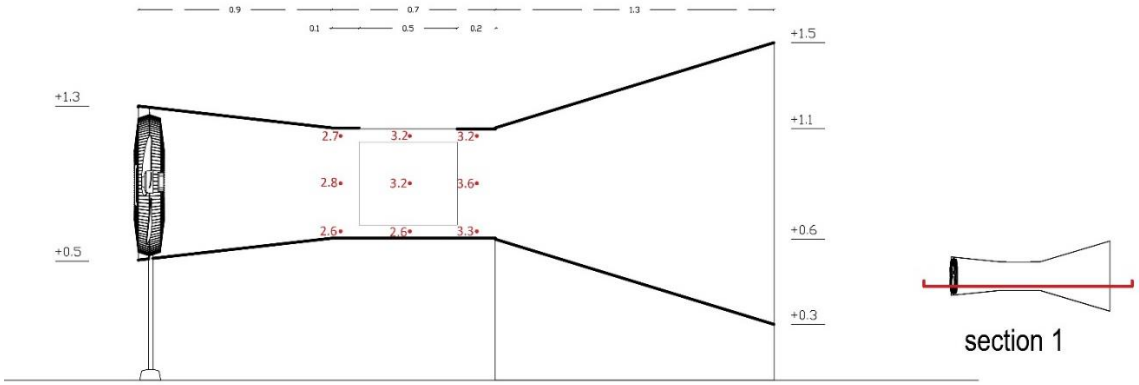


Figure 273. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA

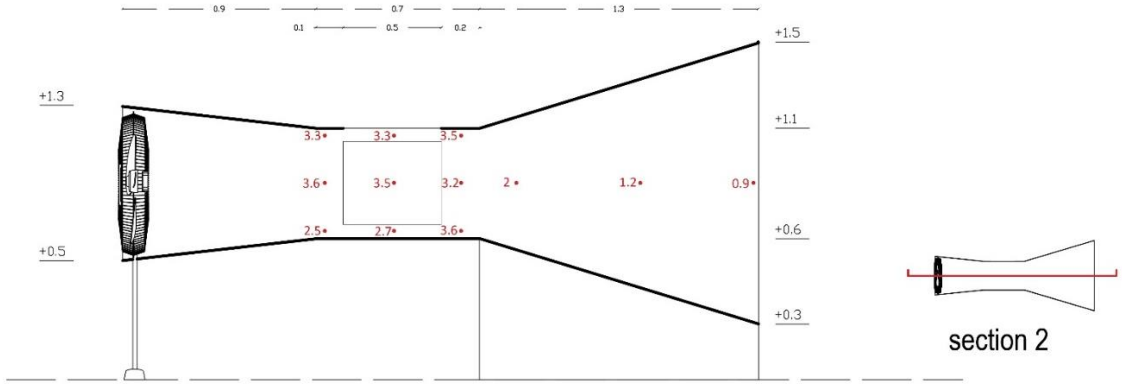


Figure 274. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA

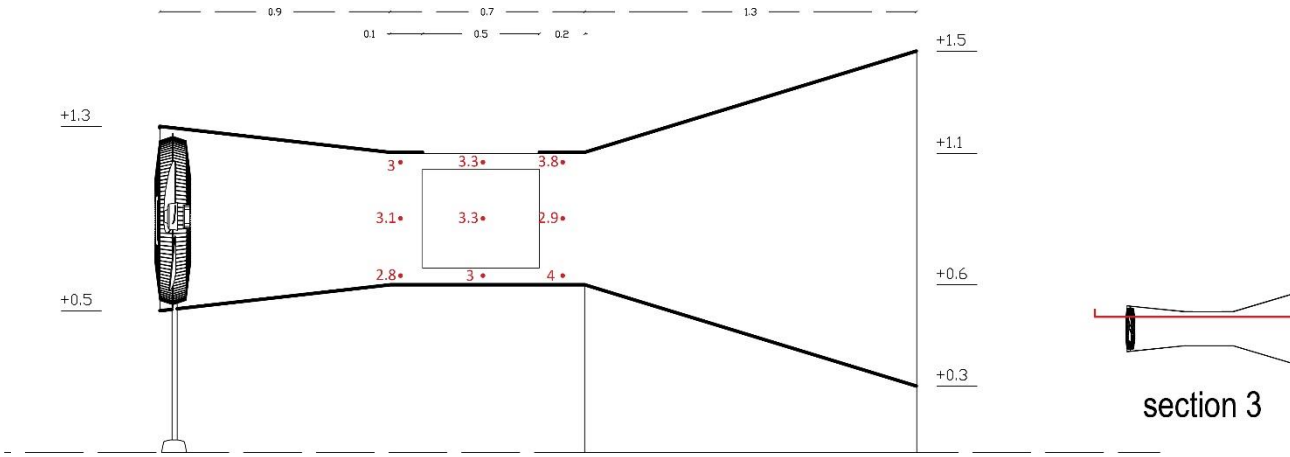


Figure 275. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA

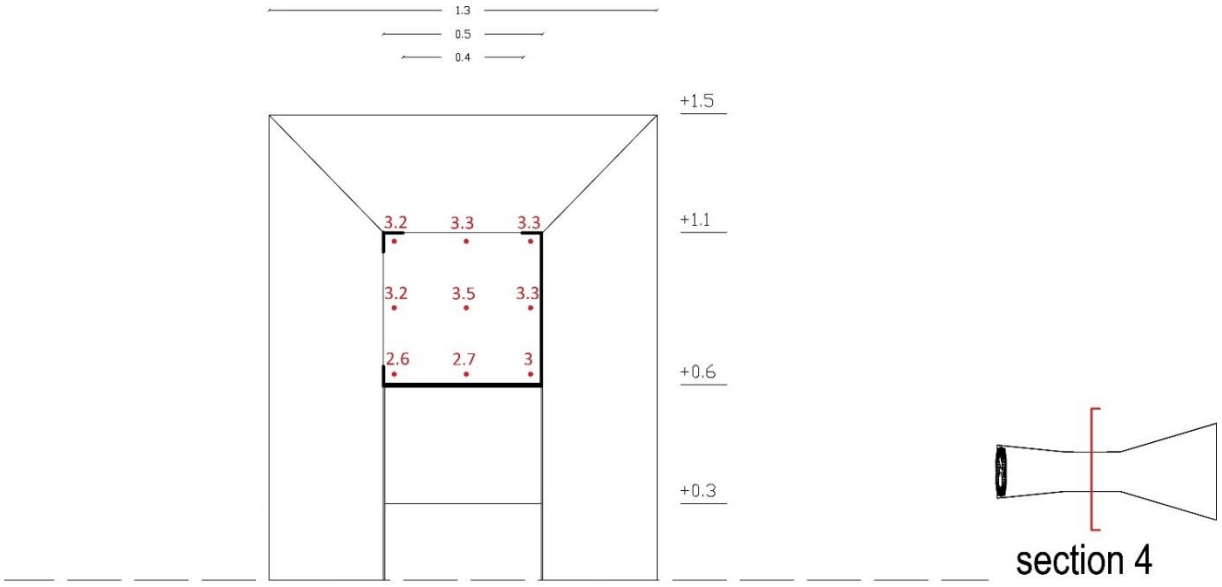


Figure 276. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA

- *Couche Limite*

La couche limite dans notre soufflerie expérimentale n'affecte pas les résultats de l'analyse du flux de vent dans la section d'air étudiée. Considérant la vitesse de l'air dans la soufflerie étudiée, il y a une couche limite de 2,5cm de toutes les surfaces de la section de la veine d'air dont la vitesse de l'air est variable entre 0 m/s sur la surface et 1.62 m/s sur les bords.

- *Expérimentation 2 : Modélisation du tunnel à vent et comparaison des couches limites*

La vitesse du vent à l'intérieur du modèle numérique du tunnel est comparée à celle mesurée dans le tunnel physique. Nous ajustons les conditions du calcul afin d'obtenir une couche limite de profil équivalent à celle mesurée sur la maquette physique dans des conditions similaires. Cette démarche permet un étalonnage du modèle numérique sur les paramètres de la maquette physique.

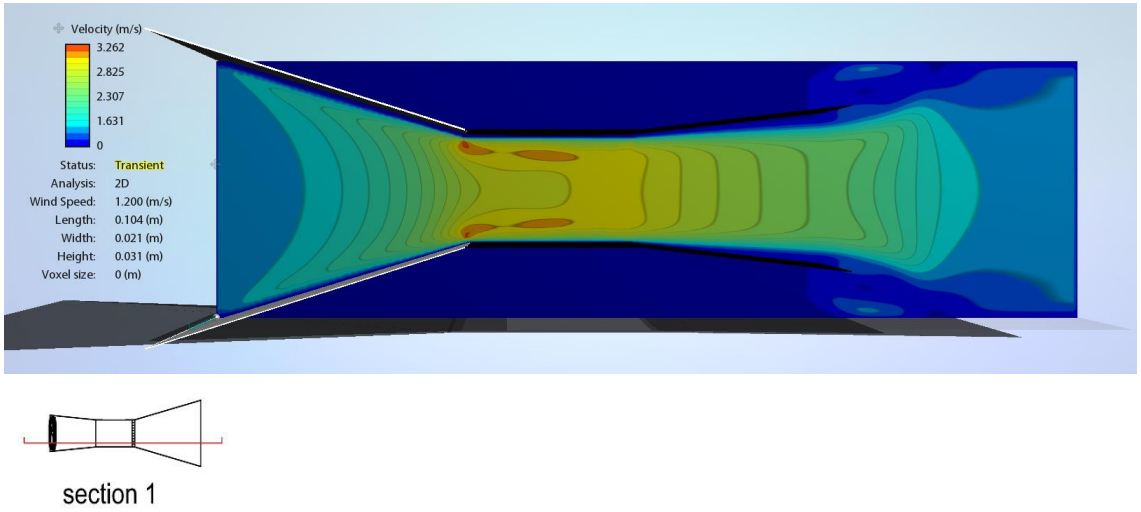


Figure 277. Simulation dynamique du modèle du tunnel physique d'étude

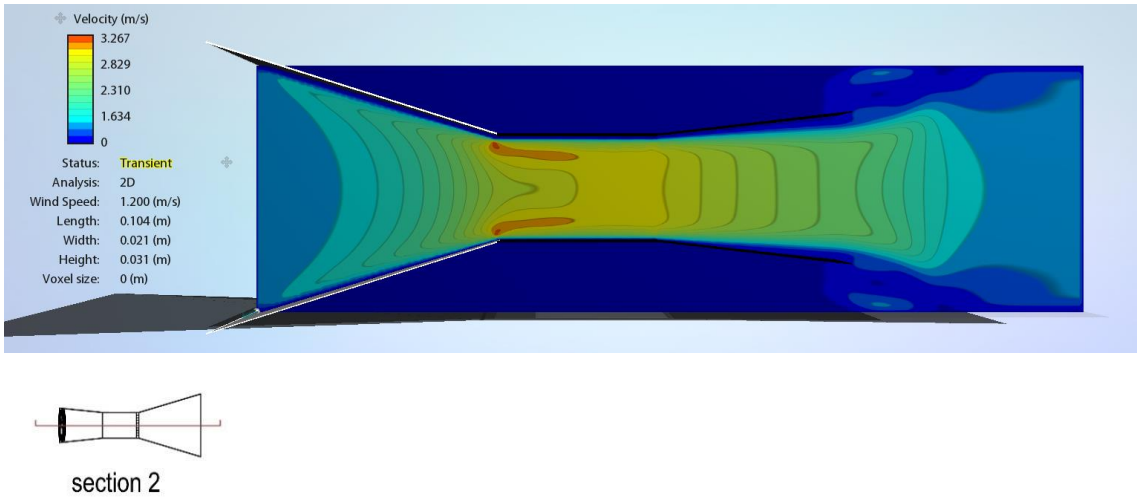


Figure 278. Simulation dynamique du modèle du tunnel physique d'étude

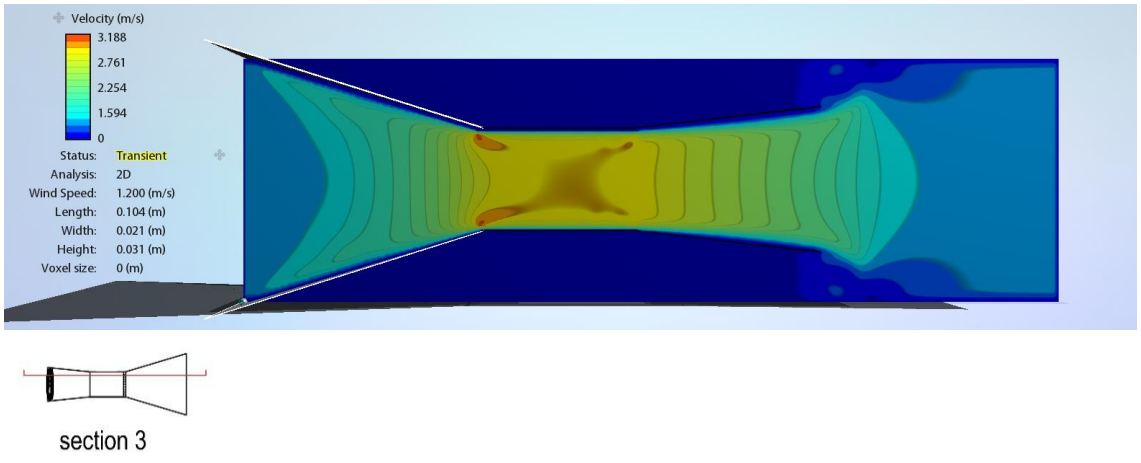


Figure 279. Simulation dynamique du modèle du tunnel physique d'étude

La vitesse vent dans la simulation du fluide est de 1,20m/s et est basée sur la vitesse d'air mesurée sur la soufflerie physique.

- *Expérimentation 3 : Modélisation d'un batiment de 4 étages avec aile en toiture et comparaison avec relevé en soufflerie numérique.*

Dans cette 4ème expérience, nous avons modélisé un bâtiment et une aile en toiture et avons comparé les résultats avec des mesures faites sur la maquette en soufflerie. La vitesse du vent à l'intérieur du modèle numérique du tunnel est comparée à celle mesurée dans le tunnel physique. Cette expérience est réalisée après étalonnage du modèle numérique.

Figure 280. Serero tunnel a vent location

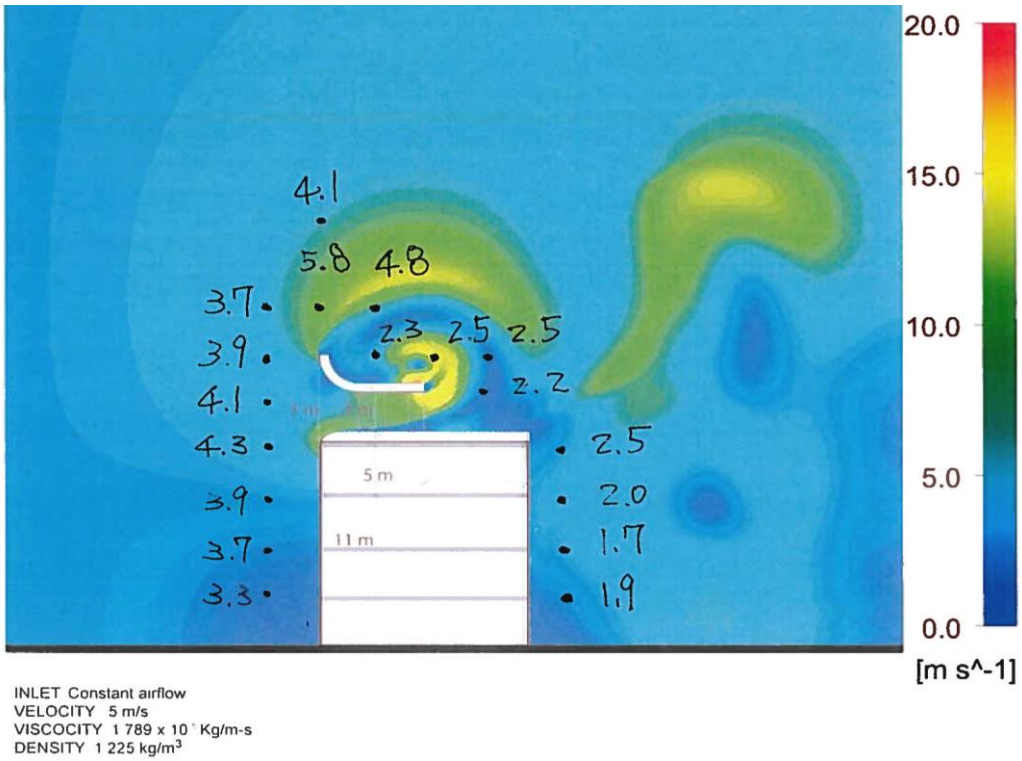


Figure 281. Comparaison avec une maquette étudiée dans la soufflerie analogique au laboratoire.

Les annotations à la main sur la simulation en coupe sont les points relevés dans l'expérimentation en soufflerie physique. La très forte cohérence entre les mesures dans un environnement physique et celle de l'environnement numérique (couleurs de magnitude) confirme que notre étalonnage et que nos conditions initiales au calcul sont cohérentes et très proches du comportement du phénomène physique.

ANNEXE 2 : FICHES TECHNIQUES DE DISPOSITIFS EOLIENS DE CAPTATION D'ENERGIE

• Eolienne moderne classique à 3 pales

- Axe horizontal
- Nombre de pales : 3

Exemples de machines : Enercon E66/2000, Gamesa G80/2000, Nordex N90/2300

Figure 282. Nordex N90/2300

Figure 283. Gamesa G80/2000

Figure 284.Enercon E66/2000

• Eolienne moderne classique à 2 pales

- Axe horizontal
- Nombre de pales : 2

Exemples de machines : Vergnet GEV MP 275, Vergnet GEV HP, Vergnet GEV 26/200

Figure 285. Vergnet GEV 26/200

Figure 286. , Vergnet GEV HP

Figure 287. Vergnet GEV MP 275

- Eolienne monopale

Axe horizontal
Nombre de pales : 1

Figure 288.Eolienne monopale

- Eolienne de pompage

- Axe horizontal
- Nombre de pales : ~ 20

Figure 289.Eolienne de pompage

- Eolienne de Savonius

- Axe vertical
- Nombre de pales : 2

Figure 290. Eolienne de Savonius

- Eolienne à rotor vertical

- Axe vertical
- Nombre de pales : 2-3

Exemples de machines : Ropatec Double Vertical, Ropatec Twister, Ropatec Bora Extreme

Figure 291. Ropatec Double Vertical

Figure 292. Ropatec Twister

Figure 293. Ropatec Bora Extreme

- EOLIENNE WINDSIDE

- Axe vertical
- Nombre de pales : 2

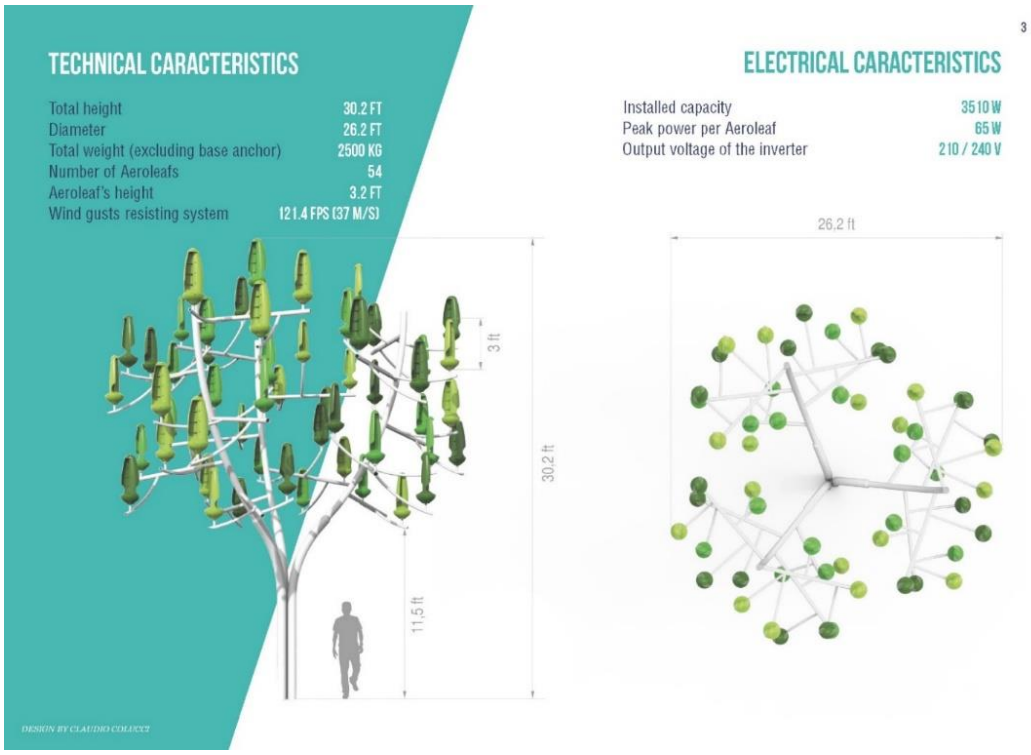
Exemples de machines : Windside WS-12, Windside WS-2B, Windside WS-0,15 C/B

Figure 294. Windside WS-12

Figure 295. Windside WS-2B

Figure 296. Windside WS-0,15 C/B

- NEW WIND INNOVATION



130, rue de Lourmel, 75015 Paris, France

Website:

http://www.newwind.fr/en/

Contact name: Marie de Jouëtte

Sales & Marketing, NewWind R&D
Tel: +33 (0)7 81 81 83 36 l

Email: mdejouette@newwind.fr

130, rue de Lourmel - 75015 Paris

Price: about 30 000 euros; each aero leaf costs 500 euros

Keys specs: Cut in: 2.5m/s; cut out: 37 m/s; rated speed (survival speed):

Dimensions: 90 cm height X 30 cm diameter?

Electrical generator: French

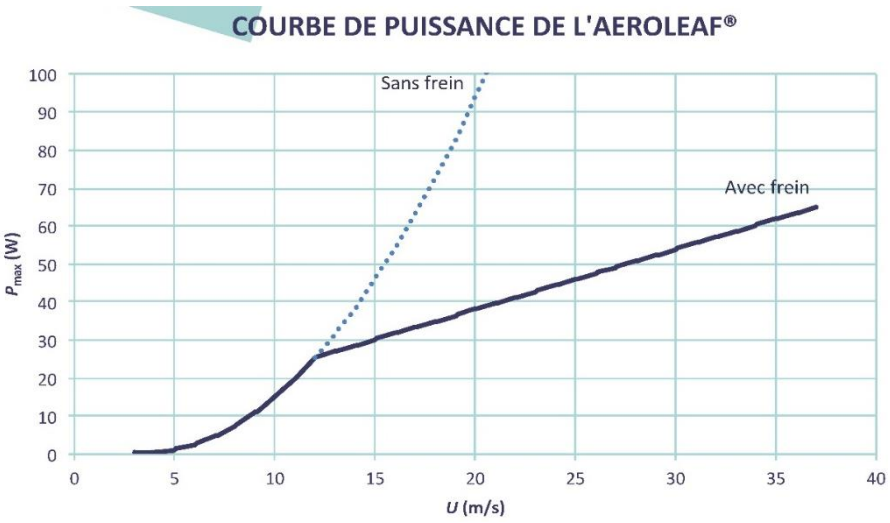
Types: direct drive, contains 2 generators

Height: 7.5 meters Diameter 6.5 meters;

Electrical Production: 65W/ aero leaf, 54 aero leaf per tree, 3,5KW (maximum wind speed)

Can be concentrated in wind farm of 1 every 5 meters

Advantage: Elegant and skinny, no noise < 50dB, no turbulence



- GUAL STATO EOLIEN

Jean-Claude PICCIO

au 0683532612

E-mail: anthony.gadet@wanadoo.fr

website: http://www.stato-windturbine.com

http://www.gual-statoeolien.com/

PS: Pour ne pas essuyer les déboires générés par l'utilisation des leds de puissance, je vous invite à consulter le site http://everlum.fr

RDV le 18/01/2017 à 16h00

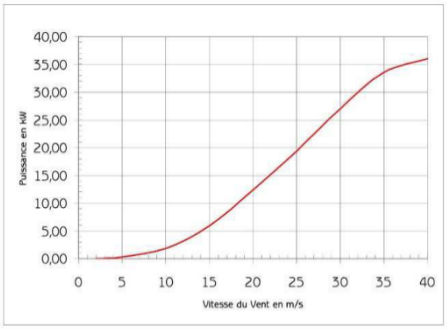
Keys specs:

STATOEOLIEN GSE 8

Caractéristiques techniques :

Diamètre / Hauteur :	8 m / 3 m
Vitesse de démarrage :	2 m/s (7,2 km/h)
Vitesse maximale :	60 m/s (216 km/h)
Puissance à 15 m/s (54 km/h) :	6 kW
Puissance à 25 m/s (72 km/h) :	19.3 kW
Puissance à 40 m/s (144 km/h) :	36 kW
Vitesse de rotation :	de 0 à 60 tours/min
Génératrice triphasée :	Asynchrone à cage d'écureuil
Régulation de Puissance :	Pilotage électronique direct du couple
Masse :	Environ 2 500 kg
Maintenance :	Inspection annuelle
Garantie :	3 ans

Courbe de puissance



Ces informations sont données à titre indicatif et ne peuvent en aucun cas engager la responsabilité de GUAL Ind
Ces informations peuvent être modifiées par GUAL Industrie sans préavis.

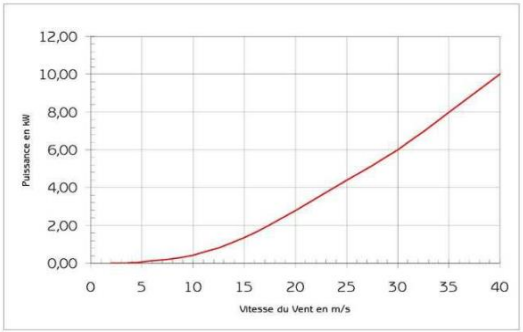
9

STATOEOLIEN GSE 4

Caractéristiques techniques :

Diamètre / Hauteur :	4m / 1,5 m
Vitesse de démarrage :	2 m/s (7 km/h)
Vitesse maximale :	60 m/s (216 km/h)
Puissance à 15 m/s (54 km/h) :	1,3 kW
Puissance à 25 m/s (90 km/h) :	4,4 kW
Puissance à 40 m/s (140 km/h) :	10 kW
Vitesse de rotation :	de 0 à 120 tours/min
Génératrice :	Synchrone à aimants permanents
Régulation de Puissance :	Pilotage électronique direct du couple
Masse :	Environ 800 kg
Maintenance :	Inspection annuelle
Garantie :	3 ans

Courbe de puissance



Ces informations sont données à titre indicatif et ne peuvent en aucun cas engager la responsabilité de GUAL Industr
Ces informations peuvent être modifiées par GUAL Industrie sans préavis.

8

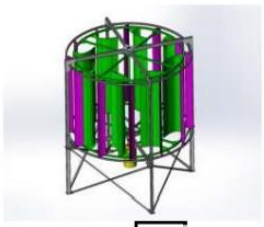
Avantage :

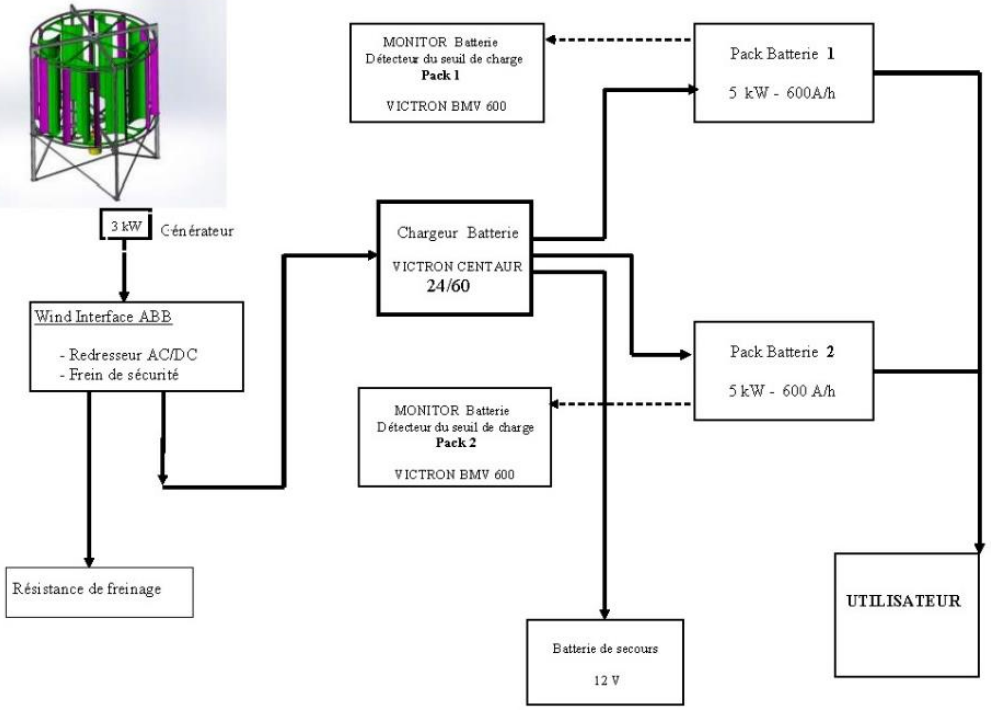
Ses caractéristiques et son esthétisme, permettent l'ouverture d'un nouveau marché pour les Energies Nouvelles Renouvelables (ENR) s'adressant au plus grand nombre, tant dans les zones urbaines que rurales, et correspondant à :

a) L'habitat individuel

b) L'habitat collectif

c) Les sites industriels, commerciaux et agricoles.





ANNEXE II -- 1/2 ***ECLAIRAGE PUBLIC, CONSOMMATION ACTUELLE*** ***PUBLIC LIGHTING, CURRENT CONSUMPTION***

DESIGNATION DES EQUIPEMENTS	*EQUIPMENT NAME*	***Puissance Wh***	***Equipements installés sur le port*** (Quantité)	***Durée d'allumage*** *(Heures)*	***Consommation annuelle en Kwh***
Etude réalisée en 2004-2010 par jcpiccioconsult@free.fr dans le cadre des économies d'énergies dans les ports de plaisance Français	*Study carried out in 2004-2010 by jcpiccioconsult@free.fr within the framework of energy savings in the French marinas*	*Power Wh*	*Equipments installed on the port (Quantity)*	*Duration of lighting (Hours)*	*Annual consumption in KWh*
Appliques 1 Boule	*Wall lamps 1 Ball*	150	20	4000 *	12000
Appliques 2 Boules	*Wall lamps 2 Balls*	300	2	4000	2400
Colonne "Sparkos"	*Column " Sparkos "*	150	37	1825 **	22200
Cheminement *Autour Capitainerie*	*Way around the port office*	50	19	4000	1734
Guirlande *sur le pourtour du port*	*Garland around the port*	10	4000	150 ***	6000
Lampadaires 2 Boules	*Lamp posts 2 Balls*	300	62	4000	74400
Lampadaires 1 Boule	*Lamp posts 1 Ball*	150	16	4000	9600
Lampadaires 1 Boule (en Applique)	*Lamp posts 1 Ball (in Wall lamp)*	150	2	4000	1200
Lampadaires 12 Mètres (*4 Projecteurs de 400W*)	*Lamp posts 12 meters (4 Projectors of 400Watts)*	1600	8	4000	51200
Appareil d'éclairage: *Ampoule 9/11 Watts*	*Lighting device : CFL 9/11 Watts*	9	300	4000	10800
Projecteurs (*Encastrés*)	*Fitted spotlights*	150	14	4000	8400
Projecteurs	*Projectors*	150	14	4000	8400
Projecteurs	*Projectors*	70	1	4000	280
* *Suivant préconisations Agence Française de l'Eclairage pour un temps d'éclairage moyen de* ***4000****H/an.* According to recommendations of the French Lighting Agency for a lighting 4000Hrs per year.			***Total Annuel en KW*** -Annual total in KW		208614
** *5 hrs per nuit x 365 jours soit 1825hrs* -5 hrs per night x 365 days = 1825 hrs					PRODUCTION of CO^2 in Kilogram 20861
*** *Allumage commandé par horloge soit 5 hrs nuit x 30 jours = 150Hrs* Ignition commanded(ordered) by clock is 5 hrs nuit x 30days=150Hrs			***Total Annuel en MW***- Annual total in MW		209
GUIRLANDES :4000 ampoules à 10W/H chacune x temps d'éclairage = 15nuits l'été, 15 nuits l'hiver selon les préconisations de l'AFE:4000/365x30=328 heures GARLANDS 4000 bulbs in 10W/each x Duration of lighting = 15 nights in summer, at 15 nights in winter according to the recommendations of l'AFE:4000 / 365x30 = 328 hours					

- WINDSPIRE

Website:

http://bwegroupusa.wix.com/bwe-group#!vstc0=power-module

http://bwegroupusa.wixsite.com/urban-wind

http://bwegroupusa.wixsite.com/wind-farms

http://bwegroupusa.wixsite.com/windspire-eco

Contact name:

Beach Wind Energy - Windspire

Richard Kline, designer and fabricator

1-803-347-5566
Price: about 6000 dollars

Email: beachwindenergy@aol.com

Keys specs: up to 20 KW per wind spire

Dimensions: 5 meters per 1.2 diameter

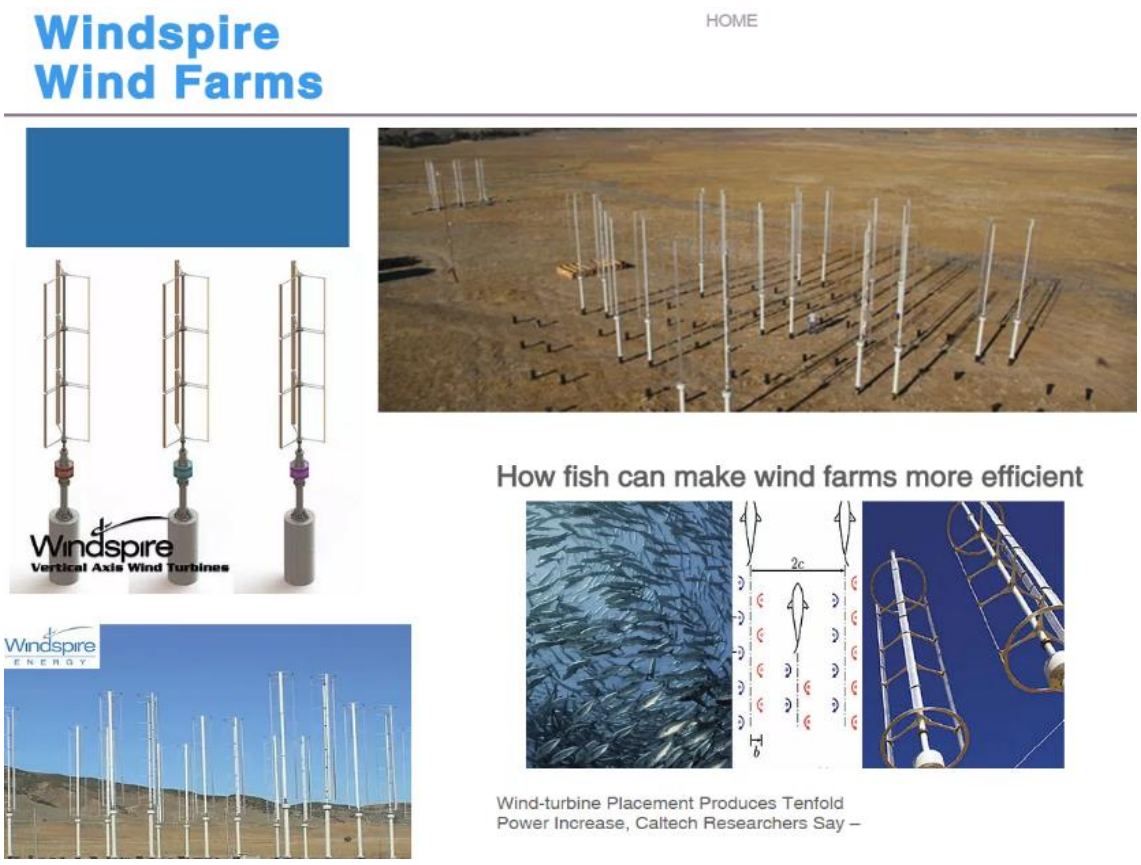
Electrical generator? German, Swiss, Chinese

Can be concentrated in wind farm of 1 every 5 meters

Advantage: Elegant and skinny, no noise < 50dB, no turbulences

Disadvantage: very high,

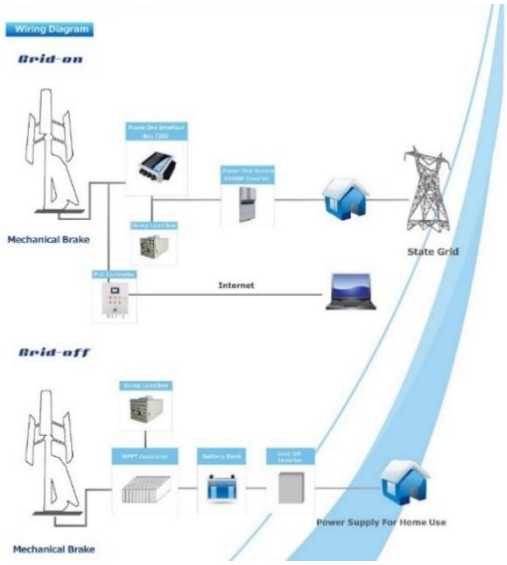
Note: Kline can fabricated any product we need vertical from the USA



- AEOLOS wind turbine

Website: http://www.windturbinestar.com
Contact name: Susan Yin
Lotus Energy Technology Co., Ltd.
No.16, Shandong Road, Qingdao, CHINA
Tel.: +86 532 8090 3375
E-mail: susan@windturbinestar.com
Price:
5kw(grid-on): 17,750 $
5kw(grid-off): 16,910 $
The prices are to be understood EXW, including packing. Shipment and installation are excluded.
Quantity discount:
1--2 units of Aeolos-V 5-10kW turbines (whole system) net
3--5 units of Aeolos-V 5-10kW turbines (whole system) 5%
More than five sets, the special discount can be considered further.
Validity:
The quotation is valid until 31st January, 2017.
Delivery time:
Production time: for 5-10kW, 20 working days after receipt of order,
Delivery time: By shipment, depends on different port with different distance.
Payment method:
With T/T – 30% down payment at order confirmation; With T/T – 70% before shipment.

Keys specs:

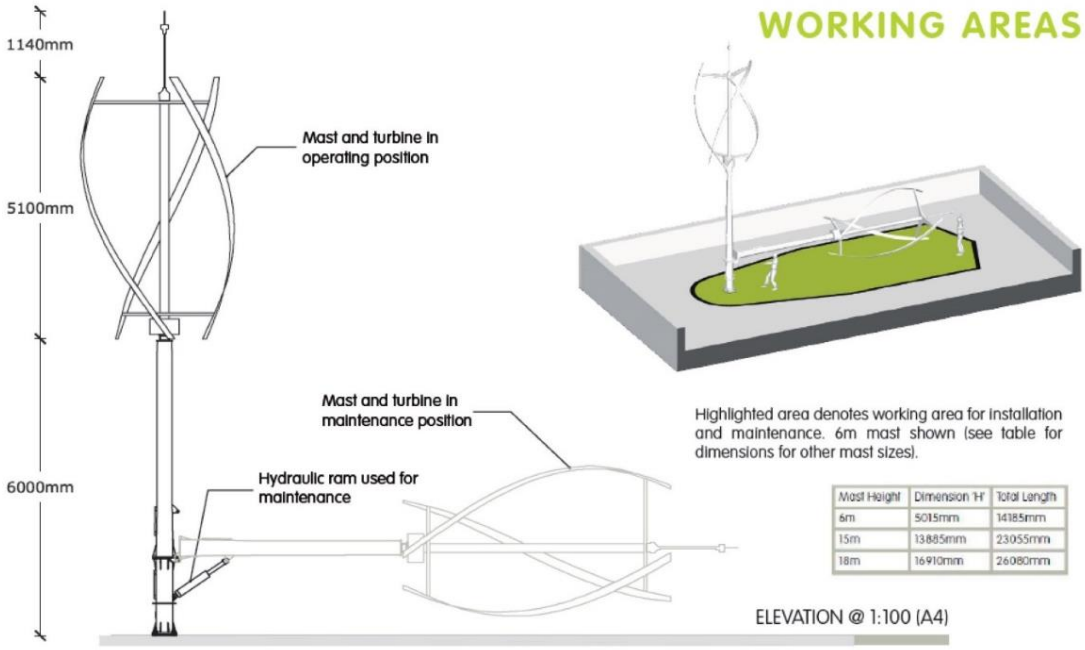


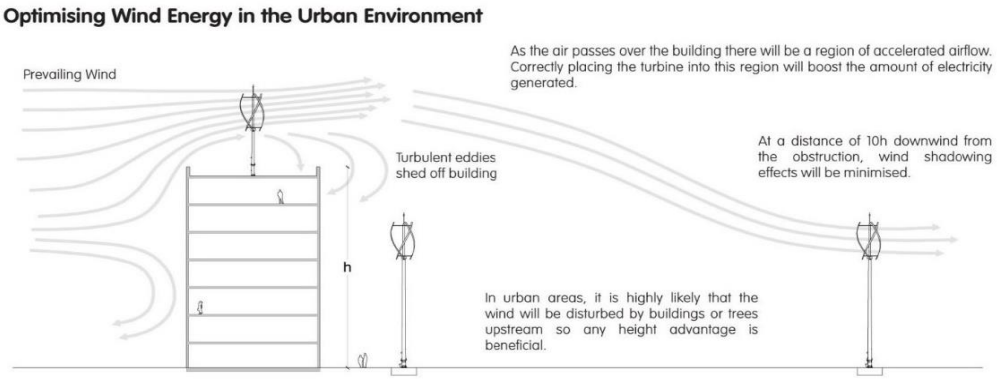
- QUIET REVOLUTION

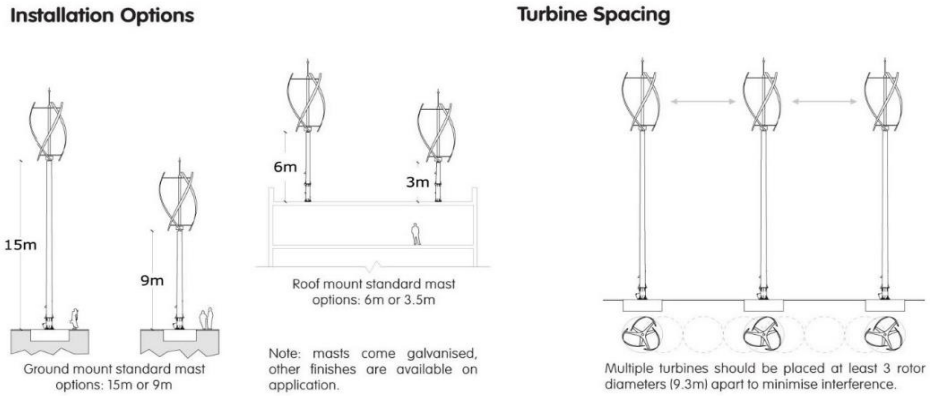
Website: www.vwtpower.com
Contact name: Tracey Newland, Business Development Manager
11 Edison Road
St.Ives
Cambridgeshire
PE27 3LF
United Kingdom

TEL: +44 (0) 1480 277360
Mobile: +44(0) 7831 197492
Email: tracey.newland@vwtpower.com
Price: 35,000 pounds + installation, foundation work and etc.

Keys specs:







- FORTIS WIND ENERGY

Website: www.fortiswindenergy.com

E-mail: jahn@fortiswindenergy.com

Skype ID: Eric.Jahn

Contact name: Eric F.W. JAHN
Business Development Director (CCO)

Keys specs:

Mobile: +31 614 424 930

TECHNICAL SPECIFICATIONS

Model:	**Passaat**	**Montana**	**Montana-Q**	**Alizé**
Type	Upwind rotor with fixed pitch			
Maximum power[1]	1.4 kW	5.0 kW	6.0 kW	10 kW
Rated wind speed	16 m/sec	14 m/sec	14m/sec	13 m/sec
Cut-in wind speed	2.5 m/sec	2.5 m/sec	2.5 m/sec	3 m/sec
Output@11m/sec	0.9 kW	3.4 kW	4.45 kW	8.5 kW
Rotor diameter	3.12 m	5.0 m	5.25 m	6.3 / 6.6 / 6.9 m
Number of blades	3	3	3	3
Swept area	7.64 m²	19.63 m²	21.63m²	31.2 m² / 34.2m² / 37.4m²
Blade material	Fibreglass-reinforced epoxy			
Yaw control	Passive aligned by tail vane			
Speed regulation	Ecliptic safety system by inclined hinged vane, 90 degree setting of tail. Short circuit of generator			
RPM operation range	180 - 775	120 - 450	120 - 450	75 - 300
Generator Type	Permanent Ne-Fe-Br magnets producing 3 phase AC			
Battery regulator	Available for 24VDC / 48VDC	Available for 48VDC	Available for 48VDC	On request
Grid feed inverter	1P-230VAC+N+PE	1P-230VAC+N+PE 3P-230VAC+N+PE 3P-400VAC+N+PE	3P-230VAC+N+PE 3P-400VAC+N+PE	3P-230VAC+N+PE
Guyed tower	12-18 m	12-24 m	12-24 m	18-30 m
Free standing tower	12-18 m	12-24 m	12-24 m	12-24 m
Head weight	75 kg	200 kg	210 kg	385 kg
Unique features	• Conforms to IEC 61400-2 international standard • Upwind, direct drive, fixed pitch, overvoltage protection and emergency braking • Maintenance free, 5 year warranty, installation by Fortis Certified System Partner • Average lifetime for Fortis Wind Turbines is over 20 years • Made in The Netherlands			

[1] maximum power output @ rated wind speed

- KINGSPAN ENVIRONMENTAL

Website: www.kingspanwind.com
Contact name:

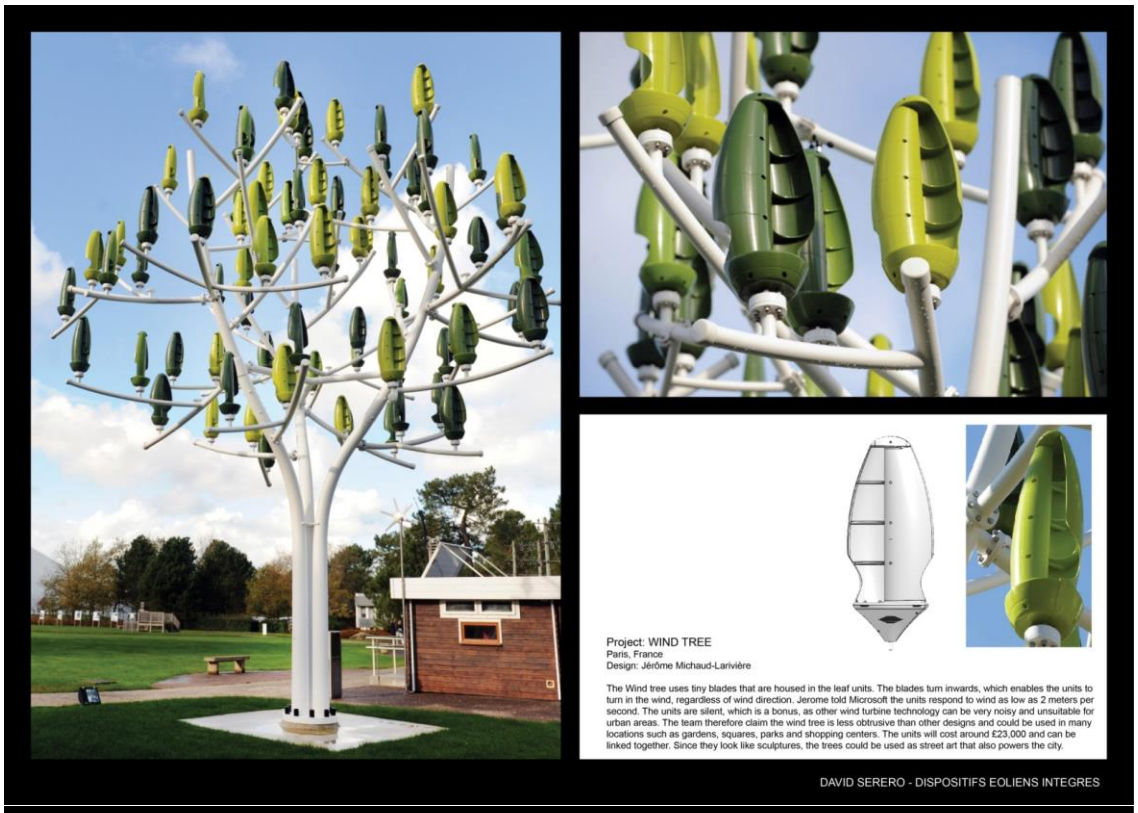
Blair Caldow

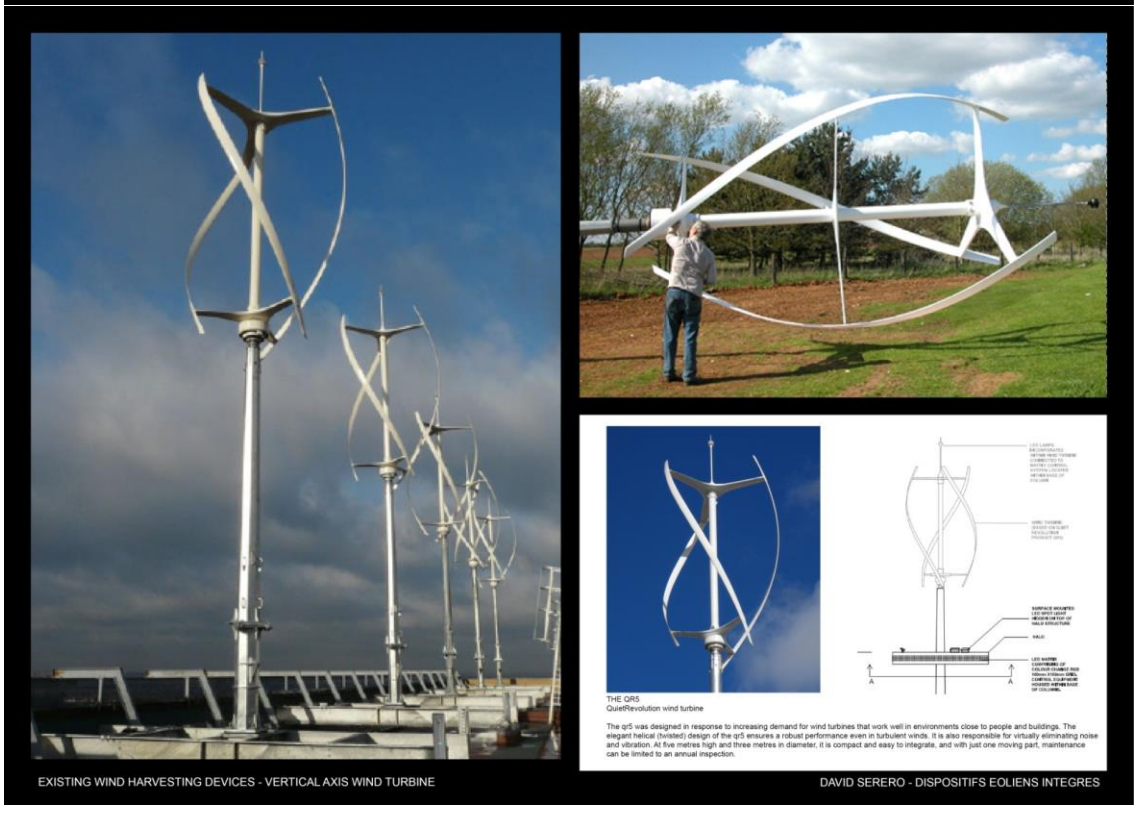
Wind Sales Representative

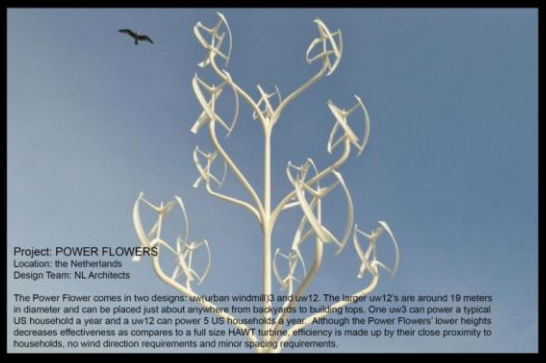
TEL: +44 1560 486 570
Mobile: +44 7990 080 916
Email: blair.caldow@kingspan.com

Keys specs

ANNEXE 3 : DISPOSITIFS EOLIENS EXISTANTS INTEGRES AUX BATIMENTS





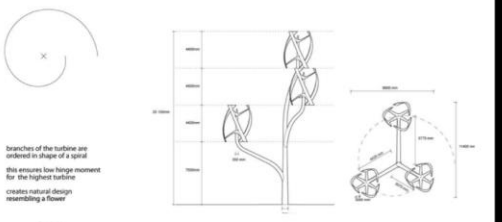


Project: POWER FLOWERS
Location: the Netherlands
Design Team: NL Architects

The Power Flower comes in two designs: uw(urban windmill)3 and uw12. The larger uw12's are around 19 meters in diameter and can be placed just about anywhere from backyards to building tops. One uw3 can power a typical US household a year and a uw12 can power 5 US households a year. Although the Power Flowers' lower heights decreases effectiveness as compares to a full size HAWT turbine, efficiency is made up by their close proximity to households, no wind direction requirements and minor spacing requirements.

uw3

type of windturbines used: **URBAN GREEN ENERGY 4kW**
number of turbines: **3**
rated power: **12 kw**
annual power at average wind speed 5 m/s: **13 680 kWh**
generated noise at 12 m/s: **42.8 dB**
blade materials: **carbon fibre and fibreglass**
tower material: **steel hollow profile**



branches of the turbine are ordered in shape of a spiral

this ensures low hinge moment for the highest turbine

creates natural design resembling a flower

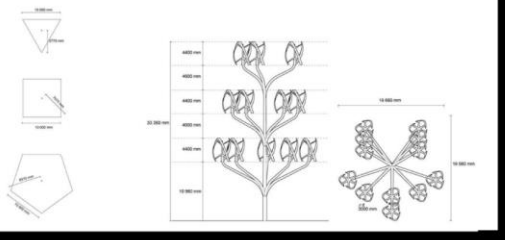
uw12

generates even more power than uw 3

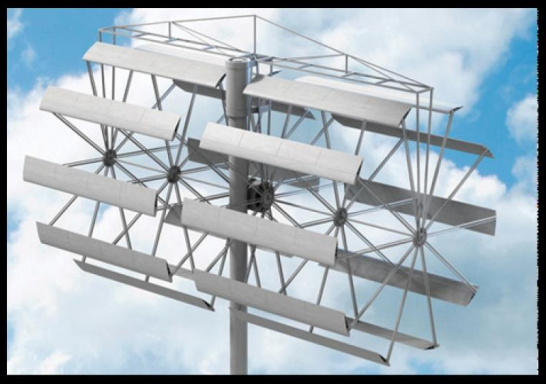
the shape of branches of the windmill are inspired by simple geometrical shapes: pentagon, square, triangle

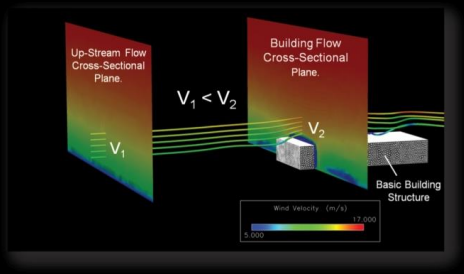
horizontal distance between each turbine on the branch has to be at least 10 meters

type of windturbines used: **URBAN GREEN ENERGY 4kW**
number of turbines: **12**
rated power: **48 kW**
annual power at average wind speed 5 m/s: **55 000 kWh**
generated noise at 12 m/s: **48,8 dB**
blade materials: **carbon fibre and fibreglass**

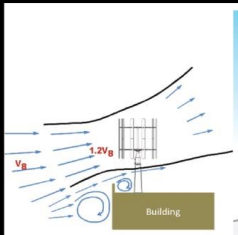


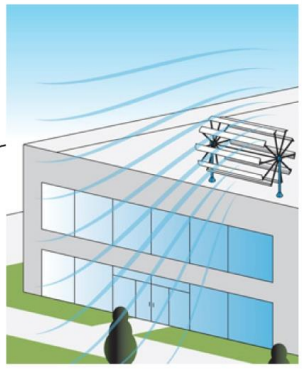
DAVID SERERO - DISPOSITIFS EOLIENS INTEGRES

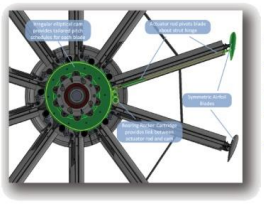


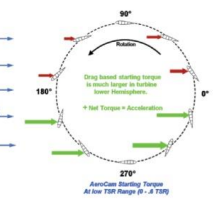


Compared to a conventional three-blade turbine, the AeroCam has more wing area working to produce power, but in a significantly smaller package. This effectively generates more power from the same wind speed. The AeroCam's blades use the natural flow of air to create lift, effectively minimizing drag and optimizing mechanical efficiency. .









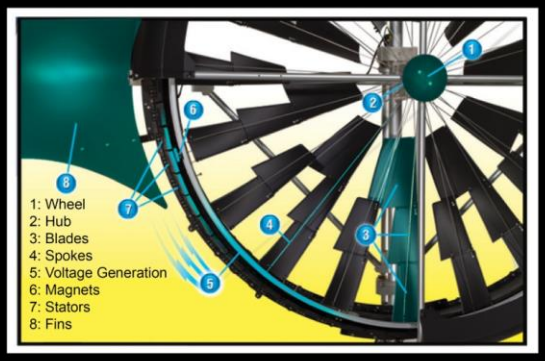
Project: AeroCam
Location: US
Design Team: Broadstar Wind Corporation

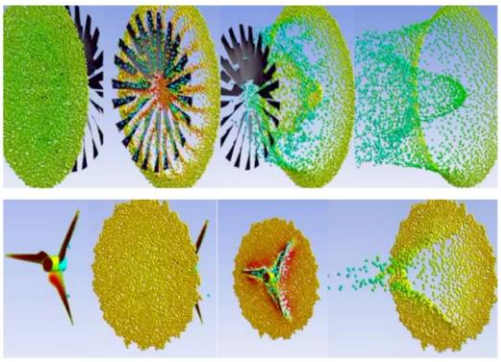
The AeroCam technology is the first truly viable renewable wind energy solution for the commercial environment. The proprietary AeroCam wind turbine technology can be mounted on rooftops or free-standing towers at commercial and industrial sites with moderate wind conditions. The modular wind energy system integrates multiple 11kW AeroCam wind turbines to accommodate site-specific energy needs.

EXISTING BUILDING INTEGRATED WIND HARVESTING DEVICES - AEROCAM

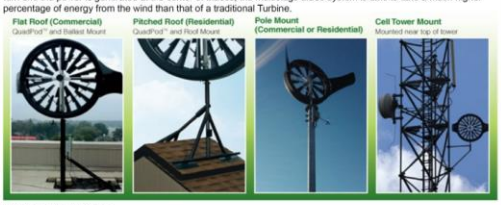
DAVID SERERO - DISPOSITIFS EOLIENS INTEGRES

Blade Tip Power Production the magnets, and copper stators on the tip of the blade are producing a 'flywheel' effect.





The TAM Turbine is producing the power at the tip of the blade where the speed and energy are up to 9-10 times greater than the center of the Turbine. The TAM turbine's magnets and stators are at the blade tip of the Turbine and are protected by a shroud or casing. Traditional Turbines are center gear shaft driven, which means that the blades turn and the power is generated at the center of blades, the multistage blade system is able to take a much higher percentage of energy from the wind than that of a traditional Turbine.

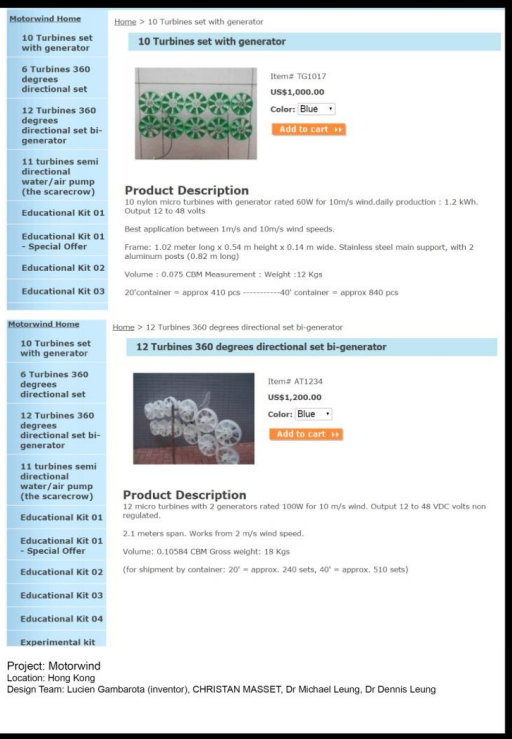


Project: TAM Turbine
Location: US
Design Team: TAM Energy

The TAM Wind Turbine produces clean renewable energy where the energy is used, at your home or commercial building. Its BTPS (Blade Tip Power System) unique design of multi-stage blades allows the system to react quickly to changes in wind speed. This ensures that the maximum wind energy is captured without the typical noise and vibration associated with traditional wind turbines.

DAVID SERERO - DISPOSITIFS EOLIENS INTEGRES

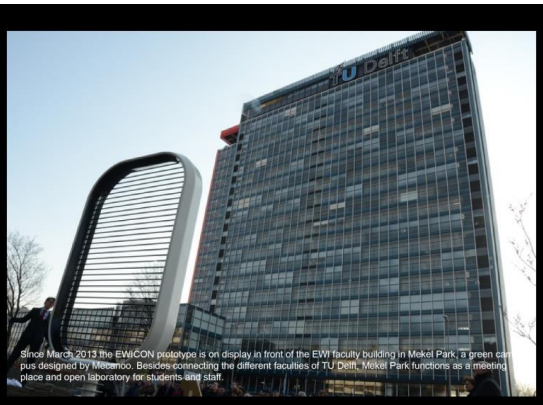
The first micro-turbine array set up in Hong Kong. It includes 40 turbines, which has daily production capacity of 960Wh with average wind speeds of 5.5 m/s. This installation was made in November, 2006, and is large enough to power all of the lights in the apartment below. If space is available, it is suggested to spread these turbines along a single row, instead of four rows. This is because the anchoring with the posts will be easier and more secure. The taller the display is, the stronger the posts and anchoring system needs to be.



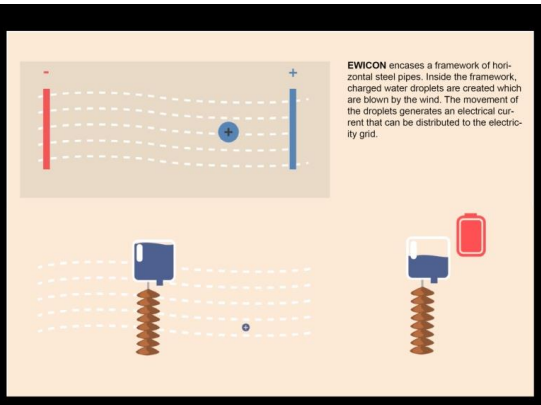
Project: Motorwind
Location: Hong Kong
Design Team: Lucien Gambarota (inventor), CHRISTAN MASSET, Dr Michael Leung, Dr Dennis Leung

EXISTING BUILDING INTEGRATED WIND HARVESTING DEVICES - MOTORWIND

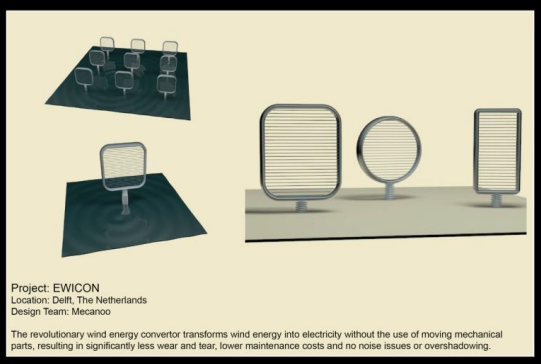
DAVID SERERO - DISPOSITIFS EOLIENS INTEGRES



Since March 2013 the EWICON prototype is on display in front of the EWI faculty building in Mekel Park, a green campus designed by Mecanoo. Besides connecting the different faculties of TU Delft, Mekel Park functions as a meeting place and open laboratory for students and staff.



EWICON encases a framework of horizontal steel pipes. Inside the framework, charged water droplets are created which are blown by the wind. The movement of the droplets generates an electrical current that can be distributed to the electricity grid.

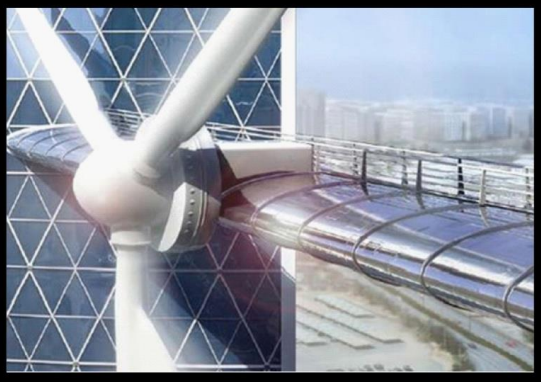


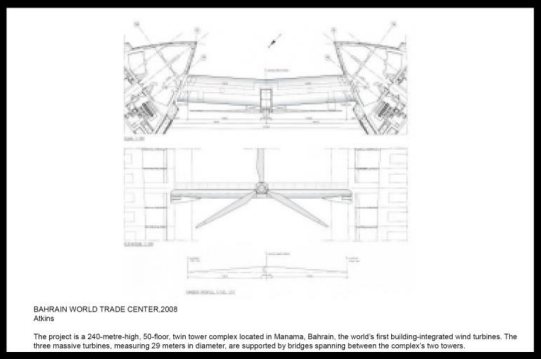
Project: EWICON
Location: Delft, The Netherlands
Design Team: Mecanoo

The revolutionary wind energy convertor transforms wind energy into electricity without the use of moving mechanical parts, resulting in significantly less wear and tear, lower maintenance costs and no noise issues or overshadowing.

EXISTING BUILDING INTEGRATED WIND HARVESTING DEVICES - EWICON

DAVID SERERO - DISPOSITIFS EOLIENS INTEGRES



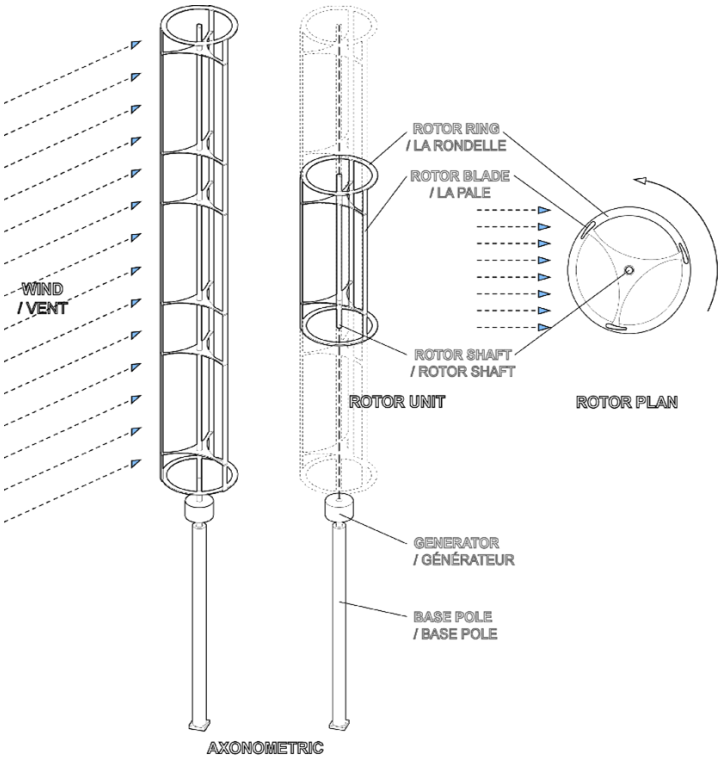


BAHRAIN WORLD TRADE CENTER,2008
Atkins

The project is a 240-metre-high, 50-floor, twin tower complex located in Manama, Bahrain, the world's first building-integrated wind turbines. The three massive turbines, measuring 29 meters in diameter, are supported by bridges spanning between the complex's two towers.

EXISTING BUILDING INTEGRATED WIND HARVESTING DEVICES - HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE

DAVID SERERO - DISPOSITIFS EOLIENS INTEGRES



San Francisco Public Utilities Commission

(SFPUC)

San Francisco, 2012

KMD/ Stevens+ Associates

Mariah Windspire turbines: five turbines

Swept area: 4.89 m2

Energy production: 227 Mwh/ year

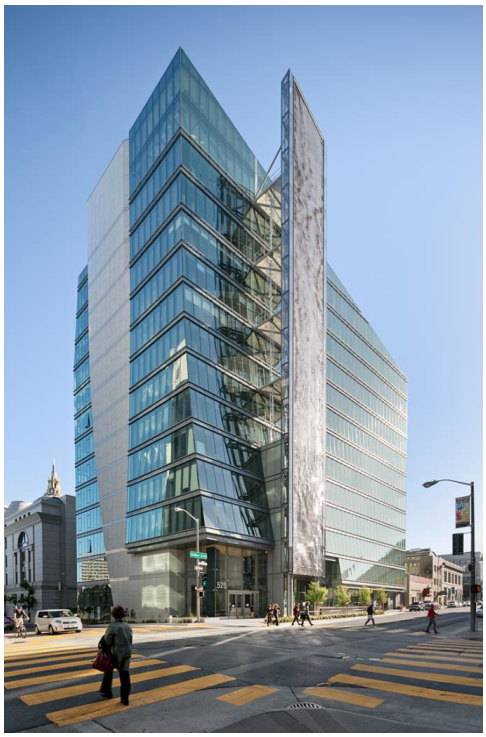
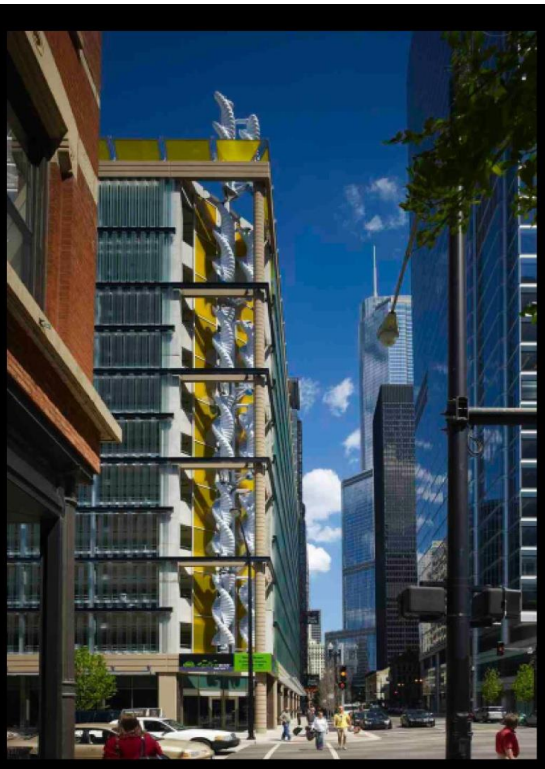
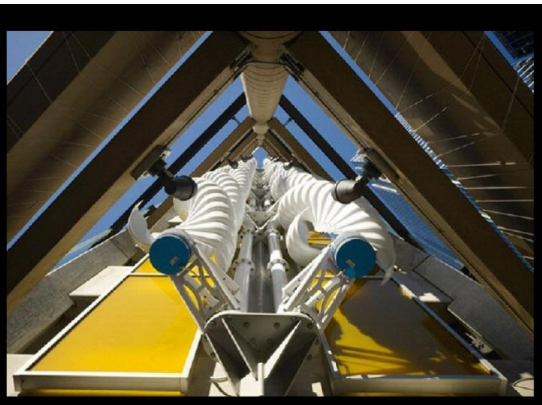
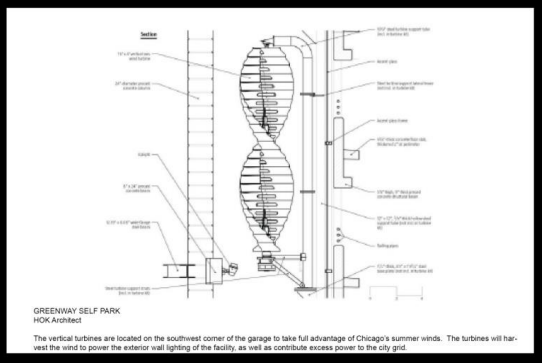


Figure 297. San Francisco Public Utilities Commission



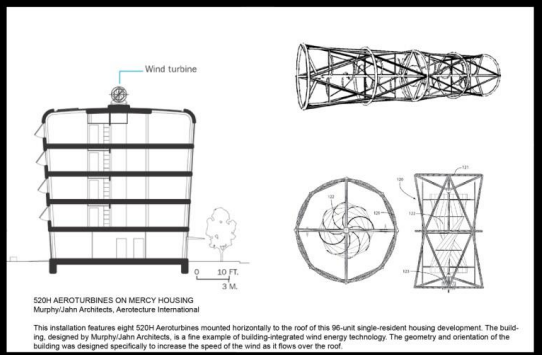




GREENWAY SELF PARK
HOK Architect

The vertical turbines are located on the southwest corner of the garage to take full advantage of Chicago's summer winds. The turbines will harvest the wind to power the exterior wall lighting of the facility, as well as contribute excess power to the city grid.

EXISTING BUILDING INTEGRATED WIND HARVESTING DEVICES - VERTICAL AXIS WIND TURBINE



520H AEROTURBINES ON MERCY HOUSING
Murphy/Jahn Architects, Aerotecture International

This installation features eight 520H Aeroturbines mounted horizontally to the roof of this 96-unit single-resident housing development. The building, designed by Murphy/Jahn Architects, is a fine example of building-integrated wind energy technology. The geometry and orientation of the building was designed specifically to increase the speed of the wind as it flows over the roof.

EXISTING BUILDING INTEGRATED WIND HARVESTING DEVICES - VERTICAL AXIS WIND TURBINE

DAVID SERERO - DISPOSITIFS EOLIENS INTEGRES

ANNEXE 4 : EXEMPLE D'ETUDE EOLIENNE A PARTIR D'UN OUTIL DE DESIGN GENERATIF (FUSION 360)

Fusion 360 est un outil complet de CAO (conception assistée par ordinateur) paramétrique développé par Autodesk. Cet outil est destiné à dessiner et concevoir des pièces 3D aussi bien mécaniques que designs. Une solution CAM puissante est intégrée à l'outil pour piloter la CNC[184].

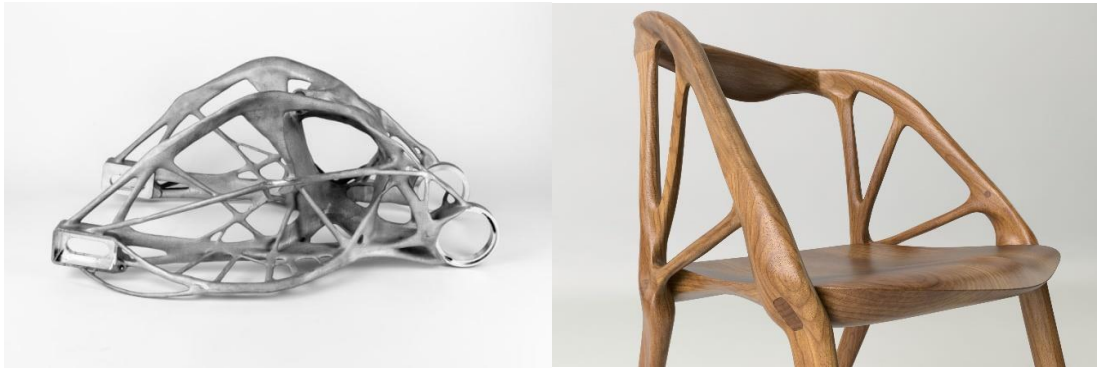


Figure 298. Exemple de travail génératif sur le châssis d'un véhicule et sur la structure d'une chaise

Figure 299. Impression 3D d'éoliennes avec turbines de générateur

[184] Jon McCormack, Alan Dorin et Troy Innocent, « Generative design: a paradigm for design research », p. 8 ; Sivam Krish, « A practical generative design method », *Computer-Aided Design*, 1 janvier 2011, vol. 43, n° 1, pp. 88-100.

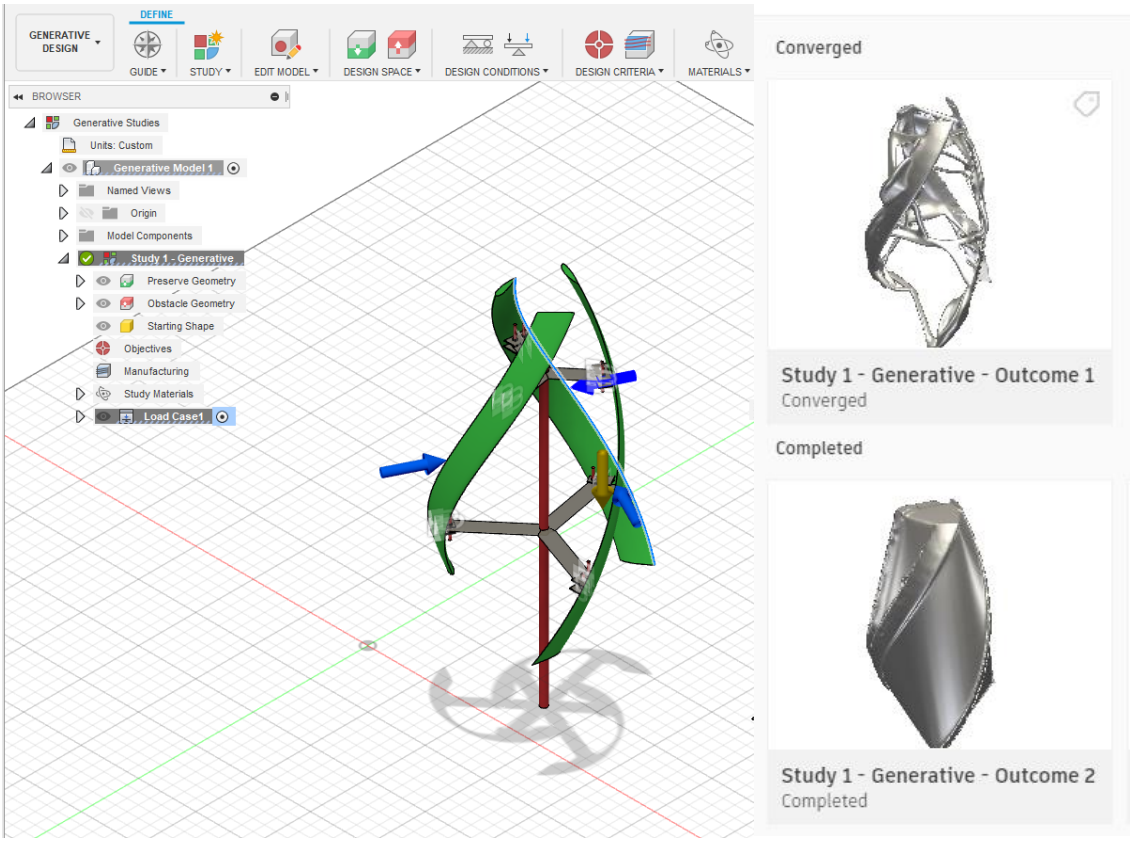


Figure 300. Etude générative du design d'une éolienne dans Fusion 360

Génération 1: à partir de 3 pâles

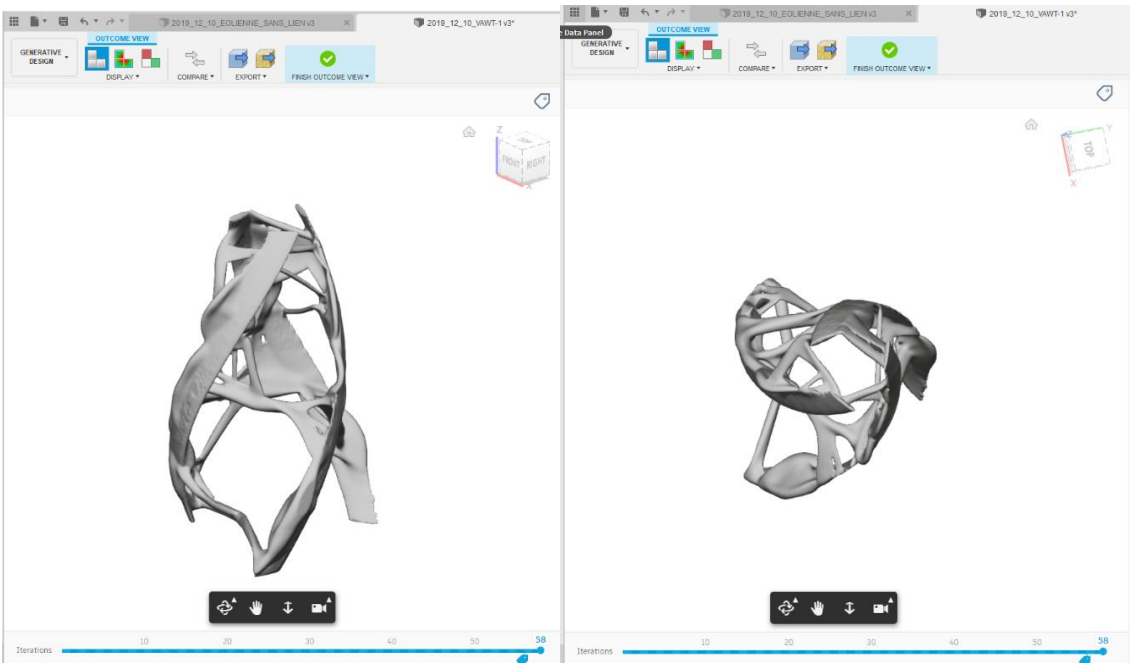


Figure 301. Etude générative du design d'une éolienne dans Fusion 360

Génération 2 : à partir de 3 pales en spirale

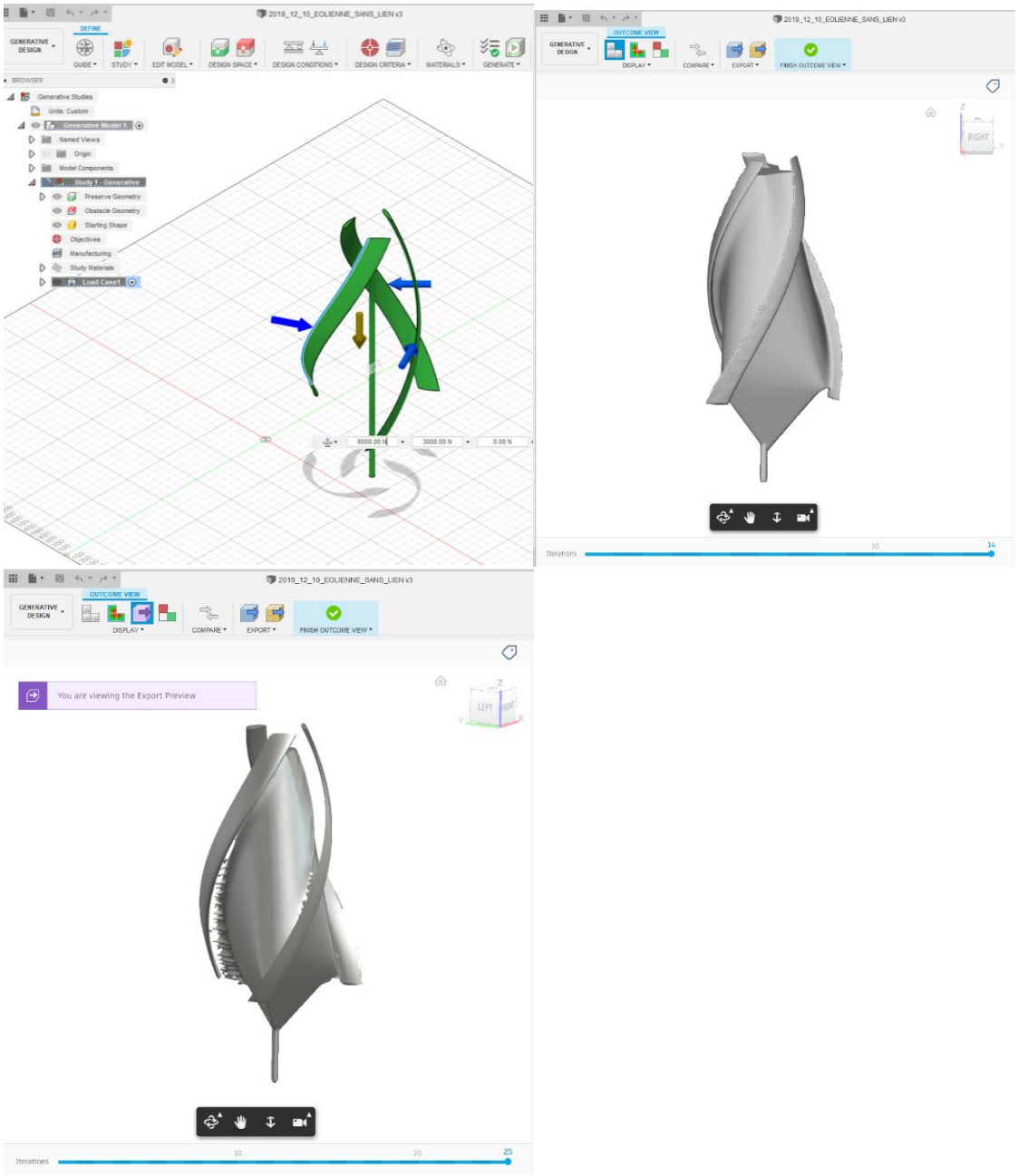


Figure 302. Etude générative du design d'une éolienne dans Fusion 360

ANNEXE 5 : UN RAPPORT DE CALCUL DE LA SIMULATION STARCCM+

1 SECTION ROOF SANS DEVICE		
+-1 Continua	Continua	2
| +-1 Parts Meshes	Regions	[Region]
| |	Interfaces	[]
| |	Tags	[]
| `-2 Physics 1	Regions	[Region]
| |	Interfaces	[]
| |	Point Sets	[]
| |	Active	true
| |	Tags	[]
| +-1 Models		
| | +- 1 Constant Density		
| | +-2 Coupled Flow	Integration	IMPLICIT
| | |	Positivity Rate Limit	0.2
| | |	Explicit Relaxation	1.0
| | |	Active Explicit Relaxation	1.0
| | |	Preconditioning Enabled	true
| | |	Unsteady Low-Mach Preconditioning	true
| | |	Unsteady Preconditioning Max Factor	0.95
| | |	Pressure Difference Scale Factor	2.0
| | |	Minimum Reference Velocity	1.0E-10 m/s
| | |	Maximum Reference Velocity	1000000.0 m/s
| | |	Flow Boundary Diffusion	true
| | |	Secondary Gradients	On
| | |	Coupled Inviscid Flux	Roe FDS
| | |	Discretization	2nd-order
| | +-3 Gas		
| | | `-1 Air	Database Material	Air (Air) [Standard/Gases]
| | | |	Tags	[]
| | | `- 1 Material Properties		
| | | +- 1 Density	Method	Constant
| | | | `- 1 Constant	Value	1.18415 kg/m^3
| | | `- 2 Dynamic Viscosity	Method	Constant
| | | `- 1 Constant	Value	1.85508E-5 Pa-s
| | +- 4 Gradients	Gradient Method	Hybrid Gauss-LSQ
| | |	Limiter Method	Venkatakrishnan
| | |	Custom Accuracy Level Selector	2.0
| | |	Verbose	false
| | |	Least-Squares Quality Criterion	true
| | |	Flat Cells Curvature Criterion	true
| | |	Cell Skewness Criterion	true
| | |	Chevron-Cell Criterion	true
| | |	Least-Squares Tensor Minimum Eigenvalues Ratio	0.1
| | |	Normalized Flat Cells Curvature Factor	1.0
| | |	Maximum Safe (Positive) Skewness Angle (deg)	75.0
| | |	Minimum Unsafe (Positive) Skewness Angle (deg)	88.0
| | |	Use TVB Gradient Limiting	false
| | |	Acceptable Field Variation (Factor)	0.05
| | +-5 Implicit Unsteady	Continuum Iteration	215000
| | |	Continuum Physical Time	21.500000000003293
| | +-6 K-Epsilon Turbulence		
| | +- 7 Realizable K-Epsilon Two-Layer	Buoyancy Production of Dissipation	Boundary Layer Orientation

| |	Cmu	0.09
| |	C1e	1.44
| |	C2e	1.9
| |	Ct	1.0
| |	Sigma_k	1.0
| |	Sigma_e	1.2
| |	Sarkar	2.0
| |	Tke Minimum	1.0E-10
| |	Tdr Minimum	1.0E-10
| |	Secondary Gradients	On
| |	Convection	2nd-order
| |	Normal Stress Term	false
| |	Curvature Correction Option	Off
| |	Two-Layer Type	Shear Driven (Wolfstein)
| |	Two-Layer ReY*	60.0
| |	Two-Layer Delta ReY	10.0
| +-8 Reynolds-Averaged Navier-Stokes		
| +-9 Turbulent		
| +-10 Two Dimensional		
| +-11 Two-Layer All y+ Wall Treatment	Iterative Ustar	false
| `-12 Wall Distance	Wall Distance Method	Implicit Tree
+-2 Reference Values		
| +-1 Minimum Allowable Wall Distance	Value	1.0E-6 m
| +-2 Maximum Allowable Absolute Pressure	Value	1.0E8 Pa
| +-3 Minimum Allowable Absolute Pressure	Value	1000.0 Pa
| `-4 Reference Pressure	Value	101325.0 Pa
`-3 Initial Conditions		
+-1 Pressure	Method	Constant
| `-1 Constant	Value	0.0 Pa
+-2 Turbulence Intensity	Method	Constant
| `-1 Constant	Value	0.01
+-3 Turbulence Specification	Method	Intensity + Viscosity Ratio
+-4 Turbulent Velocity Scale	Method	Constant
| `-1 Constant	Value	1.0 m/s
+-5 Turbulent Viscosity Ratio	Method	Constant
| `-1 Constant	Value	10.0
`-6 Velocity	Method	Constant
|	Coordinate System	Laboratory
`-1 Constant	Value	[0.0, 0.0] m/s
+-2 Regions	Part Selection Priority	[Region]

| |	Regions	1
| `-1 Region	Index	0
| |	Mesh Continuum	Parts Meshes
| |	Physics Continuum	Physics 1
| |	Parts	[Body 1]
| |	Type	Fluid Region
| |	Allow Per-Part Values	false
| |	Tags	[]
| +-1 Boundaries	Part Surface Selection Priority	[Region: Body 1.Batiment, Region: Body 1.Entree, Region: Body 1.Sol, Region: Body 1.Haut, Region: Body 1.Sortie]
| | |	Boundaries	5
| | +-1 Body 1.Batiment	Index	12
| | |	Interfaces	
| | |	Part Surfaces	[Body 1.Batiment]
| | |	Type	Wall
| | |	Allow Per-Surface Values	false
| | |	Tags	[]
| | +-1 Physics Conditions		
| | | +-1 Reference Frame Specification	Option	Region Reference Frame
| | | +-2 Shear Stress Specification	Method	No-Slip
| | | +-3 Tangential Velocity Specification	Method	Fixed
| | | `-4 Wall Surface Specification	Method	Smooth
| | `-2 Physics Values		
| | `-1 Blended Wall Function	E	9.0
| |	Kappa	0.42
| | +-2 Body 1.Entree	Index	13
| | |	Interfaces	
| | |	Part Surfaces	[Body 1.Entree]
| | |	Type	Velocity Inlet
| | |	Allow Per-Surface Values	false
| | |	Tags	[]
| | +-1 Physics Conditions		
| | | +-1 Reference Frame Specification	Option	Lab Frame
| | | +-2 Turbulence Specification	Method	Intensity + Viscosity Ratio
| | | `-3 Velocity Specification	Method	Components
| | `-2 Physics Values		
| | +-1 Turbulence Intensity	Method	Constant
| | | `-1 Constant	Value	0.01
| | +-2 Turbulent Viscosity Ratio	Method	Constant
| | | `-1 Constant	Value	10.0

| | | `- 3 Velocity	Method	Constant
| | | |	Coordinate System	Laboratory
| | | `- 1 Constant	Value	[5.0, 0.0] m/s
| | +-3 Body 1.Haut	Index	15
| | |	Interfaces	
| | |	Part Surfaces	[Body 1.Haut]
| | |	Type	Pressure Outlet
| | |	Allow Per-Surface Values	false
| | |	Tags	[]
| | +- 1 Physics Conditions		
| | | +- 1 Backflow Specification	Direction	Extrapolated
| | | |	Pressure	Environmental
| | | +- 2 Pressure Outlet Option	Option	None
| | | `- 3 Turbulence Specification	Method	Intensity + Viscosity Ratio
| | `-2 Physics Values		
| | +- 1 Pressure	Method	Constant
| | | `- 1 Constant	Value	0.0 Pa
| | +- 2 Turbulence Intensity	Method	Constant
| | | `- 1 Constant	Value	0.01
| | `- 3 Turbulent Viscosity Ratio	Method	Constant
| | `- 1 Constant	Value	10.0
| | +-4 Body 1.Sol	Index	14
| | |	Interfaces	
| | |	Part Surfaces	[Body 1.Sol]
| | |	Type	Wall
| | |	Allow Per-Surface Values	false
| | |	Tags	[]
| | +- 1 Physics Conditions		
| | | +- 1 Reference Frame Specification	Option	Region Reference Frame
| | | +- 2 Shear Stress Specification	Method	No-Slip
| | | +- 3 Tangential Velocity Specification	Method	Fixed
| | | `-4 Wall Surface Specification	Method	Smooth
| | `-2 Physics Values		
| | `- 1 Blended Wall Function	E	9.0
| |	Kappa	0.42
| | `-5 Body 1.Sortie	Index	16
| | |	Interfaces	

			Part Surfaces	[Body 1.Sortie]
			Type	Pressure Outlet
			Allow Per-Surface Values	false
			Tags	[]
		+-1 Physics Conditions		
			Direction	Extrapolated
			Pressure	Environmental
			Option	None
			Method	Intensity + Viscosity Ratio
		`-2 Physics Values		
		+-	Method	Constant
			Value	0.0 Pa
		+-	Method	Constant
			Value	0.01
		`-	Method	Constant
			Value	10.0
	+-2 Feature Curves		Part Curve Selection Priority	[Region:Feature Curve]
			Feature Curves	1
		`-1 Feature Curve	Part Curves	[Body 1.Default]
			Tags	[]
	+-3 Physics Conditions			
		+-1 Initial Condition Option	Option	Use Continuum Values
		+-2 Mass Source Option	Mass Source Option	false
		+-	Momentum Source Option	None
		`-	Turbulence Source Option	None
	`-4 Physics Values			
	+-1 Axis		Coordinate System	Laboratory
			Origin	[0.0, 0.0] m
			Direction	[0.0, 0.0, 1.0]
	`-2 Motion Specification		Motion	Stationary
			Reference Frame	Lab Reference Frame
+-				
3 Representations				
	+-1 Latest Surface/Volume		Representation	Volume Mesh
			Tags	[]
	+-2 Geometry		Tags	[]
		`-1 Latest Surface	Tags	[]
	`-3 Volume Mesh		Cells	572414
			Interior Faces	1706838
			Vertices	1138034
			Tags	[]
	+-1 Finite Volume Regions			
		`-1 Region	Cells	572414

| | |	Interior Faces	1706838
| | |	Vertices	1138034
| | |	Edges	0
| | `-1 Finite Volume		
Boundaries		
| | +-1 Body 1.Batiment	Faces	1648
| | +-2 Body 1.Entree	Faces	90
| | +-3 Body 1.Haut	Faces	398
| | +-4 Body 1.Sol	Faces	1368
| | `-5 Body 1.Sortie	Faces	105
| `-2 Cell Sets		
+-4 Contacts		
+-5 Parts		
| +-1 Block	Metadata	{}
| | |	Index	4
| | |	Region	[]
| | |	Contacts	[]
| | |	Descriptions	[Root]
| | |	Face Count	12
| | |	Coordinate System	Laboratory
| | |	Corner 1	[-1.0, -0.2, 0.0] m,m,m
| | |	Corner 2	[3.5, 1.0, 0.005] m,m,m
| | |	Tags	[]
| | +-1 Surfaces		
| | | `-1 Block Surface	Index	62
| | |	Metadata	{}
| | |	Boundary	[]
| | |	Tags	[]
| | `-2 Curves		
| | `-1 Block Curve	Index	4
| |	Feature Curve	[]
| |	Tags	[]
| `-2 Body 1	Metadata	{}
| |	Index	3
| |	Region	[Region]
| |	Contacts	[]
| |	Descriptions	[Root]
| |	Face Count	44
| |	Tags	[Region (2D Mesh)]
| +-1 Surfaces		
| | +- 1 Batiment	Index	54
| | |	Metadata	{}
| | |	Boundary	[Region: Body 1.Batiment]
| | |	Tags	[Boundary (2D Mesh)]
| | +-2 Entree	Index	57
| | |	Metadata	{}
| | |	Boundary	[Region: Body 1.Entree]
| | |	Tags	[Boundary (2D Mesh)]
| | +-3 Haut	Index	60
| | |	Metadata	{}
| | |	Boundary	[Region: Body 1.Haut]
| | |	Tags	[Boundary (2D Mesh)]
| | +- 4 Mur_oppose	Index	55
| | |	Metadata	{}
| | |	Boundary	[]
| | |	Tags	[]
| | +-5 Sol	Index	58
| | |	Metadata	{}
| | |	Boundary	[Region: Body 1.Sol]
| | |	Tags	[Boundary (2D Mesh)]
| | +-6 Sortie	Index	61
| | |	Metadata	{}
| | |	Boundary	[Region: Body 1.Sortie]
| | |	Tags	[Boundary (2D Mesh)]

		`-7 Symetrie	Index	56
			Metadata	{}
			Boundary	[]
			Tags	[Region (2D Mesh)]
		`-2 Curves		
		`-1 Default	Index	3
			Feature Curve	[Region:Feature Curve]
			Tags	[]
+-6 3D-CAD Models				
	`-1 3D-CAD Model 1		Part Update Method	UPDATE_GEOMETRY
			Tags	[]
	+-1 Body Groups			
		`-1 Body 1	Name	Body 1
			Color	java.awt.Color[r=128,g=128,b=128]
			Opacity	1.0
			Tags	[]
	+-2 Features			
		+-1 XY	Error Message	
			Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m
			X-Axis	[1.0, 0.0, 0.0]
			Y-Axis	[0.0, 1.0, 0.0]
			Tags	[]
		+-2 YZ	Error Message	
			Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m
			X-Axis	[0.0, 1.0, 0.0]
			Y-Axis	[0.0, 0.0, 1.0]
			Tags	[]
		+-3 ZX	Error Message	
			Origin	[0.0, 0.0, 0.0] m
			X-Axis	[0.0, 0.0, 1.0]
			Y-Axis	[1.0, 0.0, 0.0]
			Tags	[]
		+-4 Global Origin	Error Message	
			Position	[0.0, 0.0, 0.0]
			Tags	[]
		+-5 Lab Coordinate System	Error Message	
			Origin	[0.0, 0.0, 0.0]
			X-axis Direction	[1.0, 0.0, 0.0]
			Y-axis Direction	[0.0, 1.0, 0.0]
			Tags	[]
		+-6 Sketch 1	Error Message	
			Tags	[]
		`-7 Extrude 1	Error Message	
			Sketch	Sketch 1
			Method	Blind
			Direction Type	Normal
			Extrusion Options	OneWay
			Distance	0.005 m
			Asym. Distance	0.1 m
			Draft	None
			Draft Angle	10.0 deg
			Offset Distance	0.1 m
			Body Type	Solid
			Body Interaction	Merge
			Bodies To Interact	All
			Tags	[]
		`-3 Design Parameters		
+-7 Operations				
	+-1 Badge for 2D Meshing		Input Parts	[Body 1]
			Tags	[]
	`-2 Automated Mesh (2D)		Per-Part Meshing	false
			Mesher Execution Mode	Serial
			Input Parts	[Body 1]
			Preserve Surface Perimeters	None

		Verbose Output	false
		Tags	[]
	+-1 Meshers		
		+-1 Polygonal Mesher	Perform Curvature Refinement	true
		Perform Proximity Refinement	true
		Perform Compatibility Refinement	false
		Create Aligned Meshes	true
		Minimum Face Quality	0.05
		`-2 Prism Layer Mesher	Stretching Function	Geometric Progression
		Distribution Mode	Stretch Factor
		Boundary March Angle	50.0
		Gap Fill Percentage	25.0
		Minimum Thickness Percentage	10.0
		Layer Reduction Percentage	50.0
		Concave Angle Limit	0.0
		Convex Angle Limit	360.0
		Near Core Layer Aspect Ratio	0.0
	+-2 Default Controls		
		+-1 Base Size	Base Size	0.1 m
		Base Size	0.1 m
		+-2 CAD Projection	Project to CAD	true
		+-3 Target Surface Size	Size Type	Relative to base
		Percentage of Base	100.0
		Absolute Size	0.1 m
		+-4 Minimum Surface Size	Size Type	Relative to base
		Percentage of Base	10.0
		Absolute Size	0.01 m
		+-5 Surface Curvature	Enable Curvature Deviation Distance	false
		# Pts/circle	72.0
		Max # Pts/circle	200.0
		Curvature Deviation Distance	0.01 m
		+-6 Surface Proximity	Search Floor	0.0 m
		# Points in gap	2.0
		Enable Search Ceiling	false
		Search Ceiling	1.0E10 m
		+-7 Surface Growth Rate	Surface Growth Rate	1.01
		+-8 Number of Prism Layers	Number of Prism Layers	5
		+-9 Prism Layer Stretching	Prism Layer Stretching	1.2
		`-10 Prism Layer Total Thickness	Size Type	Relative to base
		Percentage of Base	20.0
		Absolute Size	0.02 m
	`-3 Custom Controls		
	+-1 Surface Control	Enable Control	true
		Controls Display Mode	All
		Part Surfaces	[Body 1.Batiment]
		Apply Only to Contacting Area	false
		Tags	[]
	+-1 Controls		
		+-1 Target Surface Size	Target Surface Size	Custom
		+-2 Minimum Surface Size	Minimum Surface Size	Custom

| | +- 3 Surface Curvature	Curvature	Custom
| | +- 4 Surface Proximity	Proximity	Parent
| | +-5 Edge Proximity	Proximity	Parent
| | +- 6 Surface Growth Rate	Surface Growth Rate	Custom
| | +- 7 Dominant Element Type	Dominant Element Type	Parent
| | +-8 Prism Layers	Prism Layers	Custom
| | | `- 1 Customize	Customize Number of Layers	true
| | |	Customize Total Thickness	true
| | |	Customize Distribution	true
| | |	Override Boundary Defaults	false
| | `-9 Wake Refinement	Specify wake refinement options	false
| | `-2 Values		
| | +-1 Target Surface Size	Size Type	Absolute
| | |	Percentage of Base	0.7999999999999999
| | |	Absolute Size	0.8 mm
| | +- 2 Custom Prism Values		
| | | +- 1 Number of Prism Layers	Number of Prism Layers	7
| | | +- 2 Prism Layer Stretching	Prism Layer Stretching	1.5
| | | `- 3 Prism Layer Total Thickness	Size Type	Absolute
| | |	Percentage of Base	0.7999999999999999
| | |	Absolute Size	0.8 mm
| | +- 3 Minimum Surface Size	Size Type	Absolute
| | |	Percentage of Base	0.08
| | |	Absolute Size	0.08 mm
| | +- 4 Surface Curvature	Enable Curvature Deviation Distance	false
| | |	# Pts/circle	72.0
| | |	Max # Pts/circle	200.0
| | |	Curvature Deviation Distance	0.01 m
| | `- 5 Surface Growth Rate	Surface Growth Rate	1.2
| `- 2 Volumetric Control	Enable Control	true
| |	Controls Display Mode	All
| |	Parts	[Block]
| |	Tags	[]
| +- 1 Controls		
| | +- 1 Surface Remesher	Customize Size	true
| | `-2 Prism Layer Mesher	Customize Number of Layers	true
| |	Customize Total Thickness	true
| |	Customize Stretching	true
| `-2 Values		
| +- 1 Custom Size	Size Type	Absolute

	|	Percentage of Base	5.0
	|	Absolute Size	0.005 m
	| `- 2 Custom Prism Values		
	| +- 1 Number of Prism Layers	Number of Prism Layers	5
	| +-2 Prism Layer Stretching	Prism Layer Stretching	1.2
	| `-3 Prism Layer Total Thickness	Size Type	Relative to base
	|	Percentage of Base	20.0
	|	Absolute Size	0.02 m
	+-8 Descriptions	Number of Children	3
	| +-1 Root	Described Parts	[Body 1, Block]
	| +-2 Latest Surface	Described Parts	[Body 1, Block]
	| |	Faces	56
	| |	Vertices	32

Solution

Accumulated CPU Time over all processes (s)	1462790.8300024234
Elapsed Time (s)	36603.323249816895
Time Level	21500
Solution Time	21.500000000003293

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

OUVRAGES, THESES ET MEMOIRES

BETZ Albert, *Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Göttingen, Vandenhoed & Ruprecht, 1926. Une présentation détaillée en français de la théorie de l'élément de pale est donnée dans : JOURIEH Munif, Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien, Thèse de Doctorat de Mécanique, Arts et Métiers ParisTech, Paris, 2007, p. 51-57. https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00003390/*, 1926.

BOSSANYI E. A., **WHITTLE G. E.**, **DUNN P. D.**, **LIPMAN N. H.**, **MUSGROVE P. J.** et **MACLEAN C.**, « The efficiency of wind turbine clusters », 1980, pp. 401-416.

BENYUS Janine M., *Biomimétisme: Quand la nature inspire des innovations durables*, 1re éd., HARMONIA MUNDI, Paris, 2011, 408 p.

CARRIVEAU Rupp, *Fundamental and Advanced Topics in Wind Power*, BoD – Books on Demand, 2011, 438 p.

ARTHUR L. et **LEMAIRE M.**, *Les Chauves-souris de France Belgique Luxembourg et Suisse*, BIOTOPE, coll. « Collection Parthénope », 2009.

DEHGHAN KAMARAGI Gholamreza, *Les systèmes de ventilation et refroidissement dans l'architecture traditionnelle du Golfe Persique : histoire des dispositifs, modélisation, évaluation des performances.*, These en architecture, Laboratoire GSA, Université Paris Est, 2012.

FERRUCCI Margherita, *Ventilation naturelle en architecture : méthodes, outils et règles de conception*, These de doctorat, Paris Est, 2017.

JOURIEH Munif, *Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien*, phd thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2007.

MOSHTAGHE GOHARI Kambiz, *Morphogenèse des moulins à vent d'Iran, techniques de gestion du vent de manière architectonique*, Thèse de doctorat, Paris Est, 2018.

MORIARTY Mark, *FEASIBILITY OF SMALL-SCALE URBAN WIND ENERGY GENERATION*, Thèse, Université de Pittsburg, 2015

EDWARD NG, « Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong », 2011.

SCOFFIER Richard, *Frédéric Borel*, 01 éd., Norma, Paris, France, 2004, 224 p.

SCOFFIER Richard, *Ecole nationale supérieure d'architecture de Paris Val-de-Seine*, Archibooks., 148 p.

WANG Biao, *Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent: performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier*, 2015.

WILCOX David C., *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd edition., D C W Industries, La Cãnada, Calif, 1998, 540 p.

WANG Biao, *Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent: performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier*, 2015.

Whittlesey Robert W., **Liska Sebastian** et **Dabiri John O.**, « Fish schooling as a basis for vertical axis wind turbine farm design », *Bioinspiration & Biomimetics*, août 2010, vol. 5, n° 3, p. 035005.

Wilcox David C., *Turbulence Modeling for CFD*, 2nd edition., D C W Industries, La Cãnada, Calif, 1998, 540 p.

ARTICLES SUR LES ETUDES AERAULIQUES

Abd Razak, **Hagishima** et **Tanimoto**, « Analysis of airflow over building arrays for assessment of urban wind environment », *Building and Environment*, 2013.

Al-Bahadly Ibrahim, « Building a wind turbine for rural home », Energy for sustainable development 13.3, 2009.

Annie-Claude Bayeul-Laine, « Modélisation tridimensionnelle de l'hydrovoile de M. Gérard WILLS à l'aide du code de calcul Star CCM+ », 2011.

Bahadori, « Passive Cooling Systems in Iranian Architecture », *in* , 1978, p. 144.

Baskaran Appupillai et **Kashef Ahmed**, « Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques », *Engineering Structures*, 1 novembre 1996, vol. 18, n° 11, pp. 861-875.

Bassett K., **Carriveau R.** et **Ting D. S. -K.**, « 3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential », *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 1 septembre 2015, vol. 11, pp. 186-193.

Eliasson et **Offerle**, « Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon », *Atmospheric Environment*, 2006, vol. 40, n° 1, pp. 1-16.

Han Nuomin, **Zhao Dan**, **Schluter Jorg U.**, **Goh Ernest Seach**, **Zhao He** et **Jin Xiao**, « Performance evaluation of 3D printed miniature electromagnetic energy harvesters driven by air flow », *Applied Energy*, 15 septembre 2016, vol. 178, pp. 672-680.

Heloise Mme, **Alain M**, **Bruno M**, **Vanessa Mme**, **Boniface M**, **Stephen M** et **Sophia-Antipolis INRIA**, « Simulation numérique d''écoulements autour de corps non profil´es par des mod`eles de turbulence hybrides et un sch´ema multirate », p. 210.

ARTICLES SUR L'EOLIEN URBAIN

Acosta Jorge L., **Combe Kevin**, **Djokic Saša Ž** et **Hernando-Gil Ignacio**, « Performance Assessment of Micro and Small-Scale Wind Turbines in Urban Areas », *IEEE Systems Journal*, mars 2012, vol. 6, n° 1, pp. 152-163.

Ahmadikia Hossein, **Moradi Amir** et **Hojjati Mohammad**, « Performance Analysis of a Wind-Catcher With Water Spray », *International journal of green energy*, 1 février 2012, vol. 9.

Chalmers B.J. et **Spooner E.**, « An axial-flux permanent-magnet generator for a gearless wind energy system », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, juin 1999, vol. 14, n° 2, pp. 251-257.

CHAPMAN Lee, **BELL Cassandra** et **BELL Simon**, « Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations », *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, nº 9, pp. 3597-3605.

CHEN James, *Internet of Energy (IoE)*, https://www.investopedia.com/terms/i/internet-energy-ioe.asp, consulté le 15 juillet 2020.

EIFFEL Gustave, *Travaux scientifiques exécutés à la tour de 300 mètres: De 1889 à 1900*, BnF collection ebooks, 2016, 318 p.

ELERT Glenn, *Flow Regimes*, https://physics.info/turbulence/, consulté le 20 juillet 2020.

ELHADIDY M. A. et **SHAAHID S. M.**, « Feasibility of hybrid (wind + solar) power systems for Dhahran, Saudi Arabia », *Renewable Energy*, 1 janvier 1999, vol. 16, nº 1, coll. « Renewable Energy Energy Efficiency, Policy and the Environment », pp. 970-976.

HEZAVEH Seyed Hossein, **BOU-ZEID Elie**, **DABIRI John**, **KINZEL Matthias**, **CORTINA Gerard** et **MARTINELLI Luigi**, « Increasing the Power Production of Vertical-Axis Wind-Turbine Farms Using Synergistic Clustering », *Boundary-Layer Meteorology*, 1 novembre 2018, vol. 169, nº 2, pp. 275-296.

JARRY Laura, *Tempête Carmen. Éolienne de Bouin au sol : « Ce serait une mini-tornade »*, https://www.ouest-france.fr/pays-de-la-loire/challans-85300/tempete-carmen-eolienne-de-bouin-au-sol-ce-serait-une-mini-tornade-5480134, consulté le 23 juillet 2020.

KRISH Sivam, « A practical generative design method », *Computer-Aided Design*, 1 janvier 2011, vol. 43, nº 1, pp. 88-100.

MCCORMACK Jon, **DORIN Alan** et **INNOCENT Troy**, « Generative design: a paradigm for design research », p. 8.

MCLAREN, **DUNCAN**, **AGYEMAN** et **JULIAN**, « Ville intellegente », *in Sharing cities*.

MILLER L. M., **GANS F.** et **KLEIDON A.**, « Estimating maximum global land surface wind power extractability and associated climatic consequences », *Earth System Dynamics*, 11 février 2011, vol. 2, nº 1, pp. 1-12.

O'KANE, « The Madrasa al-GhiyāsÂiyya at Khargird », *in* , 1976, p. 85.

PARASCHIVOIU Ion, *Wind Turbine Design. With Emphasis on Darrieus Concept - Ion Paraschivoiu*, Polytechnic International Press, 2002.

RAO Dr S. Srinivasa, **SHANMUKESH Kota**, **NAIDU M. K.** et **KALLA Praveen**, « Design and Analysis of Archimedes Aero-Foil Wind Turbine Blade for Light and Moderate Wind Speeds », *International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering*, 31 août 2018, vol. 5, nº 8, pp. 01-05-01-05.

RAO K. R., « Wind Energy: Technical Considerations – Contents », *in* K. R. RAO (éd.), *Wind Energy for Power Generation: Meeting the Challenge of Practical Implementation*, Springer International Publishing, Cham, 2019, pp. 1-426.

REMY Tom et **MBISTROVA**, « Offshore Wind in Europe Key trends and statistics 2017 », *windeurope*.

RICCIAR DELLI F, POLIMENO S. JWIND ENG IND AERODYN, « Some characteristics of the wind flow in the lower urban boundary layer », 2006.

ROAF S, « Windcatchers », *in Windcatchers in Living with the Desert*, 1982, pp. 57-70.

ROY DENOON, BRAD COCHRAN, DAVID BANKS, GRAEME WOOD, *Harvesting Wind Power from Tall Buildings*, 2008.

SCOFFIER Richard, *Frédéric Borel*, 01 éd., Norma, Paris, France, 2004, 224 p.

SCOFFIER Richard, *Ecole nationale supérieure d'architecture de Paris Val-de-Seine*, Archibooks., 148 p.

SERERO David, « Dômes Acoustiques à géométrie variable », *Journal de l'Académie de France à Rome Villa Médicis*, 04/2006 p.

SHEAHAN Matthew, « The foiling phenomenon – how sailing boats got up on foils to go ever-faster », p. 19.

SNOW D. J., *Low frequency noise and vibrations measurements at a modern wind farm*, Powergen - Ratcliffe Technology Centre, 1997.

SPERA D. A., « Wind Turbine Technology », *The U.S. Department of Energy's Office of Scientific and Technical Information*, 1994.

STANKOVIC Sinisa, **CAMPBELL Neil** et **HARRIES Alan**, *Urban Wind Energy*, Reprint., Routledge, 2015, 200 p.

TOMINAGA Yoshihide, **AKABAYASHI Shin-ichi**, **KITAHARA Takuya** et **ARINAMI Yuki**, « Air flow around isolated gable-roof buildings with different roof pitches: Wind tunnel experiments and CFD simulations », *Building and Environment*, 1 janvier 2015, vol. 84, pp. 204-213.

UCHIDA et **OHYA**, « Micro-siting technique for wind turbine generators by using large-eddy simulation », *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, pp. 2121-2138.

WOOD Curtis R, « Wind observations above an urban river using a new lidar technique, scintillometry and anemometry », *The Science of the total environment*, 2013.

RAPPORTS D'ETUDE

ALBA Dominique, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens*, https://www.apur.org/fr/nos-travaux/analyse-performance-thermique-logements-parisiens, consulté le 6 octobre 2020.

ALBA Dominique, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1801 et 1850*, 2011.

ALBA Dominique, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1851 et 1914*, 2011.

ALBA Dominique, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1918 et 1939*, 2011.

ALBA Dominique, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1945 et 1974*, 2011.

ALBA Dominique, *Analyse de la performance thermique des logements parisiens construits entre 1975 et 2000*, 2011.

« Rapport 17-03. Nuisances sanitaires des éoliennes terrestres – Académie nationale de médecine | Une institution dans son temps ».

Bougle Fabien, *Eoliennes : la face noire de la transition écologique*, Éditions du Rocher., 2019.

Bourgeon Jean-Mathieu, **Dyen Stéphane**, **Moyon Davy**, **Schmäh Daniel**, **Amacher Robin**, **Colegrave Damien**, **Calmon Martin**, **Farhat Mohamed**, **Fua Pascal**, **Startchev Konstantin**, **Bonnier Guillaume**, **Månson Jan-Anders**, **Michaud Véronique**, **Sigg Antoine**, **Oggier Marc**, **Deville Michel**, **Braun Olivier**, **Sawley Mark**, **Blecha Luc** et **Cugnoni Joël**, *L'Hydroptère: A story of a dream*, https://infoscience.epfl.ch/record/161566, consulté le 24 mai 2020.

Bruyerre Philippe, « Puissance des moulins à vent », *Le Monde des Moulins*, 08/07/2019 p.

Dancette Mael, *À quoi sert la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) ? PPE (programmation pluriannuelle de l'énergie) : définition et objectifs*, https://www.connaissancedesenergies.org/quoi-sert-la-programmation-pluriannuelle-de-lenergie-ppe-170324, consulté le 15 juillet 2020.

Programme des Nations Unies pour l'environnement, *Lignes directrices pour la prise en compte des chauves-souris dans les projets éoliens. Actualisation 2014*, UNEP/EUROBATS, Bonn, 2016.

ARTICLES DE PRESSE

Lenoir Luc, *Le (polluant) recyclage des vieilles éoliennes allemandes*, https://www.lefigaro.fr/economie/le-scan-eco/decryptage/2019/01/29/29002-20190129ARTFIG00141-le-polluant-recyclage-des-vieilles-eoliennes-allemandes.php, consulté le 23 juillet 2020.

« Les éoliennes accroissent-elles les émissions de CO2 ? », *Le Monde.fr*, 10/01/2012 p.

Éoliennes : 30 millions de tonnes de béton pour sauver la biodiversité - Economie Matin, http://www.economiematin.fr/news-eoliennes-beton-artificialisation-sol-biodiversite, consulté le 23 juillet 2020.

Tabarly : la foil histoire du trimaran Paul Ricard, https://www.voileetmoteur.com/voiliers/actualite-voile/regates-courses/tabarly-la-foil-histoire-de-paul-ricard/72662, consulté le 24 mai 2020.

Une nouvelle imprimante 3D à bord de la Station Spatiale Internationale?, https://www.3dnatives.com/imprimante-3d-espace-23052018/, consulté le 24 mai 2020.

SITES INTERNET

Agafonkin Vladimir, *How I built a wind map with WebGL*, https://blog.mapbox.com/how-i-built-a-wind-map-with-webgl-b63022b5537f, consulté le 15 juillet 2020.

Windfinder.com, *Windfinder - wind, wave & weather reports, forecasts & statistics worldwide*, https://www.windfinder.com, consulté le 15 juillet 2020.

Mise en péril d'espèces protégées : FNE assigne EDF Energies Nouvelles, https://www.fne.asso.fr/actualites/mise-en-p%C3%A9ril-d%E2%80%99esp%C3%A8ces-prot%C3%A9g%C3%A9es-fne-assigne-edf-energies-nouvelles, consulté le 23 juillet 2020.

Idée reçue : Toutes les énergies renouvelables productrices d'électricité sont intermittentes, https://www.connaissancedesenergies.org/toutes-les-energies-renouvelables-productrices-delectricite-sont-intermittentes-141105, consulté le 15 juillet 2020.

Does Your Car Look Happy To You? Designers Talk About The Evolution Of Lights, Grilles And Bumpers, https://www.ibtimes.com/does-your-car-look-happy-you-designers-talk-about-evolution-lights-grilles-bumpers-1491974, consulté le 23 mai 2020.

Transport de l'électricité courant alternatif ou continu ? Explication, https://www.connaissancedesenergies.org/est-il-preferable-de-transporter-l-electricite-en-courant-alternatif-ou-continu-130830, consulté le 15 juillet 2020.

Grenelle de l'Environnement : enjeux, acteurs, lois de 2009 et 2010, https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/grenelle-environnement, consulté le 15 juillet 2020.

Éoliennes terrestres : fonctionnement, enjeux et acteurs majeurs, https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eoliennes-terrestres, consulté le 15 juillet 2020.

Éoliennes terrestres : fonctionnement, enjeux et acteurs majeurs, https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/eoliennes-terrestres, consulté le 15 juillet 2020.

Le Monde en guerre contre les éoliennes, https://www.territoire-energie.com/article/le-monde-en-guerre-contre-les-eoliennes/, consulté le 23 juillet 2020.

BĀDGĪR – Encyclopaedia Iranica, http://www.iranicaonline.org/articles/badgir-traditional-structure-for-passive-air-conditioning, consulté le 26 février 2019.

BNEF 2016 wind turbine manufacturers ranking, https://about.bnef.com/blog/vestas-reclaims-top-spot-annual-ranking-wind-turbine-makers/, consulté le 17 juillet 2020.

Eolien en mer, https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/eolien-en-mer-0, consulté le 15 juillet 2020.

Laboratoire Aerodynamique Eiffel, http://www.aerodynamiqueeiffel.fr/detail.php?id=45, consulté le 15 juillet 2020.

Energy & Environmental Science, https://www.rsc.org/journals-books-databases/about-journals/energy-environmental-science/, consulté le 23 juillet 2020.

Federation Environnement Durable - Vent du Bocage, https://ventdubocage.net/sante3.htm, consulté le 23 juillet 2020.

Schomer, et al, Wind Turbine Noise Conference, Denver, August 2013 | Waubra Foundation, https://waubrafoundation.org.au/resources/schomer-et-al-wind-turbine-noise-conference-denver-august-2013/, consulté le 23 juillet 2020.

Anses - Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail, https://www.anses.fr/fr, consulté le 23 juillet 2020.

Wind Power and Bird Studies, http://www.currykerlinger.com/studies.htm, consulté le 23 juillet 2020.

LPO (Ligue pour la Protection des Oiseaux), https://www.lpo.fr/, consulté le 23 juillet 2020.

Impacts des éoliennes sur les oiseaux - Éolien Biodiversité, https://eolien-biodiversite.com/impacts-connus/article/eoliennes-et-oiseaux, consulté le 23 juillet 2020.

Impacts des éoliennes sur les chauves-souris - Éolien Biodiversité, https://eolien-biodiversite.com/impacts-connus/article/eoliennes-et-chauves-souris, consulté le 23 juillet 2020.

Comment recycler les pales des éoliennes ?, https://www.livingcircular.veolia.com/fr/industrie/comment-recycler-les-pales-des-eoliennes, consulté le 23 juillet 2020.

Limoux. Eoliennes du Limousis : on les démonte, https://www.ladepeche.fr/article/2010/04/21/820617-eoliennes-du-limousis-on-les-demonte.html, consulté le 23 juillet 2020.

What is the Internet of Energy?, https://www.nesgt.com/blog/2019/05/what-is-the-internet-of-energy, consulté le 15 juillet 2020.

5 problems the internet of energy can solve | Greenbiz, https://www.greenbiz.com/article/5-problems-internet-energy-can-solve, consulté le 15 juillet 2020.

Grid edge – where the energy system of the future takes off, https://new.siemens.com/global/en/company/stories/infrastructure/grid-edge-where-the-energy-system-of-the-future-takes-off.html, consulté le 15 juillet 2020.

Transforming Singapore, https://www.smartnation.gov.sg/why-Smart-Nation/transforming-singapore, consulté le 15 juillet 2020.

1650 Jansson Wind Rose, Anemographic Chart, or Map of the Winds, https://www.geographicus.com/P/AntiqueMap/Anemographica-jannson-1650, consulté le 15 juillet 2020.

Caractéristiques de la Station Météo Intelligente, https://www.netatmo.com/fr-fr/weather/weatherstation/specifications, consulté le 17 juillet 2020.

Station Météo Intelligente et ses accessoires - La mesure du vent, comment ça marche? | Netatmo Helpcenter, https://helpcenter.netatmo.com/fr/station-meteo-intelligente-et-ses-accessoires/mesures-et-calibrations/la-mesure-du-vent-comment-ca-marche, consulté le 17 juillet 2020.

Notion de maillage dans Star-CCM+, http://hmf.enseeiht.fr/travaux/beiepe/book/export/html/1108, consulté le 20 juillet 2020.

Anémomètre Connecté, https://www.netatmo.com/fr-fr/weather/weatherstation/anemometer, consulté le 26 mai 2020.

3D PRINTING IN SPACE, https://beeverycreative.space/, consulté le 24 mai 2020.

INDEX DES ILLUSTRATIONS

Toutes les simulations, modélisations 3D, photos bâtiments et photos terrains ont été réalisés par D. Serero
Les sources connues sont citées dans la légende de chaque figure.
Certaines sources n'ont pas été retrouvées. Si vous êtes auteur de l'une de ces vues non identifiées, merci de prendre contact avec nous afin que nous puissions préciser l'origine des sources : david.serero@paris-valdeseine.archi.fr

Figure 1. Cartographie des sources d'énergies renouvelables non-utilisées à ce jour dans le bâtiment Par D. Serero 11
Figure 2. Les moulins à vent en terre crue de la ville de Nashtifan à l'est de l'Iran 22
Figure 3. Les pales verticales des moulins à vent en terre crue remontent en partie contre le vent et limite la vitesse du dispositif, src : National Gepgraphic, photo Reza Azizfarkhani.....22
Figure 4. Schéma de fonctionnement des moulins de Nashtifan, relevé par WHC UNESCO 22
Figure 5. Plans en coupe de cinq types de tours à vent typiques de la ville de Yazd au niveau des évents. A. Unidirectionnel. B. bidirectionnel. C. Quatre directions. D. Octogonal avec deux bouches d'aération de chaque côté. E. Quatre directions avec deux "faux" évents sur deux côtés opposés. 23
Figure 6. Une éolienne à Yazd avec des poteaux en bois sur lesquels sont fixés des échafaudages à des fins de maintenance. 23
Figure 7. Cross section through a wind catcher serving the main summer rooms of a house in Yazd. A. Ṭālār. B. Basement. C. Courtyard with pool par H. Ahmadikia. 24
Figure 8. Schéma du fonctionnement de la tour à vent en fonction du jour et de la nuit.(dessiné par D. Serero) 25
Figure 9. Moulin à vent de Schiedam, aux Pays-Bas (photo D. Serero) 26
Figure 10. Le moulin de Moidrey à Pontorson (Manche), Photographie D. Serero le 27 mai 2018, c'est un moulin de type « moulin tour » 27
Figure 11. Détail des pâles dont l'angle peut varier en fonction de la vitesse du vent. (D. Serero) 27
Figure 12. Le moulin de Cassel (Nord) de type « pivot » (Photo par PAT 2013, www.moulins-a-vent.net) 27
Figure 13. Le moulin-cavier des Aigremonts à Bléré (Indre-et-Loire) de type « cavier » (Photo par PAT 2013, www.moulins-a-vent.net).....27
Figure 14 Courbes de puissance de trois grands types de moulins (en noir, moulin flamand ; en rouge, moulin à ailes symétriques et inclinaison variable ; en vert, moulin à ailes symétriques et inclinaison constante. 29
Figure 15 Puissance de différents types de moulins à vent dans un vent de 6,5 m/s 29
Figure 16. 1888 L'éolienne de Cleveland, une première électrique 30
Figure 17. Portrait de Charles Brush, l'inventeur de la première éolienne génératrice d'électricité 30
Figure 18. Machine de 35 m, 1 000 kW, Aérogénérateurs Neyrpic de Saint-Rémy-des-Landes. (Source : http://eolienne.cavey.org/communs) 31
Figure 19. Maquette de l'éolienne BEST double hélice, par l'ingénieur Lucien Romani en 1963, Direction des Etudes et Recherches d'EDF un projet d'aérogénérateur (Source : http://eolienne.cavey.org/communs) 31
Figure 20. Turbine de Gedser au Danemark, sur un mat en béton armé l'origine des éoliennes actuelles (source : https://fr.wind-turbine-models.com/).....32
Figure 21. L'ingénieur danois Johannes Juul (1887 –1969) (source : http://www.windsofchange.dk/JohannesJuul.png) 32
Figure 22. Ferme éolienne offshore de Kentish Flats, au large des côtes britanniques du Kent (©Vattenfall-Robin Dawe).....33
Figure 23. Évolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore (©Connaissance des Énergies / https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/eolien_offshore.infographie_zoom.png) 34
Figure 24. Soufflerie Eiffel, Coupe longitudinale de la configuration initiale de la soufflerie. Source : © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter 39

Figure 25. Motorisation de la soufflerie Eiffel, Photo D. Serero du 18/09/2016. Source © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter 39
Figure 26. Soufflerie Eiffel par Gustave Eiffel. La chambre de soufflerie du laboratoire aérodynamique créé par Gustave Eiffel en 1911. Paris XVIème arr., 67, rue Boileau. Source © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter 39
Figure 27. Soufflerie Eiffel par Gustave Eiffel, étude d'un aéronef, Source © Laboratoire Eiffel, avec l'aimable autorisation de Monsieur Martin Peter 40
Figure 28. Soufflerie aérodyne, Association d'études réalisations en optimisation Dynamique& Energétique ; Source : https://aerodyne-cachan.blogspot.com/, avec l'aimable autorisation de l'association..... 41
Figure 29. Soufflerie aérodyne. Source : https://aerodyne-cachan.blogspot.com/, avec l'aimable autorisation de l'association 41
Figure 30. Souffleries de Saint Cyr. Source : Souffleries S2A ; www.soufflerie2A.com..... 42
Figure 31. L'impact visuel sur le paysage d(une ferme à vent à San Gorgonio Pass, Etats-Unis, source : Photos Stock & Des Images (662)..... 44
Figure 32. Hauteur comparée des éoliennes aux bâtiments patrimoniaux des villes d'échelle intermédiaire..... 44
Figure 33. A Coutances en Normandie, une éolienne est située dans l'axe de la cathédrale de la ville et dénature le panorama urbain de la ville 44
Figure 34. Comparaison de l'impact sonore (source : https://reporterre.net/Quel-est-l-impact-des-eoliennes-sur-l-environnement-Le-vrai-le-faux) 45
Figure 35. L'internet des objets (Internet of Things - IoT) connectés installés dans le monde de 2015 à 2025 en milliards 55
Figure 36. L'exemple de l'internet de l'énergie pour les nouvelles mobilités urbaines 56
Figure 37. Exemple de modèle de Smart city, MIT Senseable City Lab, Carlo Rati 57
Figure 38. Répartition des marchés globaux des smart cities, 2014 – 2019, MIT Senseable City Lab, Carlo Rati 58
Figure 39. Classement de l' « intelligence » des villes de taille intermédiaire en Europe, basé sur IESE Cities in Motion Index, 2018 59
Figure 40. Les projets nationaux stratégiques pour Singapour par Institute Smart Nation, un organisme de transformation de la relation entre citoyens et la gouvernance. 60
Figure 41.Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris avant 1800, source : Apur..... 63
Figure 42. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construit avant 1800, modélisation D. Serero 63
Figure 43.Immeubles construits avant 1800, rue Saint-Martin, 1er arrondissement, source : Apur 63
Figure 44.Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1801 et 1850 (https://www.apur.org/fr) 65
Figure 45. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construits à partir de 1801, modélisation D. Serero. 65
Figure 46.Immeubles construits entre 1801 et 1850, rue de Trévise, Paris, 9e Arrondissement, Source : Apur..... 65
Figure 47. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1851 et 1914 66
Figure 48. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construits à partir de 1851, modélisation D. Serero. 67
Figure 49.Immeubles de rapport, construits entre 1851 et 1914, rue de Châteaudun, 9e, photo D. Serero. 67
Figure 50. Rue de Dunkerque et rue de Guérande, 9e arrondissement. Immeubles de rapport, opération de lotissement, Source : Geoportail. 67
Figure 51. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1918 et 1939 (https://www.apur.org/fr) 69
Figure 52. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construits à partir de 1920, Modélisation D.Serero 69
Figure 53. Immeuble de logement type H.B.M., 1924-1930, C. Heubès architecte, avenue Simon Bolivar, 19e arrondissement, photo : D. Serero..... 70
Figure 54. Immeuble de logement type I.L.M., 1924-1926 boulevard Jourdan, 14e arrondissement. (Https://www.apur.org/fr)..... 70
Figure 55. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1945 et 1974. (Https://www.apur.org/fr)..... 72

Figure 56. Îlot constitué d'immeubles d'habitation de type M.R.U.* construit à partir de 1945, Modélisation D. Serero 72
Figure 57. Immeuble de logement, rue Dunois et boulevard Vincent Auriol, XIIIe arrondissement. 73
Figure 58. Place des Fêtes (XIXe arrondissement) : grand ensemble en cours de construction, effacement de la trame urbaine existante, 1971. (Https://www.apur.org/fr) 73
Figure 59. Les bâtiments de logements collectifs construits à Paris entre 1975 et 2000 (https://www.apur.org/fr).....74
Figure 60. Îlot constitué d'immeubles d'habitation construit à partir de 1975.....75
Figure 61. Immeuble de logement, 1982, Labro et Orzoni architectes, rue des Écluses-Saint-Martin, 10e arrondissement. (https://www.apur.org/fr) 75
Figure 62. ZAC Citroën-Cévennes , XVe arrondissement,1989-2006, Source : aménageur SEMEA 15, mission aérienne 2004.....76
Figure 63. Cartographie des immeubles de Paris basée sur leur typologie et date de construction (https://www.apur.org/fr).....76
Figure 64. Puissance de chauffage nécessaire par unité de surface d'un logement, source Ademe 77
Figure 65. Puissance de chauffage nécessaire par unité de surface d'un logement en Europe en kWh/m2/ , Source Ademe 77
Figure 66. Synthèse de la production d'électricité dans le monde (source : EDF/IEA 2013).....84
Figure 67. Sources de génération électrique en France et projection jusqu'à 2050 (source : OECD/IEA 2014).....84
Figure 68. Visualisation d'une réappropriation possible des toits parisiens avec des micro-générateurs, Photomontage : D. Serero 85
Figure 69 . Cette carte des vents a été publiée en 1650 dans l'Atlas Maritime, ou le volume 5 de l'Atlantis Majoris, de Jansonnius, source : Geographicus.com 86
Figure 70. Le site internet Windfinder.com présente une cartographie en temps réel de la Vitesse du vent sur l'entièreté du globe 88
Figure 71. Le site Windfinder est multiplateforme, Source : windfinder.com 88
Figure 72. Le site est dédié à la visualisation et la prédiction de vent en temps réel pour les afficionados des sports de glisse 88
Figure 73. Vent de la surface par 18 heures en Février 18, 2019, Source : Météo France.....89
Figure 74 Cartes des données climatiques disponibles dans Ladybug 89
Figure 75.Extraction des couches constituées par les données météo, les supports de projection d'une cartographie en temps réel 91
Figure 76. Modèle de liaison des données entre la cartographie des vents et les données satellites. 91
Figure 77 : Système mondial d'observation météo et anémométriques, source : World Meteorological Organisation, 2019 92
Figure 78. Deux résolutions de cartographie interactive des vents à l'échelle mondiale (source : site mapbox.com).....93
Figure 79. Station météo connectée utilisée par D. SERERO.....94
Figure 80. Anémomètre à ultrasons et tablette ou smartphone d'interface de présentation des données en temps réel, source : netatmo.com 94
Figure 81. Dispositif de mesure fixé sur un support rigide à 2 m au-dessus du toit.....95
Figure 82. Manipulation des écrans de présentation des données.....95
Figure 83. Schéma de fonctionnement de l'anémomètre à Ultrasons connecté par Netatmo site.....95
Figure 84. Schémas des vitesses de vent mesurées sur le site 136 avenue Parmentier, 75011 Paris en 2018, Axe vertical : vitesse en M/s. La courbe noir représente la vitesse de vent et la ligne bleu les vents minimaux relevés sur la même période. 95
Figure 85. Plan, élévation, coupe de l'anémomètre utilisé 96
Figure 86. Interface générale de visualisation des données , application Netatmo, station météo 96
Figure 87. Cartographie des stations météo connectées de type Netatmo à Paris (données en temps réel sur le site NETATMO).....97
Figure 88 Les stations de mesure de vent montrent les directions principales dans la Ville de Paris, par le site Windfinder. 97
Figure 89 Géolocalisation des anémomètres connectés au 1/12/2017 à Paris sur le site Netatmo 98

Figure 90. Localisation des Stations météo de relevés du vent, installées par Serero qui sont comparées quotidiennement, 2016-2020 99
Figure 91.Installation de l'anémomètre sur le toit du bâtiment 136 avenue Parmentier, Paris 11ème. Une antenne de TV a servi de support de fixation du dispositif. 100
Figure 92. Localisation de la station de relevé de vent - 136 avenue Parmentier – Paris, D. Serero 100
Figure 93. Modélisation 3D du bâtiment Parmentier montrant les flux schématiques de vents et la position de l'anémomètre de mesure, Modèle 3D D. Serero 101
Figure 94. Comparaison de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly), et des anémomètres connectés à 22 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment de type "Faubourg". (en m/s, comparé sur 4 créneaux horaires journaliers.) 102
Figure 95. Relevé de la station météo Parmentier (moyenne mensuelle des vents en 2018) à 22m de hauteur depuis la rue dans un environnement urbain dense de type "Faubourg." 102
Figure 96. Plan de situation de la maison dans le quartier Maison des examens à Arcueil, D. Serero 102
Figure 97. Distribution de la direction du vent en pourcentage annuel, site 39 rue de Chinon, Arcueil 94110 103
Figure 98. Vue du nouvel anémomètre à une hauteur de 8 mètres au-dessus du sol de la maison Roméra à Arcueil 103
Figure 99. Extrait d'une feuille de relevé de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly), et des anémomètres connectés à 8 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment de type individuelle, D. Serero. (en m/s, comparé sur 4 créneaux horaires journaliers.) 104
Figure 100. Localisation du nouvel anémomètre à l'ENSAPVS inséré sur le toit du bâtiment (Paris 75013) Figure 101.Vue du dispositif 105
Figure 102. Distribution de la direction du vent en pourcentage annuel, Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine. Paris 75013 105
Figure 103. Comparaison de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly), et des anémomètres connectés à 30 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment complexe. Chaque relevé indique la vitesse du vent, et l'orientation du vent. (en m/s, comparé sur 4 créneaux horaires journaliers.) 106
Figure 104. Tableau de comparaison de la grande diversité des dispositifs éoliens existants à ce jour. 108
Figure 105. Intégration de dispositifs éoliens dans des ailes en toiture (retournement de la toiture) afin d'accélérer la veine d'air. 109
Figure 106. Vision préliminaire pour un bâtiment parisien ancien, rénové avec différents dispositifs étudiés 110
107. Intégration de dispositif éoliens dans ces cellules de type entonnoir afin d'accélérer la veine d'air. 110
Figure 108. Génération d'électricité par "flèche à vent " à axe horizontal (Windspire) L= 3m, 0.6m de diamètre, dessins D. Serero 111
Figure 109. Génération d'électricité par "flêche à vent " à axe horizontal (Windspire) L= 2m, 0.6m de diamètre, dessins D. Serero 111
Figure 110. Génération d'électricité par "flêche à vent " à axe verticale (Windspire) H= 3m, 0.6m de diamètre, dessins D. Serero 111
Figure 111. Génération d'électricité micro-éolienne à axe verticale H= 1m, 0.7m de diamètre, dessins D. Serero 112
Figure 112. Modifications de l'écoulement du vent en ville, liées aux volumes architecturaux 117
Figure 113. Différentes typologies de turbulence dans l'écoulement du vent 118
Figure 114. Effets du vent sur des bâtiments de grande hauteur 118
Figure 115. Simulation aéraulique dynamique du vent sur une coupe d'un bâtiment sur pilotis. Simulation de D. Serero 120
Figure 116. L'effet Venturi 121
Figure 117. Expérience de O. Reynolds : présentation du dispositif (à gauche) et représentation des principaux comportements A, B et C des filets de fluide colorés obtenus 124
Figure 118. Régimes des flux 125
Figure 119. Re < 0,5: Pas de séparation, écoulement rampant 125
Figure 120. 5 < Re < 40 : Paire de tourbillons de recirculation symétriques 125

Figure 121. 40 < Re < 180 : Transition vers la turbulence dans le sillage 126
Figure 122. Régime sous-critique : 300 < Re < 3 x 10^5 126
Figure 123. La moyenne du coefficient de portance est non nulle dans le régime critique 3x105 < Re < 3.5 x105 126
Figure 124. Le schéma de gauche montre une meilleure répartition des changements de volume de cellule 129
Figure 125. L'angle de déformation de la cellule 130
Figure 126. Définition du domaine d'analyse et des conditions aux limites du domaine 132
Figure 127 Détail sur un maillage généré autour du bâtiment à étudier 133
Figure 128 Détail du maillage sur la zone autour du bâtiment 133
Figure 129 Détail d'un maillage général du domaine 134
Figure 130 Extrait de la fenêtre de programmation de la simulation 135
Figure 131. Répartition des vitesses d'air dans le modèle 138
Figure 132. Répartition de la pression dans le modèle numérique 139
Figure 133 Extrait de la fenêtre STAR CCM+ de définition du Solver 140
Figure 134. Star CCM+ Capture d'écran de la modélisation du profil à étudier 141
Figure 135. Star CCM+ - Vue du profil et du maillage 2D 143
Figure 136. Star CCM+ -Magnitude des vitesses suite au lancement de la simulation 143
Figure 137. Fig. 86: Star CCM+ - Conditions initiales 144
Figure 138. Star CCM+, les courbes de résidus de l'équation non convergées lors des premiers calculs 145
Figure 139. Analyse des "Résidus" de calcul sur les 500 premières itérations. Le calcul n' pas été prolongé à 10 000 itérations à cause des temps de calcul supérieurs à plusieurs semaines. 145
Figure 140. Allure du maillage 2D 146
Figure 141. Velocity Magnitude 146
Figure 142. STAR CCM+ -Conditions initiales 147
Figure 143. Analyse des "Résidus" de calcul. 147
Figure 144. Allure du maillage 2D 148
Figure 145. Magnitude des vitesses 148
Figure 146. STAR CCM+, Fenêtre de réglage de conditions : « PHYSICS » 149
Figure 147 Localisation des 3 sites d'étude avec stations météo de relevés du vent, installées par Serero de 2016 à 2020 158
Figure 148 Etude d'un volume architectural bas pour l'intégration de micro-éoliennes et de foils. (H=9m) 159
Figure 149 Etude d'un immeuble de dans un ilot urbain d'échelle intermédiaire (H=35m) 159
Figure 150 Etude de bâtiment-ilot en bordure de Seine de grande échelle (H=75m) 159
Figure 151 Etude complémentaire d'un bâtiment de très grande échelle dans un espace dégagé (Esplanade La Défense) (H=110m) 159
Figure 152 - Installation d'un anémomètre connecté sur une maison à Arcueil (92) par D. Serero 160
Figure 153 Vue toiture de l'anémomètre connecté sur une maison à Arcueil (92) par D. Serero 160
Figure 154 Cartographie des vents à Paris mesuré par les anémomètres Netatmo 161
Figure 155. Maillage du modèle 2D de la maison type 163
Figure 156. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison 163
Figure 157. Etude dimensionnelle du modèle numérique/physique de la maison avec foil. 164
Figure 158. Maillage du modèle 2D de la maison avec foil type 1 165
Figure 159. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 1 165
Figure 160. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 2 166
Figure 161. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 2. Le rectangle rouge montre la zone agrandie dans la figure 167. 166
Figure 162. Zoom en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 2 167
Figure 163 : Champ vectoriel du vent au dessus de la maison avec foil type 2 167
Figure 164. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 3 168
Figure 165. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 3 168
Figure 166. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 4 169
Figure 167. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour de la maison avec foil type 4 169
Figure 168. Maillage du modèle 2D de la maison type avec foil type 5 170

Figure 169. Etude en fausses couleurs du vitesse du vent autour de la maison avec foil type 5 170
Figure 170 Etudes 3D d'un aérofoil à 45° sur un angle arrondi de bâtiment 172
Figure 171 Etudes 3D architecturales d'implantation d'aérofoil à 45° sur un bâtiment en pointe 172
Figure 172. Etude dimensionnelle Foil vertical type H1, Echelle 1/20 172
Figure 173. Etude dimensionnelle du foil vertical Type H2, Echelle 1/20 172
Figure 174. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment sans foil 173
Figure 175. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent sans foil 173
Figure 176. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type V1 intégré 174
Figure 177. Etude en fausses couleurs de l'accélération du vent autour du foil vertical intégré type V1 174
Figure 178. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type 2 intégré 175
Figure 179. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type 2. Cette simulation montre que ce choix de volume en creux n'a aucun intérêt pour accélérer l'air sur place ... 175
Figure 180. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type V3 intégré 176
Figure 181. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type V 3 176
Figure 182. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type V4 intégré 177
Figure 183. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type V4 177
Figure 184. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec foil type 5 intégré 178
Figure 185. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du foil vertical intégré type 5 178
Figure 186. Etude dimensionnelle du bâtiment avec dispositif en en acrotère type 1 179
Figure 187. Maillage du modèle 2D de la zone d'étude du bâtiment avec dispositif acrotère type 1 intégré 179
Figure 188. Etude en fausses couleurs de la vitesse du vent autour du dispositif en acrotère type 1 180
Figure 189. Etude dimensionnelle du bâtiment avec dispositif en en acrotère type 1 180
Figure 190. Maillage du modèle 3D de la zone d'étude du bâtiment avec dispositif acrotère type 1 intégré 180
Figure 191. Etude en fausses couleurs de l'augmentation de la vitesse du vent autour du dispositif en acrotère type 1 181
Figure 192 Figure 191. Installation de l'anémomètre sur le toit du bâtiment 136 avenue Parmentier, Paris 11ème. Une antenne de TV a servi de support de fixation du dispositif. 182
Figure 193. Localisation de la station de relevé de vent – 136 avenue Parmentier, Paris 11ème 182
Figure 194 Gabarit - enveloppe en bordure d'une voie de largeur égale ou supérieure à 12 m et inférieure à 20 m non bordée pour installation d'aérofoil 182
Figure 195. Comparaison de la vitesse du vent mesurée sur le site et à 22m au-dessus du sol et le vent mesuré dans le modèle CFD. 183
Figure 196. Comparaison de la vitesse du vent en région parisienne mesurée à des stations météo nationales (Roissy, Orly, Montsouris), et des anémomètres connectés à 22 m au-dessus du sol en toiture d'un bâtiment de type "Faubourg", d'une usine d'air comprimée 184
Figure 197. Relevé de la vitesse de vent de la station météo Parmentier (moyenne mensuelle des vents en 2018) à 22m de hauteur depuis la rue dans un environnement urbain dense de type "Faubourg." En m/s sur l'ave vertical. 184
Figure 198. Maillage du modèle 3D de la zone d'étude de la toiture mansard sans dispositif 185
Figure 199. Simulation de la vitesse du vent autour de la toiture du bâtiment sans dispositif 185
Figure 200. Maillage du modèle 3D avec dispositif 186
Figure 201. Simulation de l'augmentation de la vitessedu vent autour du bâtiment haussmannien avec dispositif 186
Figure 202. Localisation du nouvel anémomètre à l'ENSAPVS 188
Figure 203. Vue du dispositif inséré sur le toit du bâtiment (Paris 75013) 189
Figure 204. Distribution de la direction du vent en pourcentage annuel, Ecole d'Architecture Paris Val-de-Seine. Paris 75013 189
Figure 205. Etude des vents mesurés par la totalité des stations météo connectées montrant les directions de vent principales à Paris. Par Windfinder 189
Figure 206. Le bâtiment de l'ENSAPVS dans son grand contexte urbain (source : modélisation 3D par D. Serero) 190
Figure 207. Vue aérienne des différents bâtiments qui constituent l'ENSAPVS (source idem) 190
Figure 208. Position des 9 zones identifiées pour le relevé par anémomètres connectés 191

Figure 209. Coupe urbaine de l'ENSAPVS qui montre le rapport entre la Seine et l'avenue de France en haut du site. (source : Coupe dessinée par D. Serero)..... 191
Figure 210. Définition du maillage d'analyse aéraulique sur le modèle 3D de l'ENSAPVS, selon une coupe verticale Est-Ouest..... 192
Figure 211. Simulation aéraulique en vitesse moyenne de 5m/s, sur une coupe Nord-Sud du bâtiment ENSAPVS (sur cheminée) Calcul à 10 000 itérations..... 193
Figure 212. Simulation aéraulique sur une coupe Nord-Sud du bâtiment ENSAPVS (avec vitesse de vents de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)..... 193
Figure 213 Simulation aéraulique sur une coupe Nord-Sud du bâtiment ENSAPVS (avec vitesse de vents de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)..... 194
Figure 214. Maillage en plan d'analyse du bâtiment ENSAPVS avec densités accrues sur les zones proches du bâtiment à 12m..... 195
Figure 215. Simulation aéraulique sur une coupe horizontale à 12 m altimétries du bâtiment ENSAPVS (avec une vitesse d'air de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)..... 195
Figure 216. Maillage en plan d'analyse du bâtiment ENSAPVS avec densités accrues sur les zones proches du bâtiment..... 196
Figure 217. Simulation aéraulique sur une coupe horizontale à l'altimétrie de 12m du bâtiment ENSAPVS (avec une vitesse d'air de 5 m/s, vent de direction Ouest-Est)..... 196
Figure 218. Maillage d'étude sur une coupe horizontale à +70m altimétrie du bâtiment ENSAPVS (dimensions tour : 25m de large X45m de long, échelle : 1 /1000 ème)..... 197
Figure 219. Etude aéraulique d'un détail de l'espace entre les 2 tours (à l'altitude + 70m)..... 197
Figure 220. Maillage d'étude sur une coupe horizontale à +70m altimétrie..... 198
Figure 221. Simulation aéraulique au niveau des 2 tours avec l'ajout d'aérofoils)..... 198
Figure 222. Maillage d'étude sur une coupe horizontale à +70m altimétrie du bâtiment ENSAPVS..... 199
Figure 223. Simulation aéraulique au niveau des 2 tours avec l'ajout d'aérofoils..... 199
Figure 224 Etude 3D des dispositifs éoliens intégrés au bâtiment de l'ENSAPVS..... 202
Figure 225. Étude dispositif sur le bâtiment ENSAPVS..... 202
Figure 226 : Comparaison de Calandres automobiles présentant comment une grille de ventilation est devenu un symbole de marque..... 209
Figure 227 Exemples de prise d'air sur le fuselage d'un avion à réaction..... 209
Figure 228. Exemples de volumes architecturaux d'échelles différentes étudiées pour l'intégration de micro-éoliennes et de foils..... 211
Figure 229. Exemples de volumes architecturaux de grande échelle étudiés pour l'intégration de micro-éoliennes et de foils. (Ecole Architecture Paris-Val-de-Seine, Paris 13ème/ la Grande Arche de la Défense, Puteaux (92)..... 211
Figure 230 Mode de mise en « cluster » de dispositifs éoliens (fonctionnement en groupes de turbines rapprochées)..... 211
Figure 231 Modèle biomimétique de Dabiri de bancs de poissons pour définir le mode d'agrégation d'éoliennes..... 213
Figure 232 Etude des turbulences générées par l'effet de groupe de poissons et d'éoliennes extraite de la recherche mentionnée..... 214
Figure 233.Vestas Sailrocket 2, piloté par Paul Larsen et conçu par l'architecte naval anglais Malcolm Barnsley..... 215
Figure 234. Le Greenbird, voiture propulsée par le vent bat le record de vitesse dans le désert du Névada à 201 km/H, piloté par l'anglais Richard Jenkins. Il utilise aussi une voile rigide en carbone de type Foil pour atteindre 3 à 5 fois la vitesse du vent..... 215
Figure 235. Angle d'incidence d'un foil (source : Wikipédia, portance)..... 217
Figure 236 Etude Aéraulique d'une McLaren F1, 2019 (Soucre : MacLaren entreprise)..... 218
Figure 237 Profil d'aile à gauche : Force de portance, Profil d'aile à l'envers à droite : appui aérodynamique..... 219
Figure 238 Simulation aéraulique d'un aileron arrière sur l'appui aérodynamique d'une McLaren F1 (Source MacLaren)..... 219
Figure 239 Exemples d'ailerons de voitures intégrés à la carrosserie voiture..... 220
Figure 240 Exemples de lames DTM sur l'avant d'une voiture..... 220
Figure 241. 4 2 Typologies de turbines éoliennes à axe vertical..... 222

Figure 242 Principales typologies des dispositifs éoliens intégrables aux bâtiments 223
Figure 243. Premières maquettes d'études physiques avec test éolienne à axe horizontal 225
Figure 244. Evolution des maquettes et études des localisations possibles 225
Figure 245. Modèle 3D des turbines étudiées modélisées sur le logiciel Rhinoceros 226
Figure 246 Impression 3d des éoliennes pour la réalisation de maquettes d'étude d'intégration du dispositif ; Etape intermédiaire 226
Figure 247 Mise au point des maquettes d'étude en soufflerie avec G. Bouchet 227
Figure 248 Maquettes d'étude pour soufflerie 228
Figure 249.Maquette d'étude initiale avec 2 turbines. Leur géométrie n'est pas adaptée au foil avec un régime moins important sur la turbine en hélice. 228
Figure 250. Maquette finale optimisée avec allongement de la turbine et contreventement du foil de l'étude 228
Figure 251. Modélisation 3d du dispositif de foil d'amplification du vent 228
Figure 252. LED Voltmètre Ampère, Indicateur de Courant/Tension (KKmoon Nouveau DC1-100V 10A Multimètre Numérique) 229
Figure 253. Visualisation de clusters en drapeau (flag) sur un bâtiment parisien. (Horizontaux et verticaux) Ce dispositif permet de capturer les vents induits par l'effet couloir des rues de tissu dense et homogène, mais est trop « étrangère » à l'architecture présente. 229
Figure 254. Etude de la maquette du bâtiment de petite échelle. 230
Figure 255 Soufflerie physique à l'ENPC 230
Figure 256 Comparaisaon des méthodes de simulation aéraulique, D. Serero 231
Figure 257 Principales typologies des dispositifs éoliens intégrables aux bâtiments 232
Figure 258 Exemple d'une distribution de Weibull pour estimer la répartition des vents sur l'année, où k est le paramètre de forme. 233
Figure 259. Typologies d'intégration de dispositifs éoliens aux bâtiments sur toiture 236
Figure 260 Typologies d'intégration de dispositifs éoliens aux bâtiments sur façade 236
Figure 261. Dendrogramme actionnel éolien à l'usage des architectes et ingénieurs 237
Figure 262 Exemple d'une analyse d'implantation de dispositifs éoliens sur un bâtiment de type tour. 238
Figure 263 Etude d'écoulement d'air sur un Foil pour accélérer ponctuellement le vent. 260
Figure 264. Schéma présentant la possibilité d'un fonctionnement hybride du foil à la fois capteur solaire et accélérateur éolien. 263
Figure 265. La Girafe de l'entreprise suédoise Innoventrum, un dispositif hybride de production d'énergie éolien et photovoltaïque créant aussi un carport 263
Figure 266. Porte Avion Charles de Gaulle qui abrite un atelier d'impression 3D de pièces pour réparation/entretien 264
Figure 267. Imprimante 3D de ASE qui fonctionne en situation d'apesanteur. 264
Figure 268. Impressions numériques pour la recherche (SLA, filament, frittage, ...) 265
Figure 269. Simulation 3D du prototype de tunnel à vent expérimental 267
Figure 270. Prototype de tunnel à vent réalisé par D.Serero pour comparer l'échelle des phénomènes 267
Figure 271. Détail de notre maquette de bâtiment dans la veine d'air 267
Figure 272. Schéma de fonctionnement du tunnel à vent analogique construit pour l'expérimentation 268
Figure 273. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA 269
Figure 274. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA 269
Figure 275. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA 270
Figure 276. Localisation des Points de prise de mesure sur le tunnel physique, Laboratoire GSA 270
Figure 277. Simulation dynamique du modèle du tunnel physique d'étude 271
Figure 278. Simulation dynamique du modèle du tunnel physique d'étude 271
Figure 279. Simulation dynamique du modèle du tunnel physique d'étude 271
Figure 280. Serero tunnel a vent location 272
Figure 281. Comparaison avec une maquette étudiée dans la soufflerie analogique au laboratoire. 272
Figure 282. Nordex N90/2300 275
Figure 283. Gamesa G80/2000 275
Figure 284.Enercon E66/2000 275

Figure 285. Vergnet GEV 26/200 275
Figure 286. , Vergnet GEV HP 275
Figure 287. Vergnet GEV MP 275 275
Figure 288.Eolienne monopale 276
Figure 289.Eolienne de pompage 276
Figure 290. Eolienne de Savonius 277
Figure 291. Ropatec Double Vertical 277
Figure 292. Ropatec Twister 277
Figure 293. Ropatec Bora Extreme 277
Figure 294. Windside WS-12 278
Figure 295. Windside WS-2B 278
Figure 296. Windside WS-0,15 C/B 278
Figure 297. San Francisco Public Utilities Commission 291
Figure 298. Exemple de travail génératif sur le châssis d'un véhicule et sur la structure d'une chaise .. 293
Figure 299. Impression 3D d'éoliennes avec turbines de générateur 293
Figure 300. Etude générative du design d'une éolienne dans Fusion 360 294
Figure 301. Etude générative du design d'une éolienne dans Fusion 360 294
Figure 302. Etude générative du design d'une éolienne dans Fusion 360 295