UCLouvain

LOCI Bruxelles Louvain-la-Neuve Tournai

Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme

Programme 'Conception Papillon'

Création d'un outil permettant un apport de connaissances aux concepteurs dans les phénomènes de vent, dans le cadre de son élaboration de la conception schématique pour un bâtiment de moyenne hauteur.

Auteur : John POSKIN
Promoteur(rice)s : Maider LLAGUNO-MUNITXA, Damien CLAEYS
Lecteurs : Denis ZASTAVNI , André STEPHAN
Année académique 2023-2024
Ingénieur civil et architecte à finalité spécialisée

Année universitaire **2023-2024**

Programme
‘Conception Papillon’

Création d’un outil permettant un apport de connaissances aux concepteurs de bâtiments par rapport aux phénomènes liés au vent, Cet outil doit aider dans le cadre de l’élaboration de la conception schématique de la forme du bâtiment et ce pour un bâtiment de moyenne hauteur.

Présenté par **John POSKIN**
Numéro d’étudiant : **29611800**

Sous la direction de

Maider Llaguno-Munitxa, LOCI/LAB Assistant Professeure
Damien Claeys, LOCI/LAB Professeur

Mémoire présenté le 24/06/2024 devant un jury composé de

Denis ZASTAVNI LOCI/LAB Professeur
André STEPHAN University of Melbourne Professeur
Olivier BOUREZ LOCI/LAB Professeur
Nicolas VAN OOST LOCI/LAB Professeur
David VANDERBURGH LOCI/LAB Professeur
Frédéric ANDRIEUX LOCI/LAB Professeur
Catherine MASSART LOCI/LAB Assistante Professeur
Dorothée STIERNON LOCI/LAB Assistante Professeur
Pierre CLOQUETTE LOCI/LAB Chargé de cours invité
Olivier MASSON LOCI/LAB Assistant Professeur
Sergio ALTOMONTE LOCI/LAB Professeur
Lionel HERINCKX LOCI/LAB Assistant Professeur
Nele DE RAEDT LOCI/LAB Assistante Professeur
Marie PIRARD LOCI/LAB Assistante Professeur
Gérald LEDENT LOCI/LAB Professeur

Mémoire de Master ingénieur civil et architecte à finalité spécialisée à l’UCLouvain LOCI, Architecture, Ingénierie Architecturale et Urbanisme

Préface

Ce mémoire de fin d'études est l'aboutissement de mon parcours universitaire. Il est rédigé afin de remplir les attentes pour d'obtention du diplôme Master ingénieur civil et architecte à finalité spécialisée à l'UCLouvain. J'ai expérimenté pour la première fois la conception paramétrique lors de l'atelier6 LICAR1606 Ville, Paysage.

Le mémoire, sur les outils de conception par le numérique, suit la logique de mon apprentissage. Je reprends les savoirs accumulés pendant mes dernières années d'étude afin de poursuivre plus loin ma réflexion sur le paramétrique design. Il s'est articulé autour des phénomènes liés au vent mis en évidence par le cours LICAR2711 Structure architecturale3 lors du dernier quadrimestre de 2023. Le processus de recherche et d'apprentissage spécifique à ce domaine a commencé en octobre 2023.

Le sujet s'est porté sur la conception des outils liés au vent dans la conception architecturale, suite aux nombreux échanges avec ma promotrice, Maider Llaguno, et les professeurs qui m'entourent lors des cours de structure et d'atelier. Le choix du mémoire par la recherche plutôt que par le projet d'architecture vise à engranger des connaissances plus techniques dans le monde de l'ingénierie tout en combinant un aspect architectural. La question de recherche – sur les outils à mettre en place pour offrir une connaissance aux concepteurs, afin de réduire l'utilisation de matière dans la structure des bâtiments. – a été établie en collaboration avec ma promotrice et mon co-promoteur, Damien Claeys

La recherche fut complexe, mais elle m'a permis d'acquérir les savoirs nécessaires au bon déroulement du mémoire et de sa réalisation. Je remercie mes promoteurs de m'avoir aiguillé dans ce domaine ainsi de leurs précieux conseils. Je souhaite remercier la société Buildwind qui m'a guidé sur les simulations de vent et au Pr. Zastavni pour la partie du mémoire portant sur les calculs de structure. Je souhaite également exprimer ma gratitude aux différents chercheurs et professeurs qui se sont montrés disponibles et à mes collègues de classe qui m'ont permis de débattre de mes idées de recherche. J'ai également pu bénéficier de l'aide précieuse de ma famille et de mes amis. Vous m'avez aidé à garder ma motivation. Remerciement spécial à M.Grabczan et M. Andrieux qui m'ont permis d'expérimenter la transmission du savoir des outils d'architecture.
En espérant que vous apprécierez votre lecture.

John Poskin
Louvain, 7 juin 2024.

Résumé

Le 20mars 2023, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié son rapport concernant le changement climatique, ses risques et ses causes (Calvin et al. 2023). Le domaine du bâtiment consomme une quantité importante de matériaux primaires et est un des domaines émettant le plus de d'émission de carbone dans l'air (Deshayes 2012). Les changements annoncés prévoient également l'augmentation des phénomènes météorologiques (Leroux 2000). Il est du rôle de l'architecte et de l'ingénieur de concevoir et d'adapter leurs constructions a cette problématique (Méquignon et Teresi 2024).

L'objectif de cette étude est de proposer la création d'un outil permettant un apport de connaissances dans les phénomènes liés au vent, et ce dans le cadre de l'élaboration de la conception schématique d'un bâtiment de moyenne hauteur. Cela permet une meilleure approche de la conception qui est nécessaire afin de réduire les forces appliquées aux structures et de diminuer les sections utilisées lors de la construction.

De nombreux outils de conception en architecture assistent l'architecte lors de son processus de fabrication mais ces prises en compte d'épaisseur de structure par rapport au vent n'interviennent que plus tard dans les analyses réalisées sur le bâtiment en cours d'élaboration. Le but de cette recherche est d'amener le sujet de la structure au vent dès la phase de conception schématique afin de mieux répondre aux problèmes rencontrés par la société actuelle.

Pour répondre à cette problématique, la création d'un logiciel de conception assisté par ordinateur (CAO, réalisé par mes soins) se base sur les outils paramétriques de Grasshoper (Gh) qui font partie du programme Rhinoceros (Rhino). Il permet d'introduire une réflexion par rapport aux phénomènes liés au vent dans le processus de la conception schématique par le concepteur et une prise de conscience des efforts induits par le vent en amont des analyses complètes réalisées par des spécialistes.

A partir de ce programme, les architectes peuvent s'attacher à diminuer l'effet de l'utilisation des ressources primaires utilisées en construction, sans dégrader la qualité du processus de création des espaces et de la forme.

Sommaire

1 INTRODUCTION 1

2 CONTEXTE 3

2.1 TEST EN SOUFFLERIE 3
2.2 SIMULATION CFD 5
2.3 EUROCODE NBN1 9
2.4 PROCESSUS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE 10

3 CAHIER DE CHARGES 12

3.1 OBJECTIFS 12
3.2 VARIABLES 13
3.3 VÉRIFICATION DES ANALYSES 13

4 CONCEPTION 14

4.1 PROGRAMME PRINCIPAL 14
4.1.1 Station météorologique 17
4.1.2 Création Génomes 17
4.1.3 Préfiltre 18
4.1.4 Simulation CFD 19
4.1.5 Eurocode NBN1 19
4.1.6 Tri des génomes 20
4.1.7 Création du génératif design 20
4.1.8 Affichage 21
4.2 SOUS-PROGRAMME 24
4.2.1 CFD Butterfly 24
4.2.2 Eurocode 1 30
4.3 LOGICIELS UTILISÉS 34

5 CAS ÉTUDE 35

5.1 MÉTHODOLOGIE 35
5.2 CAS IAJ 36
5.2.1 Cas A (1 ;1 ;2) 37
5.2.2 Cas D (A high-rise building in city blocks) 44
5.3 EUROCODE NBN1 47
5.3.1 Résultats et observations 48
5.4 CAS DE CONCEPTION ARCHITECTURALE 49
5.4.1 Atelier LICAR1607 49
5.4.2 Situation actuelle du vent sur le site 51
5.4.3 La proposition 52
5.4.4 Conception paramétrique basée sur le vent 52
5.4.5 Discussions 52
5.5 CONCLUSION DES CAS D'ÉTUDE 54

6 CONCLUSION 55

7 BIBLIOGRAPHIE 57

8 ANNEXES 63

Liste des tableaux et figures

Figure 1 Tunnel subsonique multidisciplinaire (Uliège 2014) 4
Figure 2 Système de boucle pour la génération de vent (Uliège 2014) 4
Figure 3 Maquette d'architecture dans le cadre de test en soufflerie (Geurts s. d.).... 4
Figure 4 Relation des plugins CFD avec les CAO en architecture (Hu et al. 2023) 5
Figure 5 Représentation de la traînée suivant le Re (Rao et Manur 2013)..... 6
Figure 6 Coupe transversale du plan x-y d'une seule cellule (Waibel et al. 2017) 8
Figure 7 Schéma semi-lagrangien (Waibel et al. 2017) 8
Figure 8 Exemples de résultats d'analyse du vent en vue de dessus pour la ville d'Oklahoma (Srikumar, Gambale, et Mosca 2023) 8
Figure 9 Evolution relationnelle des partenaires (Van Oost et Grabczan 2023)..... 10
Figure 10 Différentes phases de la conception d'un bâtiment 11
Figure 11 Visualisation de la structure des données par arborescence (Mode Lab 2015) 15
Figure 12 Processus de simulation pour l'évaluation des effets du vent sur les structures, création d'un design génératif par le logiciel Conception Papillon 16
Figure 13 Interface graphique de l'utilisateur lors de l'étape de génératif design 20
Figure 14 Définition algorithmique du logiciel Conception Papillon, conçu de manière paramétrique dans Grasshopper 23
Figure 15 Proportion des études sur différentes plateformes et proportion des études sur les différents plugins de CFD basés sur ces plateformes (Hu et al. 2023) 24
Figure 16 Nombre d'études selon les modèles de turbulence appliqués pour les simulations CFD (Hu et al. 2023) 24
Figure 17 Schéma de processus général des plugins CFD 25
Figure 18 Les résultats d'analyse du vent par affichage pour le logiciel de simulation CFD 26
Figure 19 Définition algorithmique du sous-programme de simulation par CFD, conçu de manière paramétrique dans Grasshopper..... 29
Figure 20 Processus de simulation pour l'évaluation des effets du vent sur les structures, par le sous-programme NBN 31
Figure 21 Processus de calcul pour l'évaluation des effets du vent sur les structures, par l'Eurocode (Clavaud 2014) 31
Figure 22 Définition algorithmique du sous-programme de calcul par l'Eurocode, conçu de manière paramétrique dans Grasshopper..... 33
Figure 23 Test case A (2:1:1) 37
Figure 24 Test case A (2:1:1) par AIJ (Tominaga et al. 2008)..... 37
Figure 25 Domaine du tunnel 38
Figure 26 Domaine du tunnel selon le COST (Srikumar, Gambale, et Mosca 2023) 38
Figure 27 Concordance du profil du vent par essais-erreurs cas A 39
Figure 28 Vue de haut des maillages 40
Figure 29 Vue globale des maillages sur le domaine 40
Figure 30 Vitesse [m/s] du vent pour l'analyse par sonde sur le plan vertical et sur le plan horizontal par le programme CFD 41
Figure 31 Batterie de réglages avec leurs caractéristiques propres 41
Figure 32 Vue en plan de la vitesse du vent obtenue par simulation au niveau des piétons (H = 2 m)..... 42
Figure 33 Vue en coupe de la vitesse du vent obtenue par simulation au niveau de l'axe de symétrie du bâtiment 42
Figure 34 Corrélation n5, sondes plan vertical 43
Figure 35 Corrélation n5, sondes plan horizontal..... 43

FIGURE 36 VUE SCHÉMATIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE AUTOUR DU GRATTE-CIEL CENTRAL SELON LE CAS D (HU ET AL. 2023) 44
FIGURE 37 VUE PERSPECTIVE DE LA ZONE CIBLE AUTOUR DU GRATTE-CIEL CENTRAL ET DES POINTS DE MESURE, PAR PROGRAMME CFD. 44
FIGURE 38 SCHÉMA DE LA ZONE CIBLE AUTOUR DU GRATTE-CIEL CENTRAL ET DES POINTS DE MESURE SELON LE CAS D (HU ET AL. 2023). 44
FIGURE 39 CONCORDANCE DU PROFIL DU VENT PAR ESSAIS-ERREURS CAS D 45
FIGURE 40 RÉSULTAT GRAPHIQUE OBTENU PAR SIMULATION DU LOGICIEL DE CALCULS SELON L'EUROCODE 47
FIGURE 41 RÉSULTAT GRAPHIQUE OBTENU PAR CALCUL (CLAVAUD 2014) 47
FIGURE 42 COMPARAISON DES RÉSULTATS OBTENUS POUR LES CALCULS SELON L'EUROCODE 48
FIGURE 43 COUPES DU PROJET LICAR1607 PAR LE GROUPE 3 50
FIGURE 44 PLAN DE SITUATION DU PROJET LICAR1607 PAR LE GROUPE 3 50
FIGURE 45 PLAN D'IMPLANTATION DU PROJET LICAR1607 PAR LE GROUPE 3 50
FIGURE 46 MAQUETTE NUMÉRIQUE DE TRAVAIL DU GROUPE3 50
FIGURE 47 ANALYSES DE LA VITESSE DE VENT SUR LE SITE DE LA GARE DE L'OUEST 51
FIGURE 48 ACTIONS DU VENT SUR UN BÂTIMENT DU PROJET DU GROUPE3 SUR LE SITE DE LA GARE DE L'OUEST 51
FIGURE 49 EFFET DE VENTURI (SRIKUMAR, GAMBALE, ET MOSCA 2023) 51
FIGURE 50 AFFICHAGE DES DONNÉES RELATIVES AU VENT SUR LE SITE PAR LE PROGRAMME « CONEPTION PAPILLON » 51
FIGURE 51 INTERFACES UTILISATEUR LORS DE LA CONCEPTION AVEC LE PROGRAMME « CONCEPTION PAPILLON 53
FIGURE 52 GÉOMÉTRIE SÉLECTIONNÉE APRÈS LA CONCEPTION AVEC LES EFFETS DU VENT 53

Liste des abréviations

CAO	Conception assisté par ordinateur
Cpe	Coefficient de pression extérieure
Cpi	Coefficient de pression intérieure
CPU	Unité centrale de calcul
ELS	Etats limite de service
ELU	Etats limite ultime
GA	Algorithme génétique
Gh	Grasshopper3D
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IA	Intelligence artificielle
IAJ	Institut d'Architecture du Japon
IU	Interface utilisateur
K	Constante de Von Karma
PSO	Optimisation par essaim de particule
Qp(z)	Pression dynamique de pointe
Re	Nombre de Reynolds
Rhino	Rhinocéros3D
Vb	Vitesse de référence
Vm(z)	Vitesse moyenne
CFD	Computationnal fluid dynamique
COST	European Cooperation in Science and Technology
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Résolution averaged Navier Stockes

« Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set off a Tornado in Texas? »

Si le battement d'ailes d'un papillon peut déclencher une tornade, il peut aussi l'empêcher. Si le battement d'ailes d'un papillon influe sur la formation d'une tornade, il ne va pas de soi que son battement d'ailes soit l'origine même de cette tornade et donc qu'il ait un quelconque pouvoir sur la création ou non de cette dernière

Edward Lorenz,
Météorologue

1 Introduction

Les phénomènes météorologiques extraordinaires se multiplient avec le réchauffement climatique (Leroux 2000). Le 20 mars 2023, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a publié son rapport concernant le changement climatique, ses risques et ses causes (Calvin et al. 2023). La filière de la construction est la première source d'émission de carbone dans le monde ainsi que pour la consommation de matière primaire. La structure et le gros œuvre représentent 40 % de cette utilisation (Deshayes 2012) , pourtant les ingénieurs visent à l'optimisation de l'utilisation de la matière mais sont contraints par la forme de l'architecture (Méquignon et Teresi 2024).

Des nouveaux outils de conception assistés par ordinateur (CAO) et d'analyse sont disponibles sur différentes plateformes d'architecture et d'ingénierie (Stals s. d.) . Cependant l'analyse et l'optimisation de la matière ne se fait qu'à un stade avancé de la conception architecturale.

Le calcul de structure est abordé dans le cadre de l'analyse de bâtiments en bois de grande hauteur en master à Uclouvain. Lors de la présentation des résultats, il est apparu des observations concernant la force du vent suivant les cas de charges. Les efforts liés au vent provoquent une utilisation accrue de matière première dans les gros œuvres comparés aux autres variables météorologiques (Zastavni 2023). Cette utilisation excessive de matière pour répondre à cette contrainte m'a interpellé dans ce contexte de réchauffement climatique et de phénomènes météorologiques toujours plus forts.

Le processus de conception dans le domaine de la construction est rythmé par plusieurs étapes (Van Oost et Grabczan 2023) . L'architecte rencontre le maître d'œuvre et identifie les contraintes du site. Il propose une conception schématique avec des arguments de formes, d'espaces et ce dont il juge important dans la réalisation du projet. Une fois cette étape réalisée et approuvée par le client, des analyses et la fabrication de plans plus rigoureux sont établis. Des études spécialisées sont établies concernant la structure, l'acoustique, la lumière, le confort (Altomonte, Stephan, et van Moeseke 2023). Des modifications et des adaptations du schéma sont réalisées pour satisfaire aux critères établis dans les domaines concernés.

Le concepteur ne possède pas tout le savoir dans ces domaines et il n'est pas possible pour lui de penser acquérir l'ensemble de toutes les connaissances. Des outils sont donc mis à disposition pour simplifier l'élaboration de la conception schématique première. Lors de construction de bâtiments de grande hauteur, le concepteur est directement épaulé par des spécialistes constituant une équipe multidisciplinaire mais ce n'est pas le cas lors de réalisations moins importantes (Van Oost et Grabczan 2023).

L'étude du vent dans les structures requiert un niveau élevé de connaissances dans le domaine des sciences et prend beaucoup de temps pour être effectuée (Srikumar, Gambale, et Mosca 2023) . Les solutions proposées aux concepteurs sont : l'étude par soufflerie, la simulation par calcul numérique et l'utilisation des normes (Frère, Andrianne, et Parmentier 2013). Nous utiliserons les normes de l'Eurocode 1 partie 1-4 (Clavaud 2014) pour la présente étude, étant donné que nous sommes régis par les lois Européennes.

Dans ce mémoire, nous nous interrogerons donc sur les outils à mettre en place pour offrir aux concepteurs une meilleur connaissance dans le cadre de son élaboration de la conception schématique d'un bâtiment de moyenne hauteur soumis au vent. Cela permet en effet de réduire l'utilisation de matière dans la structure des bâtiments.

Afin de traiter le sujet et de créer un outil de conception, un plan de recherche a été établi. Tout d'abord l'apprentissage détaillé des outils de simulation de vent et des normes. Après avoir analysé le processus de conception de l'architecte, nous avons développé un logiciel pour une conception orientée sur les forces du vent. Une recherche empirique a enfin été complétée par l'analyse de cas d'étude. L'outil proposé est accompagné d'éléments relatifs à son utilisation.

Nous voudrions amener un logiciel d'aide à la conception pour satisfaire les études de structure et d'optimisation liées aux contraintes de vent. Le concepteur ne devrait pas avoir une connaissance approfondie du phénomène et une durée d'analyse raisonnable doit permettre la réalisation de la conception schématique.

Nous verrons dans un premier temps l'état actuel des analyses du phénomène météorologique mais aussi la philosophie de l'architecte lors du processus (chapitre 1) pour établir un cahier des charges relatif à l'outil (chapitre 2). Nous implémenterons ensuite un logiciel répondant aux différents points soulevés par le cahier des charges (chapitre3). Nous testerons alors le logiciel avec 4 approches de cas d'étude (chapitre 4). Pour enfin proposer au concepteur un outil facile à utiliser.

2 Contexte

Dans cette première partie nous dressons l'état actuel des outils d'analyse du vent, en nous intéressant particulièrement au Computational Fluid Dynamics (CFD) et aux normes de l'Eurocode. Notre deuxième approche est celle du processus de conception où nous développons les étapes de la réalisation du schéma constructif et de la production des documents par analyse.

À l'heure actuelle, on peut séparer les outils d'analyse du vent en architecture en trois catégories distinctes : l'étude du vent en soufflerie à l'aide de maquettes physiques, la simulation par CFD et les calculs par les normes. On commence également à voir apparaitre une analyse par traitement des données par intelligence artificielle (IA) mais cela ne sera pas développé dans cette étude.

2.1 Test en Soufflerie

L'étude en soufflerie implique la création d'une maquette du projet à une échelle réduite (figure3) ou réelle selon le module que l'on veut observer. Cette représentation de l'objet avec son niveau de morphologie simplifiée peut influencer les résultats observés (Schatzmann et Britter 2011). Les capteurs pour la prise des données finales, s'ils ne sont pas bien intégrés à la maquette, peuvent modifier totalement les écoulements d'air que l'on veut observer. Ils ne nous permettent pas non plus de mesurer un grand nombre de données et seuls les endroits les plus importants pour la prise de données doivent être choisis (Carrega s. d.).

Ce mode de simulation implique l'utilisation de tunnels à vent, souvent de grande taille (figure1), et consomment énormément d'énergie pour la création d'un flux d'air régulier sur la maquette . En raison de leur grande taille et de leur difficulté d'utilisation, on les retrouve souvent dans les laboratoires des universités ou dans des entreprises de recherche et développement spécialisées. Leur utilisation est complexe car de telles solutions sont coûteuses et prennent un certain temps à être mises en œuvre.

Figure 1 Tunnel subsonique multidisciplinaire (Uliège 2014)

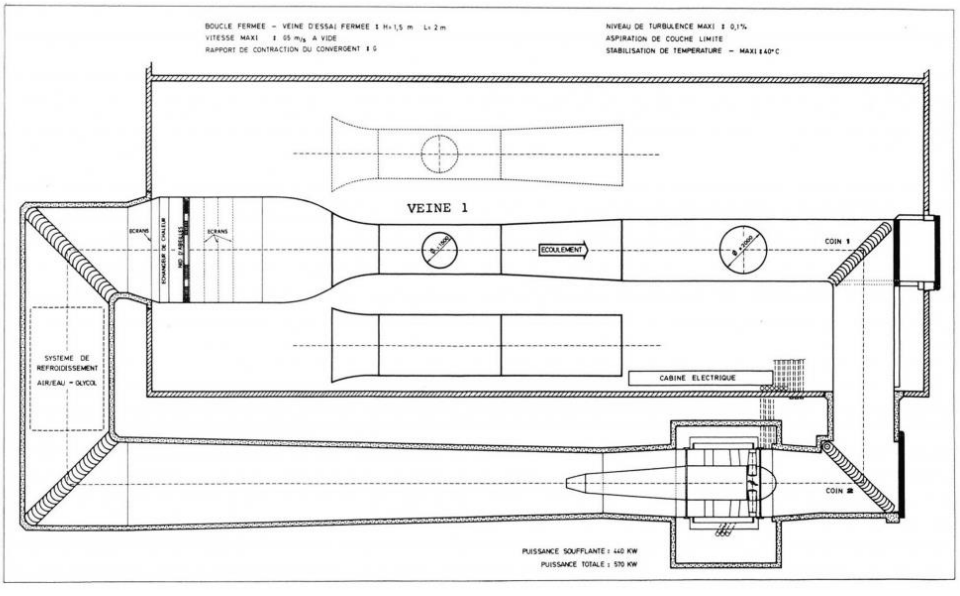


Figure 2 Système de boucle pour la génération de vent (Uliège 2014)

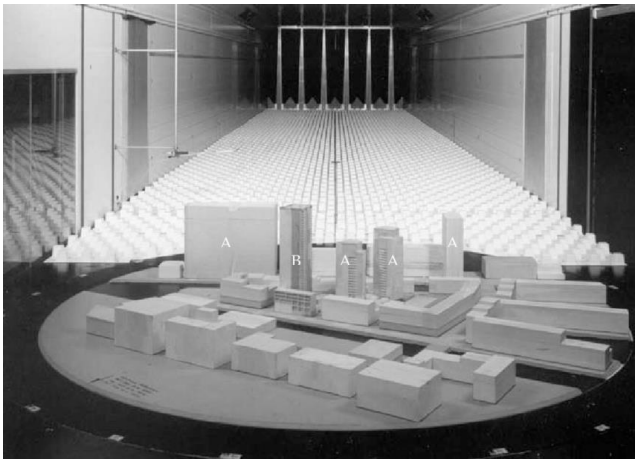


Figure 3 Maquette d'architecture dans le cadre de test en soufflerie (Geurts s. d.)

2.2 Simulation CFD

La simulation par CFD est une solution numérique utilisant le codage informatique et la physique pour prédire le comportement du vent (Kaseb et Rahbar 2022). Son utilisation se fait par des logiciels de calcul possédant une interface utilisateur (IU). Différentes plateformes proposent cette solution comme Ansys-fluent (Tominaga et al. 2008), OpenFoam (Chen et al. 2014), Gerris (Popinet 2003) et Code Saturne (Archambeau, Méchitoua, et Sakiz s. d.). Elles sont payantes ou sont proposées en open source. Une solide base de connaissance en codage et en physique est nécessaire afin de pouvoir comprendre et interpréter les variables dans le programme (Harris 2005) .

Des entreprises offrent leurs services pour des analyses complètes d'un édifice par l'utilisation des logiciels. Les réglages et l'analyse des résultats se font alors par une personne extérieure au processus de conception qui transmet un rapport avec des conseils d'aménagements à prévoir. Cette solution prend beaucoup de temps et ne permet pas aux concepteurs d'acquérir les connaissances pour corriger directement la géométrie du projet. Cela maintient une mauvaise compréhension du phénomène du vent et le problème est répété lors de chaque nouveau projet.

Les CFD sont conçus pour résoudre les équations d'écoulement des fluides incompressibles, telles que déterminées par les équations de Navier-Stokes (Waibel et al. 2017). Ils font généralement appel à des solveurs externes dans le cas des plugins des logiciels d'architecture . Les résultats obtenus peuvent être visualisés sur l'IU du logiciel d'architecture ou par le système de post-calcul du CFD (Hu et al. 2023). Il existe de nombreux programmes pour l'analyse de vent en architecture selon la CAO utilisée (figure4).

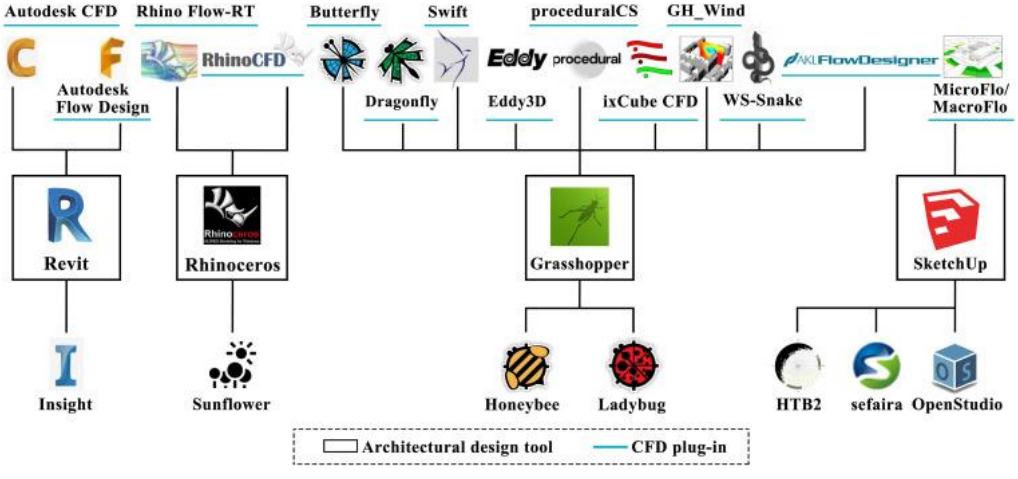


Figure 4 Relation des plugins CFD avec les CAO en architecture (Hu et al. 2023)

Les outils de simulation numérique de vent, offerts par les plugins et les CFD, se basent principalement sur la résolution des équations de fluide incompressible par Navier-Stokes (RANS) (Harris 2005).

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} = -(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} - \frac{1}{p}\nabla p + v\nabla^2 \boldsymbol{u} + \boldsymbol{F} \qquad (1)$$

$$\nabla \boldsymbol{u} = 0 \qquad (2)$$

où
u(x,t) = (**u**(x,t), **v**(x,t), **w**(x,t))
vecteur vitesse à l'instant t et aux coordonnées x = (x,y,z) sur une grille cartésienne tridimensionnelle régulière
p(x,t) pression scalaire,
F(x,t) force externe (vent)
P constante de densité du fluide
ν constante de viscosité

Le modèle est basé sur un coefficient de Reynolds (Re) élevé (Catalano et al. 2003). Cependant, il existe d'autres modèles pour calculer les équations de fluides, tels que la simulation des grands tourbillons (Large Eddy Simulation, LES), qui prend en compte un Re réduit (figure5).

Les conditions aux limites considérées sont toutes sur la vitesse **u** : une combinaison de conditions de Dirichlet **u** = **g** (pas de glissement du flux entrant) et des conditions de Neumann $\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial n} = h$ (écoulement du flux sortant). A partir d'un champ de vitesse initial $\boldsymbol{u}^k = \boldsymbol{u}\,(t_0)$, le calcul d'une nouvelle vitesse $\boldsymbol{u}^{k+1} = \boldsymbol{u}\,(t_0 + \Delta t)$ se fait en 3 étapes.

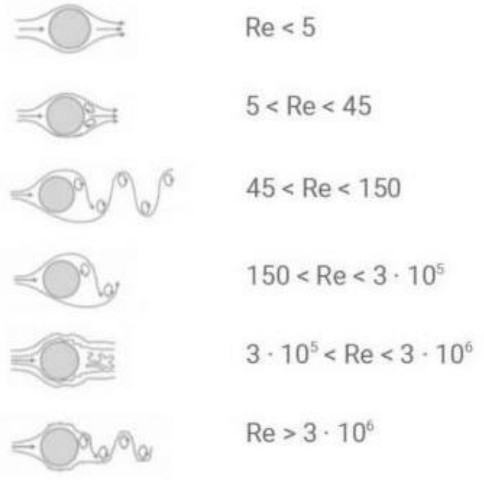


Figure 5 Représentation de la traînée suivant le Re (Rao et Manur 2013)

1. Le terme de diffusion est résolu par vitesse intermédiaire $\boldsymbol{u}^*_{(t+\Delta t)}$,avec les mêmes conditions aux limites que $\boldsymbol{u}$, depuis l'équation :

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}^*}{\partial t} = v\nabla^2\boldsymbol{u}^* + \boldsymbol{F} \qquad (3)$$

Elle est résolue avec les Equations d'Euler Implicite :

$$u^* - v\Delta t\nabla^2\boldsymbol{u}^* = \Delta t\boldsymbol{F} + \boldsymbol{u}^k \qquad (4)$$

2. Le terme non linéaire d'advection est résolu par les schémas semi-Lagrangiens (figure6) couramment utilisés dans la modélisation météorologique. En utilisant le champ de vitesse $\boldsymbol{u}^*$ au temp $t_0 + \Delta t$ et la trajectoire de l'élément de fluide à la position x= (x,y,z) le long de la courbe $\gamma(x)$, on trouve la vitesse de l'élément du fluide à t = t_0. Cela donne une nouvelle vitesse intermédiaire $\boldsymbol{u}^{**}_{(x,t+\Delta t)} = \boldsymbol{u}^*_{(\gamma(x))}$ **.** Le chemin de la courbe est défini par une équation de premier ordre à pas arrière simple :

$$\gamma(x) = -\Delta t\boldsymbol{u}^*(x) \qquad (5)$$

Ou de placer un tracé d'ordre supérieur. Le deuxième degré est utilisé dans le cas des CFD.

3.Pour s'assurer que la méthode ne diverge pas avec le champ de vitesse intermédiaire u^*. on évalue le champ de pression par les conditons aux limites de Neumann sur l'ensemble du domaine**.**

$$\nabla^2\boldsymbol{p}^{k+1} = \nabla\cdot\boldsymbol{u}^{**} \qquad (6)$$

Une fois la pression calculée, $\boldsymbol{u}^{**}$ est ramené sur le champ de vitesse $\boldsymbol{u}\ (t_0 + \Delta t)$ par l'équation :

$$\boldsymbol{u}^{k+1} = \boldsymbol{u}^{**} - \nabla\boldsymbol{p}^{k+1} \qquad (7)$$

Pour balayer l'ensemble du domaine étudié, on utilise le schéma de différences finies du second ordre, initialement utilisé par les algorithmes de visualisation des jeux vidéo proposés par Stam (1999). Cette méthode permet d'obtenir une vitesse au centre d'une cellule avec précision, mais ne permet pas de calculer la pression. En revanche, avec la méthode de la grille décalée, la pression est au centre de la cellule et les composantes de la vitesse sont définies aux points médians des bords normaux à sa direction (figure1). Il y a une grille tridimensionnelle régulière dans notre domaine, et en interpolant de façon trilinéaire, il est possible d'obtenir $\boldsymbol{u}^*(\gamma(x))$.

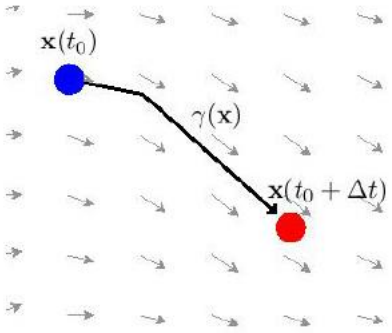


Figure 7 Schéma semi-lagrangien (Waibel et al. 2017)

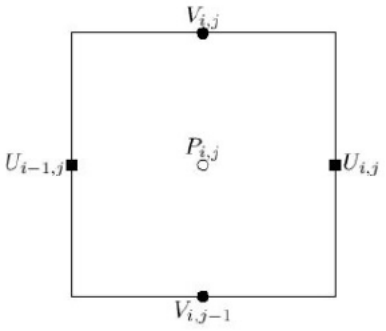


Figure 6 Coupe transversale du plan x-y d'une seule cellule (Waibel et al. 2017)

Chaque étape résout les 3 équations de diffusion (pour (u(x,t), v(x,t), w(x,t)) ainsi qu'une équation de Poisson pour le calcul de la pression. Le programme résout le système composé de ces 4 équations pour chaque point de référence. La résolution de cette matrice passe par le développement simple de Jacobi effectué par l'unité centrale de calcul (CPU) de l'ordinateur.

Il existe 3 algorithmes pour la résolution : (i) algorithme génétique (GA), (ii) optimisation par essaims de particules (PSO) et (iii) une solution hybride composée de PSO et de GA. La solution hybride est utilisée par les CFD car elle offre une résolution des simulations au vent supérieure comparé au PSO et GA (Garg 2016).

Les résultats (figure8) dépendent de la division des surfaces tridimensionnelles effectuée par le programme. Un nombre plus important de cellules entraîne un résultat plus précis et a plus de chance de converger (Paris et al. 2023). Le nombre de cellules est directement lié au temps de calcul des programmes. Un deuxième facteur lié au temps est le nombre d'itérations nécessaires pour arriver à la solution. Une interpolation trilinéaire est nécessaire et influence la précision des solutions.

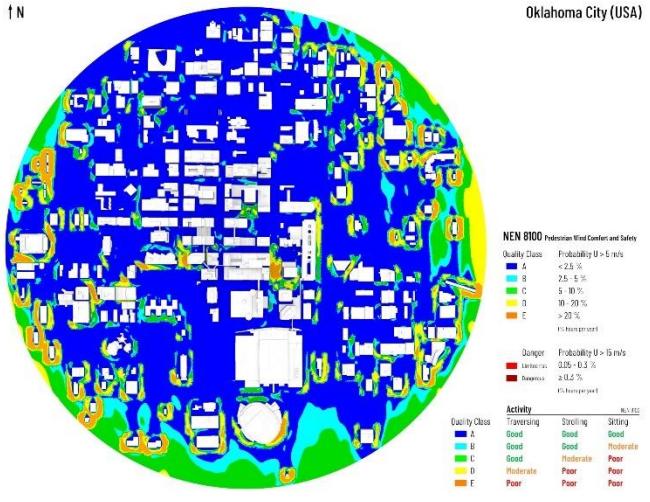


Figure 8 Exemples de résultats d'analyse du vent en vue de dessus pour la ville d'Oklahoma (Srikumar, Gambale, et Mosca 2023)

2.3 Eurocode NBN1

Les normes utilisées en Europe pour la construction sont regroupées sous la forme d'un document nommé Eurocode. Il cadre et décrit les procédures à adopter pour concevoir un édifice.

L'Eurocode 1 (EN1991), intitulé "Actions sur les structures", a été publié en français en 2013 par les éditions du Moniteur de l'Expertise Technique. Il a été rédigé par Jean-Armand Calgaro, Haig Gulvanessian et Paolo Formichi, puis adapté par Daniel Lecointre. Ce document définit les principes généraux de calcul et de chargement des structures à construire. Il propose des formes variables d'actions adaptées à chaque situation de projet (durable, transitoire, accidentelle ou sismique). Il est structuré autour de trois points généraux :

- L'évaluation des poids propres et des charges d'exploitation appliquées au projet.
- La détermination des charges de neige, les actions du vent et les actions thermiques.
- Le calcul des actions en cours d'exécution (mouvement de sol, pression des terres, effet de l'orographie) et les actions accidentelles (chocs, explosions intérieures,..)

Le chapitre 1-4 est attaché à la partie « Actions du vent sur les structures ». Ses actions sont réparties sur l'élément par zones d'affectation. Chaque région est affectée par une force de pression perpendiculaire à sa surface en fonction du phénomène du vent en présence.

Dans un premier temps les données du site et les caractéristiques du vent sont détaillées. La vitesse locale du vent, sa direction, le modèle de turbulence, le type de terrain, le relief, les obstacles rencontrés et la configuration des lieux introduisent différents coefficients. Ces derniers donnent le profil du vent et la pression dynamique de pointe qui constituent les conditions atmosphériques d'entrée.

Différents coefficients et typologies de régions sont proposés dépendant de la forme, des dimensions, de la rigidité et des ouvertures dans les cas des géométries rencontrées. Les régions reprennent un coefficient de pression extérieur et sont détaillées dans des abaques présents directement dans la norme. Ils permettent d'obtenir une force sur chaque région pour les calculs de structure.

2.4 Processus de conception architecturale

La mission de l'architecte est de plus en plus complexe avec de nombreux intervenants (figure 9) et un processus de conception plus élaboré (Van Oost et Grabczan 2023). Ce phénome de complexification offre peu de marge de manœuvre à l'architecte : des effets indésirables peuvent apparaitre lors de la mise en œuvre du bâtiment final.

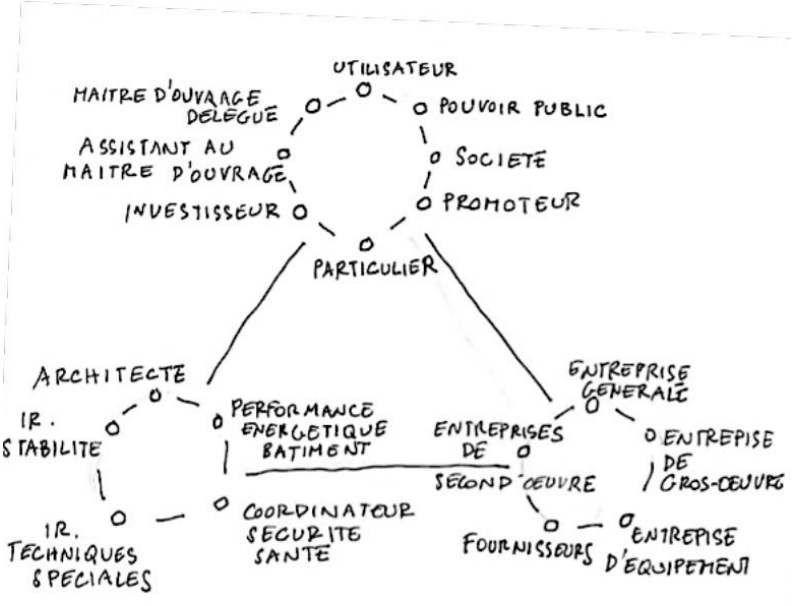


Figure 9 Evolution relationnelle des partenaires (Van Oost et Grabczan 2023)

Le processus de conception en architecture est rythmé par plusieurs étapes déterminées (figure 10). La première étape est la rencontre avec le client et la détermination des contraintes du site. A ce moment l'architecte peut déjà faire appel à diffèrents spécialistes. Il prend en compte l'ensemble de ces données pour élaborer une première esquisse de la forme du bâtiment. Il instaure des concepts qui déterminent la philosophie du projet et des points importants qui le guideront tout au long du processus. La phase suivante est la phase d'analyse et de production de plans et d'éléments plus détaillés. Il est épaulé de spécialistes pour l'analyse de certains domaines comme ceux de la structure ou des performances énergétique. Cela permet de dresser un cahier des charges à transmettre aux sociétés de construction. Une fois les appels d'offres effectués et une offre sélectionnée, le chantier commence avec la réalisation physique du bâtiment.

Dans un rapport 20mars 2023, le GIEC a publié ses conclusions concernant le changement climatique, ses risques et ses causes (Calvin et al. 2023). Or concernant les habitations, on peut souligner que lors de la phase de construction, un bâtiment consomme une quantité de matériaux primaires importante (Deshayes 2012). Et pour les édifices de moyenne hauteur ce phénome s'accentue par le dimensionnement de la structure. De plus, à travers le cours LICAR2711 Structure architecturale3, on constate que les facteurs de forces liés aux effets du vent déterminent le dimensionnement (Zastavni 2023).

Dans l'étape de conception schématique, l'architecte est assisté par un ensemble d'outils (Burdèse s. d.). Les outils de conception assistés par ordinateur (CAO) offrent de nouvelles possibilités. Une partie émergente actuellement dans ces outils est le dessin par la paramétrisation (Delvaux et Marin s. d.). Il est d'avantage appris dans les écoles et une nouvelle façon de concevoir est investiguée (de Boissieu 2013). Ces programmes de paramétrisation offrent de nombreux domaines d'analyse et il est désormais possible d'optimiser la conception (Kaseb et Rahbar 2022).

Les phénomènes de vent sont complexes et leur analyse demande des savoirs avancés dans le domaine des sciences physique et de l'informatique dans le cas des simulations au CFD. Lors de la conception schématique d'un projet, l'architecte n'a pas toujours accès à toutes les connaissances nécessaires pour prendre en compte les effets du vent sur les structures. La détermination de ces contraintes est souvent réalisée lors de la phase d'analyses avec les spécialistes en structure (Van Oost et Grabczan 2023).

Au vu des problématique environnementales actuelles et de la consommation de matières primaires dans la construction, l'architecte devra de plus en plus prendre en compte de nouvelles contraintes. L'influence du facteur vent amenant souvent un surdimensionnement de la structure, une meilleure approche dès la conception schématique de la forme du bâtiment peut éviter qu'un problème apparaisse dans les étapes de conception suivantes.

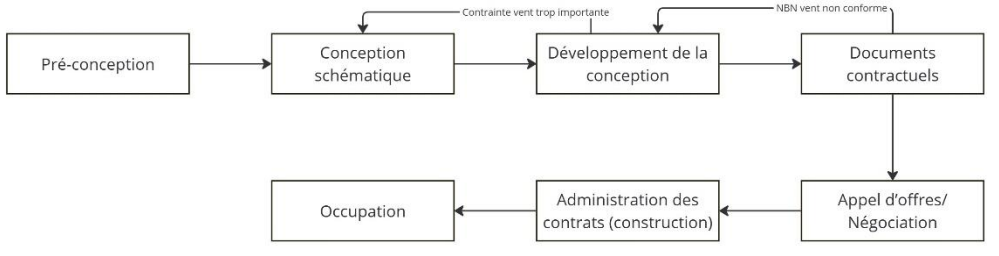


Figure 10 Différentes phases de la conception d'un bâtiment

3 Cahier de charges

Cette section va reprendre l'élaboration d'un cahier de charges pour un outil qui offre une connaissance au concepteur. Ainsi, dans le cadre de son élaboration de la conception schématique d'un bâtiment de moyenne hauteur soumis au vent, il pourra réduire l'utilisation de matière dans la structure des bâtiments.

3.1 Objectifs

Les attentes rencontrées par le logiciel sont donc d'assister le concepteur (utilisateur) afin de mieux réaliser la conception schématique d'un bâtiment de moyenne hauteur en Europe. L'objectif est d'utiliser les outils d'analyse du vent pour adapter la conception architecturale à une optimisation de la structure de l'élément. Le produit doit proposer une analyse du bâtiment avec l'intervention régulière de l'utilisateur.

L'utilisateur est défini comme un concepteur d'éléments architecturaux dans le cadre de projet de moyenne hauteur (3 à 15 étages habitables). Il ne possède pas la connaissance de l'entièreté des phénomènes liés au vent et un spécialiste du domaine n'est pas présent pour l'épauler dans sa tâche. Le programme l'aide dans une meilleure compréhension globale du bâtiment avec des données chiffrées et visuelles.
Son lieu de travail ne permet pas l'accès à une soufflerie à vent.

Les capacités du processeur utilisé sont traditionnelles et ne demandent pas de performances particulières. Le temp de calcul ne doit pas être supérieur à 30min, et les mise à jour de l'interface ne doivent prendre que quelques secondes.

L'accessibilité doit être facile et gratuite depuis n'importe quel système de CAO pour l'architecture. Des tutoriels et explications doivent être fournis pour ne pas écarter l'utilisateur de la conception par une compréhension trop complexe du logiciel.

Son utilisation est itérative et permet une conception d'un modèle plus précis lors de chaque instance. Ses résultats d'analyse doivent être optimisés mais le choix de la forme finale reste à l'utilisateur. Toutes les données caractéristiques comme les forces de pression ainsi que la géométrie doivent être exportées vers d'autres logiciels.

3.2 Variables

Les cas rencontrés lors de la conception comportent un contexte défini géométriquement (implantés par l'utilisateur). Toutes les autres informations concernant les entrées doivent être fournies par l'utilisateur mais seront implémentées par le programme.
Certaines de ces informations sont généralement déjà récoltées par l'utilisateur suite à l'étude du site et peuvent être utilisées lors de la conception et les données météorologiques peuvent être connue mais un appel à une base de données existante reste possible pour créer les conditions du site.

La géométrie à étudier évolue selon la conception est n'est pas fixée pour l'analyse. Elle peut être créée directement dans le programme si l'utilisateur le désire.

3.3 Vérification des analyses

Chaque logiciel comprenant des analyses de vent est vérifié par une étude empirique afin de fournir un taux de corrélation du programme. Les éventuelles informations relatives aux disfonctionnements ou aux limites du logiciel sont identifiées. Des pistes d'amélioration sont proposées afin de garantir le prolongement de la création du logiciel.

Un cas de conception et d'utilisation du logiciel est demandé afin de vérifier chaque étape du processus.

4 Conception

Pour répondre aux exigences du cahier des charges dans le contexte défini, nous implémentons un programme principal nommé « Conception Papillon ». Les analyses du phénomène du vent sont développées dans 2 sous programmes et reprennent respectivement une simulation par CFD et la traduction algorithmiques de l'Eurocode 1, partie relative au « actions du vent sur les structures ». L'interface de chaque programme est affichée pour visualiser les différentes étapes lors des calculs. Certains appels à des programmes et plugins sont nécessaires lors de la conception, ils sont répertoriés lors de la dernière section.

4.1 Programme principal

Le format créé est un logiciel de codage visuel basé sur la plateforme Gh, intégré à l'interface visuelle de Rhino. Il tire parti d'un logiciel CFD et des calculs des normes de l'Eurocode1 pour les arguments de vent. Une base d'optimisation par design génératif est également intégrée.

Le calcul des arguments est effectué une seule fois pour chaque géométrie afin de réduire le temps de traitement. Cette réduction du temps de calcul permet à l'utilisateur de concevoir sa géométrie tout en réalisant les analyses de vent. Son rôle est continu tout au long du processus. Le programme ne génère pas de géométries conçues uniquement par l'ordinateur.

Ce processus, similaire à la création de modèles paramétriques, doit permettre des modifications en ajustant les paramètres fournis sans perdre les résultats déjà obtenus. Un mécanisme de boucle est intégré dans le programme pour permettre de revenir au point de départ et d'effectuer plusieurs itérations de géométries successives.

Le modèle proposé est développé par sections et vise à simplifier l'organisation du codage. Cela permet au développeur de mieux comprendre les différents flux de données et d'identifier les points pouvant poser problème. Chaque section du code assume un rôle particulier et est regroupée sous forme de cluster interne lors de l'assemblage du programme "Conception Papillon".

Ces clusters fonctionnent de manière autonome ; l'utilisateur peut choisir d'utiliser un sous-programme pour analyser une forme précise s'il le souhaite, sans avoir à passer par l'intégralité du programme principal.

Les données assimilées aux différents modèles sont stockées grâce au système de l'arbre des données (figure11) contenu dans Gh. Les sous programmes sont développés avec une entrée géométrique unique, le niveau de complexification de l'arbre est d'ordre 2. Une fois le rôle du cluster accompli pour cette géométrie, une liste de géométries d'ordre 3 est instaurée afin de régler les adaptations de l'organisation des données. Cela permet aux systèmes de gestion des listes de faire appel aux composants plusieurs fois sans avoir à réécrire le code pour chaque géométrie.

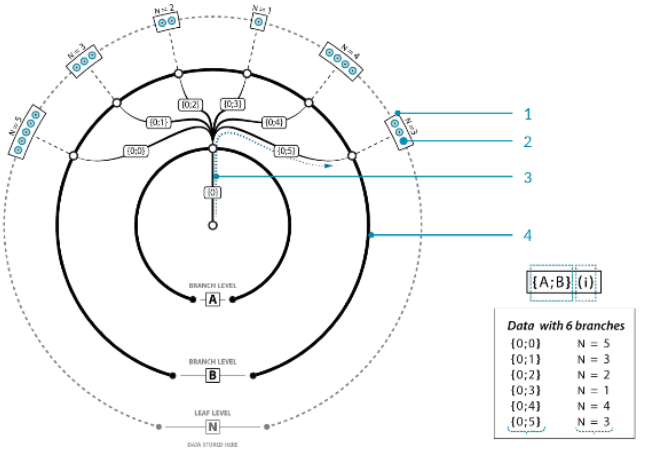


Figure 11 Visualisation de la structure des données par arborescence (Mode Lab 2015)

L'utilisateur n'a pas besoin de connaître l'utilisation de Gh pour utiliser le programme. Les choix de conception se font à travers des listes déroulantes, des cases textuelles à remplir, des curseurs à déplacer ou en activant des fonctions via des boutons True/False. L'objectif est que l'utilisateur comprenne la logique du programme sans avoir à connaître toutes les étapes de calcul effectuées en arrière-plan.

L'interface visuelle dans Rhino est claire et simplifiée afin de ne pas perdre le concepteur. Les données chiffrées doivent être présentes de manière minimale, mais elles doivent permettre de comprendre le processus de conception.

Les sections développées sont réparties afin de permettre le développement du programme par étapes (figure 12). Elles sont triées dans l'ordre d'utilisation lors d'une itération du processus.

- Station météorologique
- Création d’un génome
- Préfiltre
- NBN Eurocode
- Simulation Butterfly
- Tri Génomes
- Création du génératif design
- Affichage

L'ensemble du programme est organisé de manière à éviter d'obtenir un code complexe et confus, avec des interconnexions multiples qui rendraient difficiles l'identification d’un problème rencontré. Des relais sont utilisés pour structurer l'ensemble visuel du programme.

Les couleurs sont utilisées pour définir les zones d'intervention du concepteur (en vert) et la capture des données brutes (en rouge). Les autres modules ou clusters sont représentés en gris ; il s'agit des étapes de calcul que l'utilisateur n'a pas besoin de comprendre lors de la conception.

Un système de flèches "jump" ainsi que du texte guident l'utilisateur à travers les différentes étapes. Les différentes entrées demandées sont annotées.

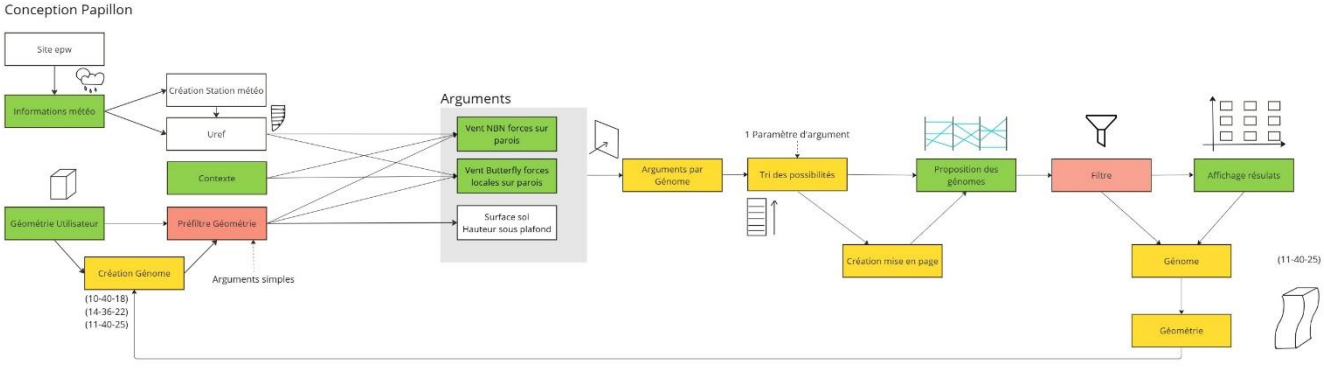


Figure 12 Processus de simulation pour l'évaluation des effets du vent sur les structures, création d'un design génératif par le logiciel Conception Papillon

4.1.1 Station météorologique

La création d'une station météorologique est choisie comme première section. Le vent est un phénomène variable selon les sites étudiés et le moment de l'année à prendre en compte (Lenka Kabošová, Katunský, et Kmet 2020). Les stations météorologiques présentes sur le territoire sont souvent installées dans des espaces ouverts tels que des aéroports (Carrega s. d.). Ces données sont compilées dans un dossier Epw. Le programme utilise ces données avant de les modifier selon un site précis proche d'une de ces stations.

Le plugin Ladybug permet d'effectuer cette opération (Sadeghipour Roudsari, Pak, et Viola 2013). Il contient une base de données regroupant des stations tout autour du globe. Les modifications liées au facteur vent sont effectuées par des modules présents dans le plugin.

Une fois les données de la station adaptées au site d'étude, les informations sont affichées dans IU de Rhino. Les données relatives à la vitesse et à la direction du vent sont captées pour être dirigées vers les autres modules (outputs). Une option est proposée pour télécharger la station créée afin d'avoir une sauvegarde des données du site.

4.1.2 Création Génomes

Le génome est l'ensemble des différents paramètres qui caractérisent une géométrie. Il se présente sous un format de texte facilement manipulable. Une fois implémentés dans la création géométrique pour une solution particulière, il est appelé à n'importe quel stade de la conception pour définir une géométrie. Ce code ADN de la forme est utilisé pour le déplacement des paramètres dans le code.

Sa création est encodée par l'utilisateur en fonction du nombre de paramètres à faire varier et des valeurs que peuvent prendre ces derniers. Une fois créés, les génomes sont testés dans la conception géométrique proposée et affichés dans l'IU du logiciel. Le nombre de combinaisons possibles augmente de façon exponentielle en fonction du nombre de paramètres et de leurs valeurs, selon la formule combinatoire.

$$S^e \qquad (8)$$

s = nombre de possibilité par paramètre
e = nombre de paramètre

4.1.3 Préfiltre

Avant de procéder au calcul des arguments liés au vent, un filtre est appliqué pour réduire le nombre de géométries impliquées dans le processus. Ce filtre permet d'éliminer des géométries en se basant sur deux critères principaux : la surface au sol et la hauteur sous plafond. La surface au sol est souvent un critère demandé par le maître d'ouvrage, tandis que la hauteur sous plafond détermine les spatialités intérieures.

Ces critères sont déterminés par un calcul effectué sur l'ensemble des géométries. Le nombre d'étages est également demandé afin de pouvoir segmenter le bâtiment par niveau.

Les génomes ne respectant pas les critères demandés sont retirés et ne sont pas pris en compte dans les calculs des arguments liés au vent. Cette étape permet de gagner du temps pour les arguments principaux et d'éliminer des possibilités non pertinentes.

4.1.4 Simulation CFD

La simulation par CFD repose sur les modules contenus dans Butterfly. Ce programme indépendant propose des outils de visualisation supplémentaires non disponibles dans "Conception Papillon". Cependant il peut être utilisé comme sous-programme indépendant et afficher une visualisation des lignes de courant ou des plans sondes des champs calculés. L'appel au plugin Anémone permet de réaliser des boucles récursives.

Pour la conception par design génératif, le solveur principal n'accepte qu'une géométrie par simulation. Un système de fonctionnement en parallèle est mis en place pour contourner ce problème. L'identification des géométries, la création des tunnels et le lissage des cellules acceptent quant à eux de tourner en parallèle en modifiant les identifications à chaque entrée. Cela permet la création de fichiers mémoires indépendants pour l'appel à OpenFOAM. Un maximum de 50 cas de géométrie peut être exécuté en parallèle avec les modifications apportées. Ce procédé réduit également le temps de calcul.

Les arguments choisis pour la conception sont le maximum et le minimum des valeurs obtenues sur le champ de pression. Les sondes sont placées sur la périphérie du bâtiment, correspondant aux maximums locaux de pression et de dépression sur le bâtiment. L'analyse effectuée est stockée dans un paramètre de sortie qui sera utile lors de l'affichage général final.

Les réglages par défaut sont déterminés lors des cas d’étude afin de minimiser le temps de calcul sans sacrifier la pertinence des calculs de simulation.

4.1.5 Eurocode NBN1

La traduction de l'Eurocode 1 est un sous-programme. Il est incorporé comme premier argument principal. Les entrées nécessaires à son fonctionnement sont le génome et les caractéristiques du vent repris dans les données de la station météorologique du site. Certains paramètres du site sont affinés pour l’étude de la topographie.

La sortie du module en tant qu'argument est une force maximale globale selon les états limites de service (ELS) ou les états limites ultimes (ELU), en fonction de leur prédominance.

4.1.6 Tri des génomes

Les arguments principaux sont recueillis par le cluster de tri. Chaque entrée est organisée selon le génome associé à la géométrie. Cinq options de tri sont disponibles, en fonction du choix du concepteur. L'objectif est de mettre en avant les éléments présentant les meilleures caractéristiques. Toutes les listes de données associées aux génomes sont triées de la même manière afin de conserver les valeurs spécifiques à chaque géométrie.

4.1.7 Création du génératif design

Chaque géométrie et ses caractéristiques associées sont lues par le cluster. Un graphique est créé dans l'IU de Rhino pour afficher l'ensemble des données obtenues par génome. Chaque génome est représenté par une ligne reliant ses valeurs caractéristiques, ce qui rend les données plus visuelles (figure13).

A ce stade, un deuxième tri est effectué par l'utilisateur. En observant le graphique de données, il peut supprimer les données en dehors d'un domaine défini. Pour cela, il déplace des curseurs représentant le pourcentage minimum et maximum qu'il souhaite conserver ou non. Ce système de sélection est possible pour chaque argument calculé et peut être appliqué à plusieurs en même temps. Si le concepteur décide de supprimer des géométries, la ligne représentant les données disparaît.

Ce dispositif est couramment utilisé dans les programmes de design génératif (Krish 2011). La nouveauté réside dans le contrôle apporté à la sélection des géométries.

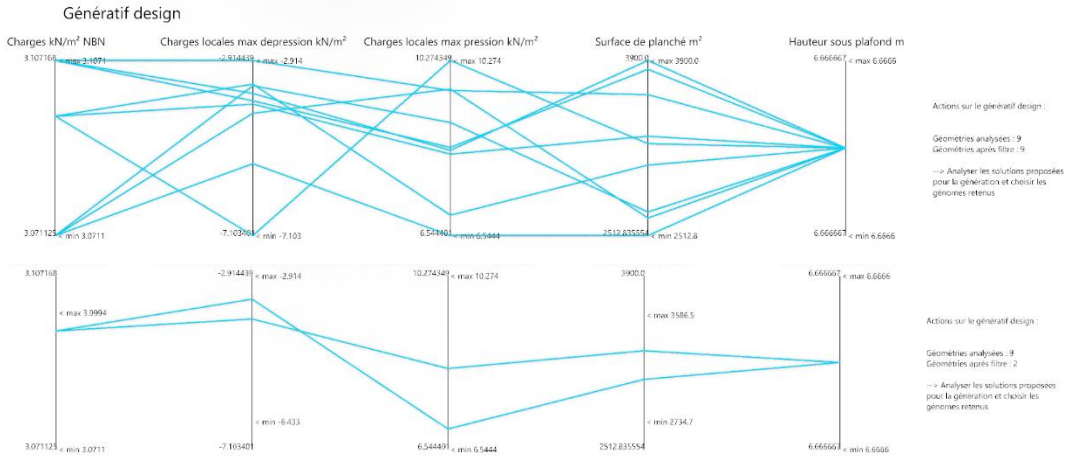


Figure 13 Interface graphique de l'utilisateur lors de l'étape de génératif design

4.1.8 Affichage

L'affichage des résultats reprend les étapes principales de création du modèle et est simplifié afin de ne pas gêner le processus de conception. Seules les données qui influencent la conception sont sélectionnées.

Une première partie de l'affichage correspond à la création du processus. Elle reprend les informations relatives au site extrait de la station météorologique, le nombre de possibilités éliminées en fonction du préfiltre et la convergence des résidus pour la simulation numérique afin de vérifier sa pertinence.

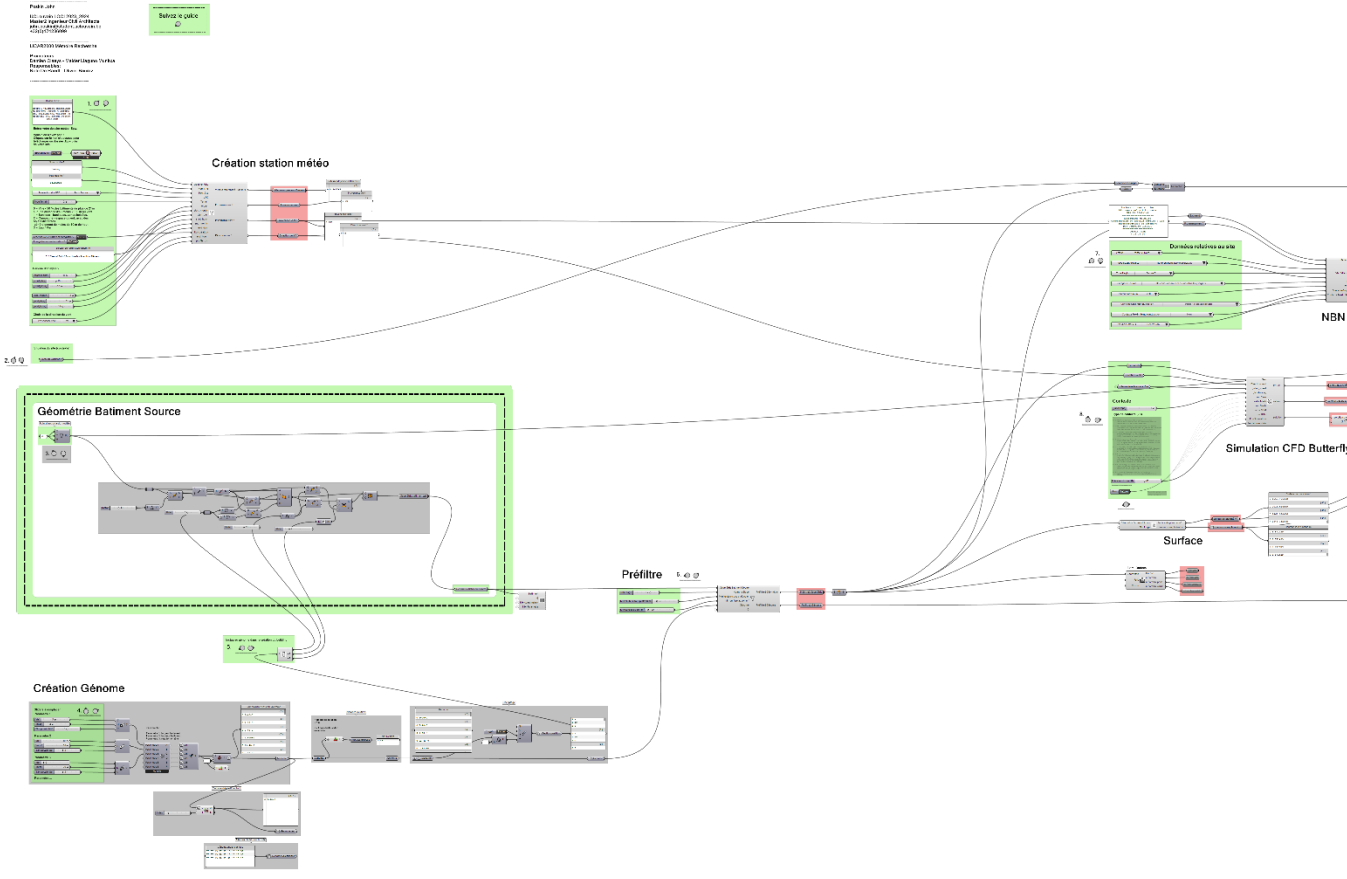
Ensuite, une partie sur le design génératif est proposée. Il est prédominant et agit comme le centre de contrôle principal dans l'IU de Rhino.

Les modèles restant sélectionnés par l'utilisateur sont ensuite affichés selon une grille structurée et triée par la section 6. Cet affichage reprend la géométrie en fonction du génome, le contexte global d'entrée ainsi qu'une visualisation des forces appliquées sur les parois du bâtiment. Cette étape, combinée avec la sélection des génomes, permet des allers-retours entre la forme et les données. L'utilisateur visualise concrètement les effets du vent sur son ouvrage sélectionné.

L'IU de Gh est conçue pour ne pas perdre l'utilisateur dans les programmes. Des chemins sont créés pour faciliter le déplacement entre les étapes. Des annotations sont positionnées pour expliquer les entrées ou guider l'utilisateur. Les clusters sont rendus plus intuitifs en changeant de noms et de symboles.

Toutes les fonctionnalités des programmes et leurs explications sont disponibles dans la notice utilisateur (Annexes E). Un exemple de démarche y est également détaillé.

Conception "Papillon"



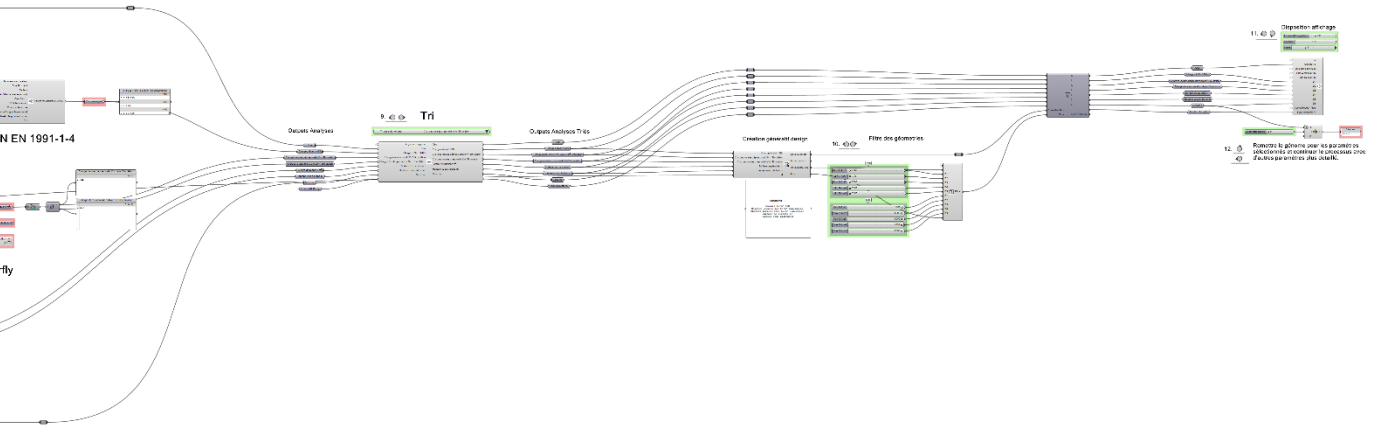


Figure 14 Définition algorithmique du logiciel Conception Papillon, conçu de manière paramétrique dans Grasshopper

4.2 Sous-programme

Cette partie détaille la conception des sous-programmes pour les arguments principaux dans le programme « Conception papillon ».

4.2.1 CFD Butterfly

Dans un premier temp un choix dans les plugins de simulation par CFD est effectué. Différents essais sont réalisés pour juger de la capacité et de l'installation des différents programmes. Deux logiciels se démarquent : ©Eddy3D et ©Butterfly par leurs facilitation de prise en main et leurs IU . Ils sont intégrés à la plateforme Gh et utilisent l'IU de Rhino. Leur utilisation par la communauté montre une prédominance de Butterfly (figure15), avec 37 % contre 11 % pour Eddy3D (Hu et al. 2023).

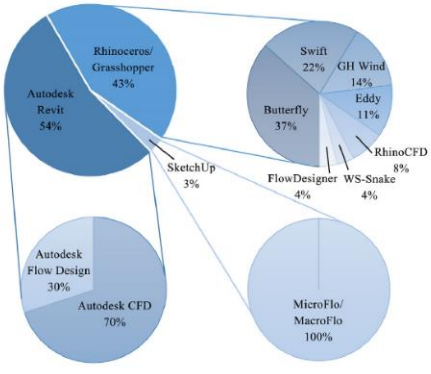


Figure 15 Proportion des études sur différentes plateformes et proportion des études sur les différents plugins de CFD basés sur ces plateformes (Hu et al. 2023)

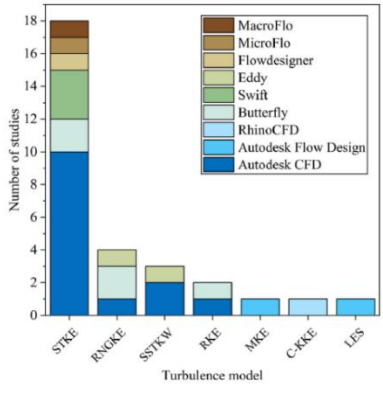


Figure 16 Nombre d'études selon les modèles de turbulence appliqués pour les simulations CFD (Hu et al. 2023)

Les logiciels sélectionnés sont totalement gratuits et accessibles en libre accès. Les concepteurs qui souhaitent utiliser ces outils de conception n'ont pas besoin de demander de licences ou de versions d'essai. De plus, on remarque une documentation étendue (figure16), comprenant des forums et des plateformes d'aide dédiées à ces logiciels.

D'un point de vue échange et compatibilité des données, Butterfly est le plus compétitif (Brook-Lawson et Holz 2020) car il fait partie de la suite Ladybug, qui comprend un ensemble d'outils utilisés par les architectes et les ingénieurs dans de nombreux domaines comme la lumière. Les codes internes sont écrits en Python.

En ce qui concerne les variables d'entrée, les deux programmes proposent un schéma similaire (Van Leer et Powell 2010) , où l'on retrouve les entrées classiques pour les CFD. Le déroulement des calculs se fait en trois phases distinctes : pré-traitement, traitement et post-traitement. La structure des programmes peut être simplifiée en sept étapes principales (figure 17).

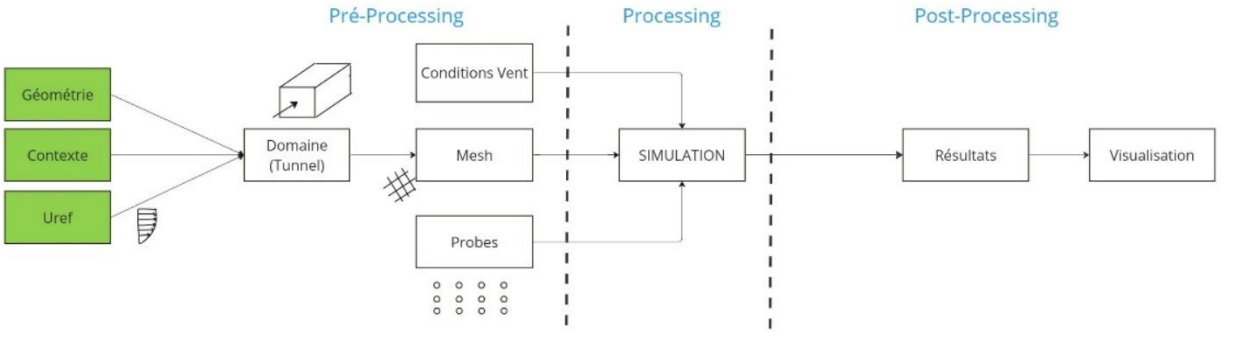


Figure 17 Schéma de processus général des plugins CFD

Enfin, le programme de résolution par CFD appelé par les deux plugins est OpenFOAM, qui fonctionne avec un solveur ©BlueCFDCore2017 écrit en C++ (Chen et al. 2014).

Il est choisi d'utiliser Butterfly comme base pour le sous-programme de CFD car il est le plus utilisé, comporte des échanges multiples avec d'autres plugins de la série Ladybug et intègre le traitement des données Epw. pour capturer les données météorologiques du site .

La structure générale du codage reprend les étapes de calcul par le plugin. Les caractéristiques de la simulation de flux extérieur sont implémentées pour les différents modules de Butterfly. Les résidus des calculs de simulation sont affichés pour confirmer la convergence du modèle.

En amont des modules spécifiques au CFD, une série d'actions est programmée. Premièrement un appel des données .Epw par les options offertes par Ladybug est implémenté. Elles sont affichées sur l'IU de Rhino pour mettre en situation la simulation. La géométrie et le contexte sont déterminés de deux façons possibles. L'une réside dans l'utilisation de la commande « set Geometry» disponible dans Gh. L'autre fait usage des modules présents dans LunchBox pour importer des données stockées sur Excel. Les sondes sont placées selon les points que l'on souhaite analyser.

En aval du calcul par les CFD se trouve une section consacrée aux différents types d'affichage. Les données extraites du calcul sont la pression et la vitesse du vent sur les sondes placées en amont.

Une visualisation par champs de vecteurs est obtenue par division d'un plan en un quadrillage de points. Cette représentation est statique et est accompagnée d'une légende graphique. Chaque valeur du champs de pression ou de vitesse peut être affichée par l'utilisateur s'il souhaite analyser une région spécifique. Les deux autres représentations utilisent le plugin Anémone permettant de faire des itérations successives d'un même module. Cet affichage temporel permet d'observer les vitesses du vent (figure 18). Il utilise les vecteurs pour se déplacer dans le champ de sondes déterminé. Une accélération du flux observé montre une vitesse élevée du vent.

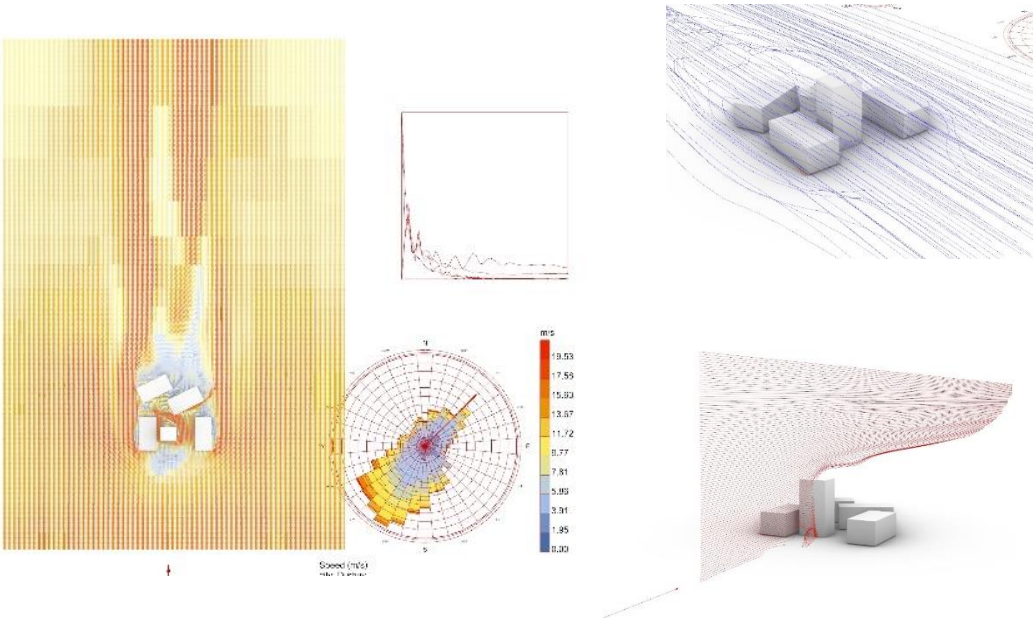
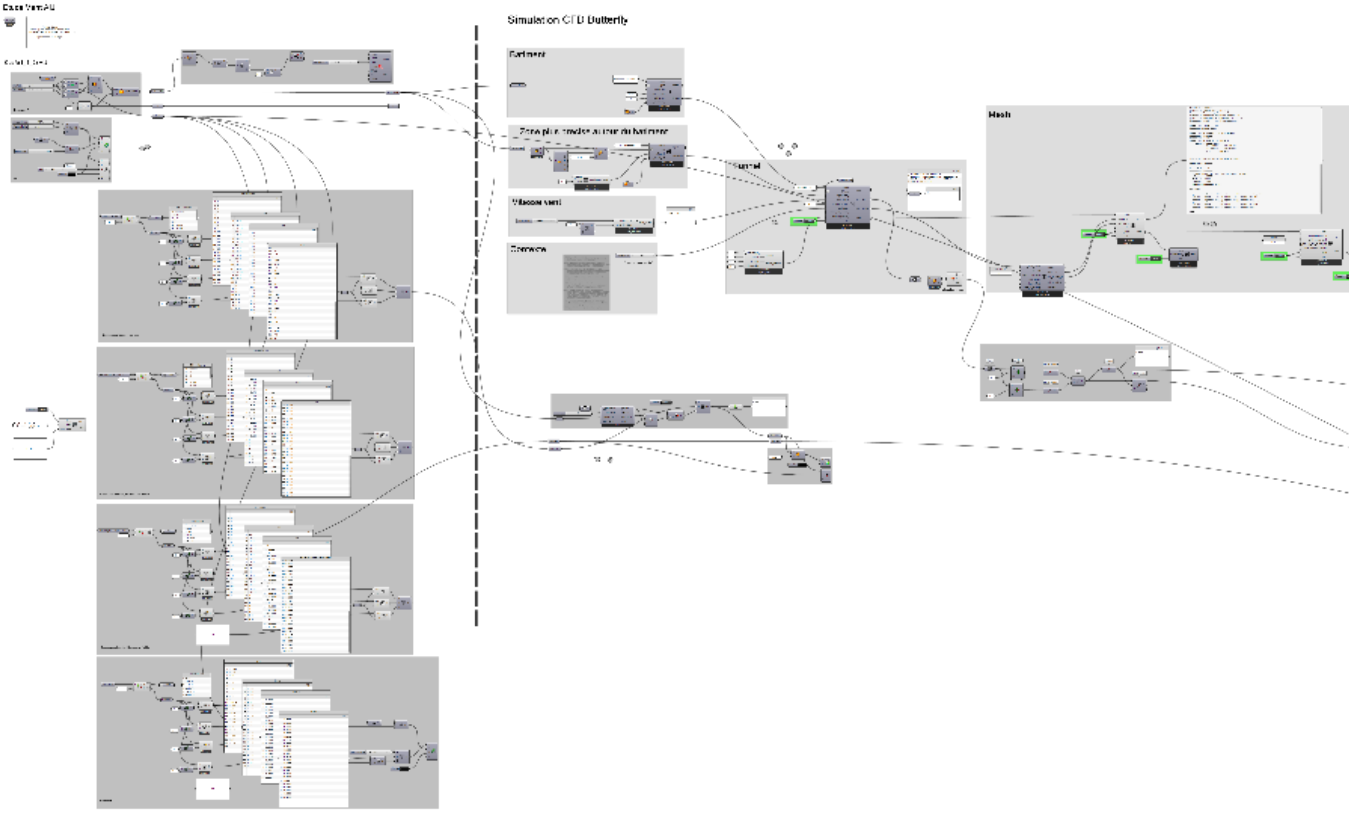


Figure 18 Les résultats d'analyse du vent par affichage pour le logiciel de simulation CFD .

Pour le programme principal, seuls les vecteurs de pression sont représentés sur le milieu des parois de la géométrie étudiée. En utilisant une nouvelle fois Lunchbox les données relatives à la simulation peuvent être exportées vers Excel.

Le sous-programme est regroupé sous deux niveaux de cluster pour permettent une utilisation plus intuitive de la simulation par CFD.


Simulation CFD Butterfly
Mesh

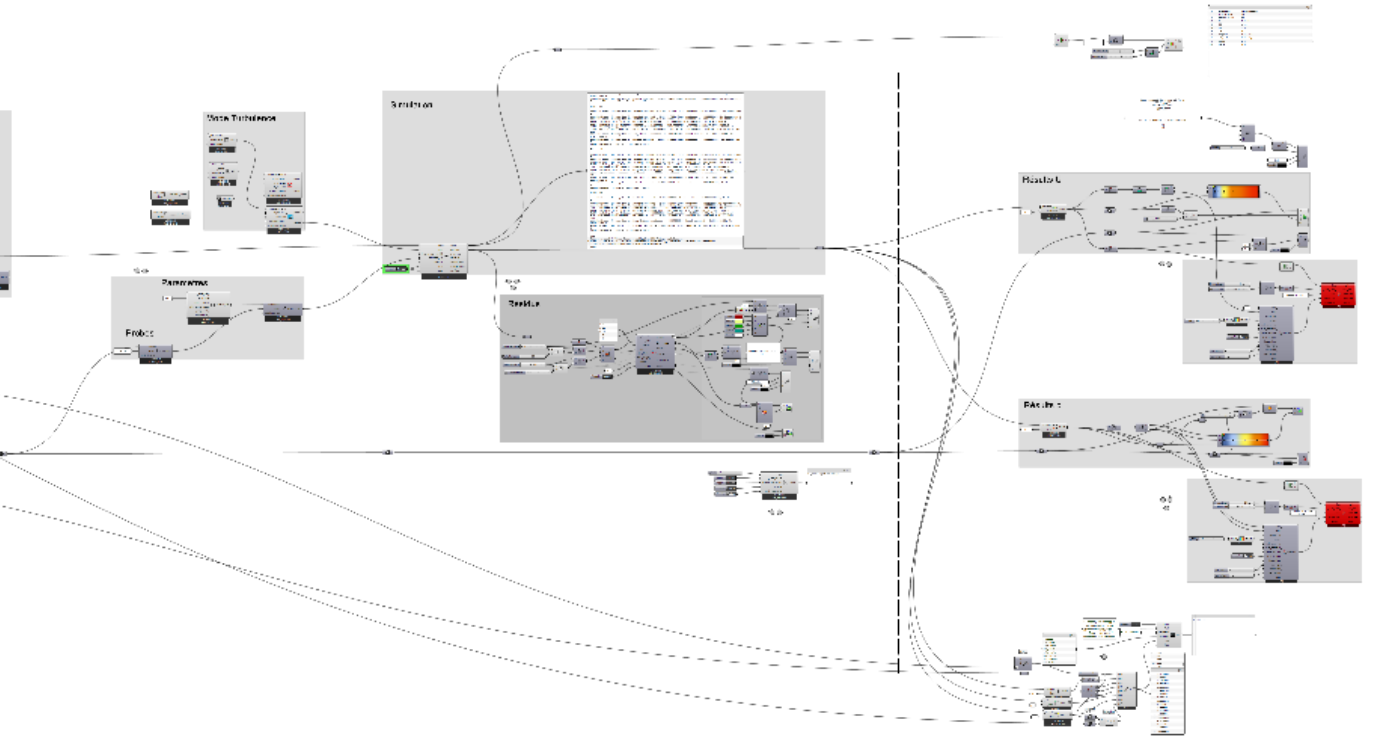


Figure 19 Définition algorithmique du sous-programme de simulation par CFD, conçu de manière paramétrique dans Grasshopper

4.2.2 Eurocode 1

Pour la création de ce sous-programme comme argument principal de la « Conception Papillon », la norme de l'Eurocode 1 Partie 1-4 est choisie comme texte de référence.

La conception du codage sur Gh (figure20) s'inspire de la structuration dans la résolution des calculs dans la norme (Clavaud 2014)(figure21). Une première phase capture la géométrie a étudier pour en déterminer le cas en présence et différencier les faces au vent, sous le vent, latérales et la toiture. Cette identification permet au programme de savoir vers quels types de calcul s'orienter pour la suite en fonction de la force et de la direction du vent dominant.

Une deuxièmement étape consiste à demander les caractéristiques du site, les valeurs du vent et le contexte aux alentours afin de déterminer les nombreux coefficients présents au début des calculs. Une fois ces données encodées, une série de fonctions mathématiques est opérée pour obtenir la vitesse de référence (Vb), la vitesse moyenne (Vm(z)) et la pression dynamique de pointe (Qp(z)) .

La phase la plus conséquente est celle de la division des faces de la géométrie en régions spécifiques selon le cas déterminé. Les façades divisées selon leurs profondeurs pour s'adapter aux différents phénomènes de vent présents. Deux configurations de toit sont implémentées dans le calcul sur Gh sur les 8 cas détaillés dans la norme. Ainsi il est opéré la division d'un toit plat ou d'un toit à double pans en régions comme définie par l'Eurocode.

Les régions obtenues sur la géométrie correspondent à des coefficients de pression extérieure (Cpe10 et Cpe1). La lecture des abaques, proposée dans le document, est encodée afin de permettre une lecture selon les cas rencontrés. Les calculs du Cpe et du coefficient de pression intérieure (Cpi) sont effectués lors de la phase suivante. Une fois calculée, la valeur obtenue est attribuée à la région qui la caractérise par l'utilisation des structures de données par arborescence. Les pressions et la force exercées sur chaque région sont obtenues avec l'utilisation du coefficient structural avec un calcul aux ELS rares et aux ELU.

La dernière partie du programme offre l'exportation des données obtenues vers un Excel et permet de visualiser les résultats dans l'IU de Rhino. Pour le programme principal seule la force maximale à l'ELS ou ELU est retenue.

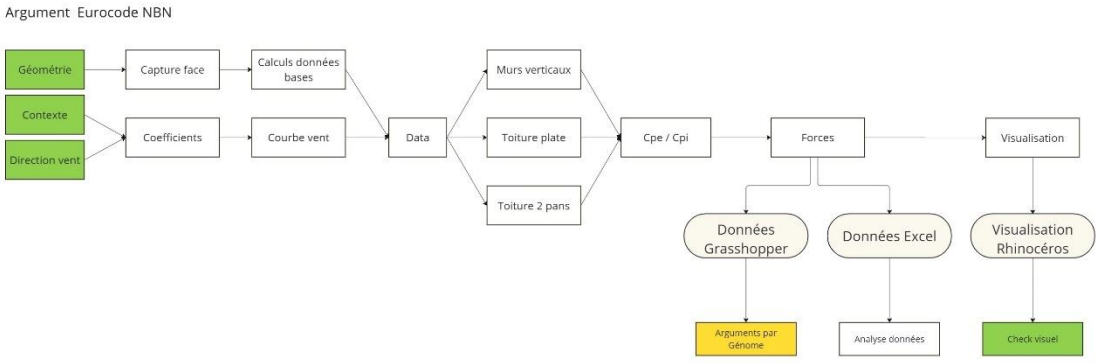


Figure 20 Processus de simulation pour l'évaluation des effets du vent sur les structures, par le sous-programme NBN

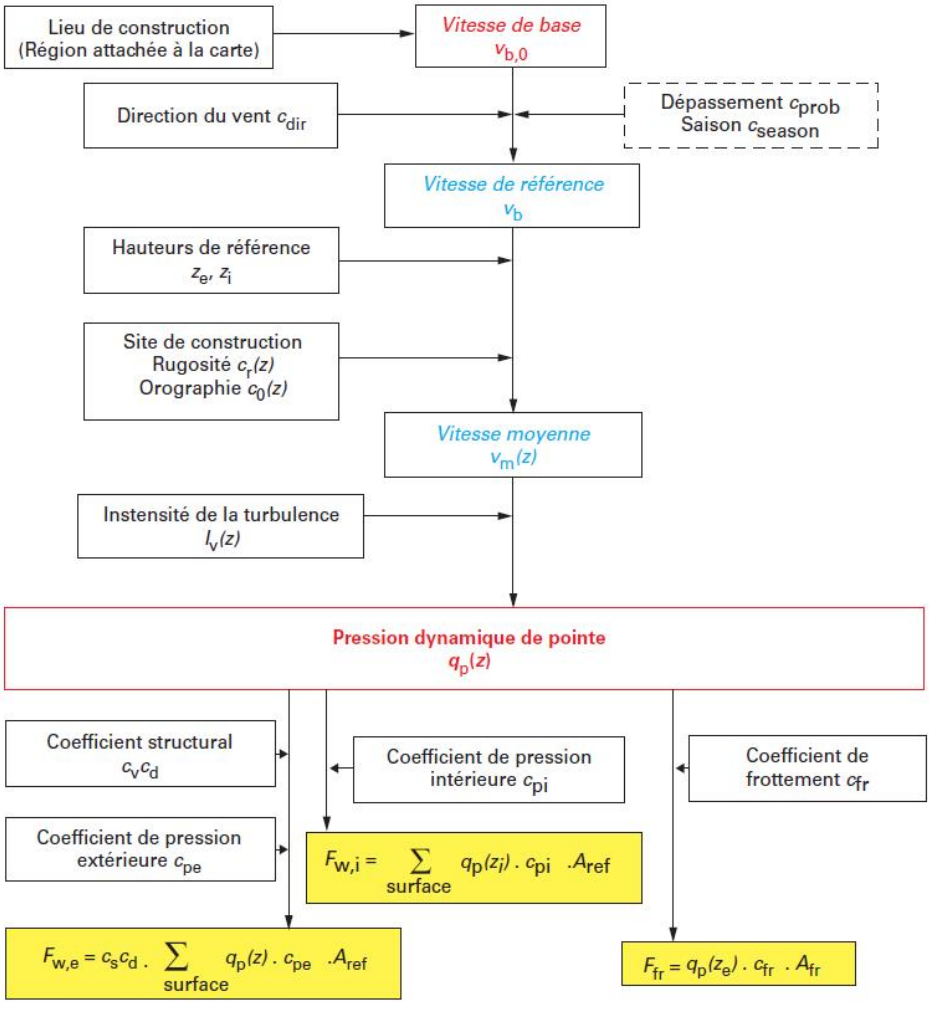
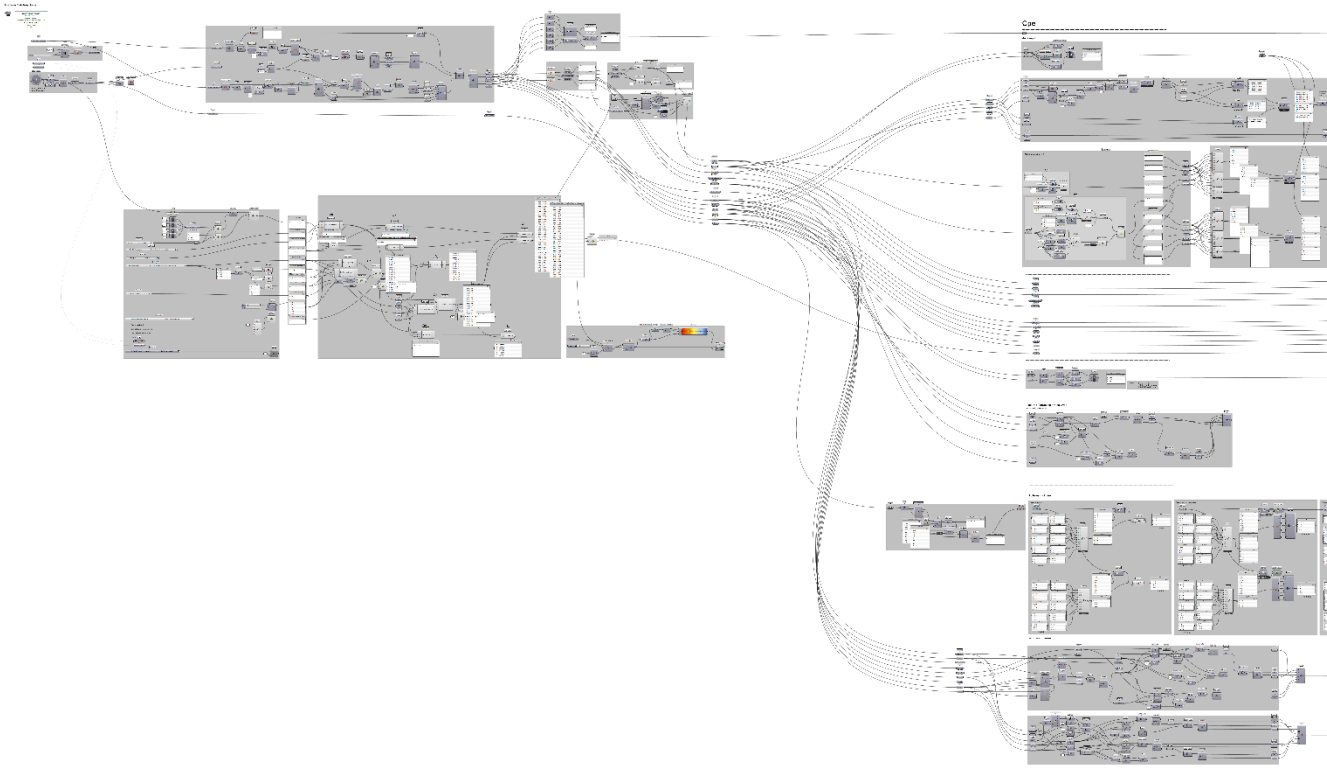


Figure 21 Processus de calcul pour l'évaluation des effets du vent sur les structures, par l'Eurocode (Clavaud 2014)



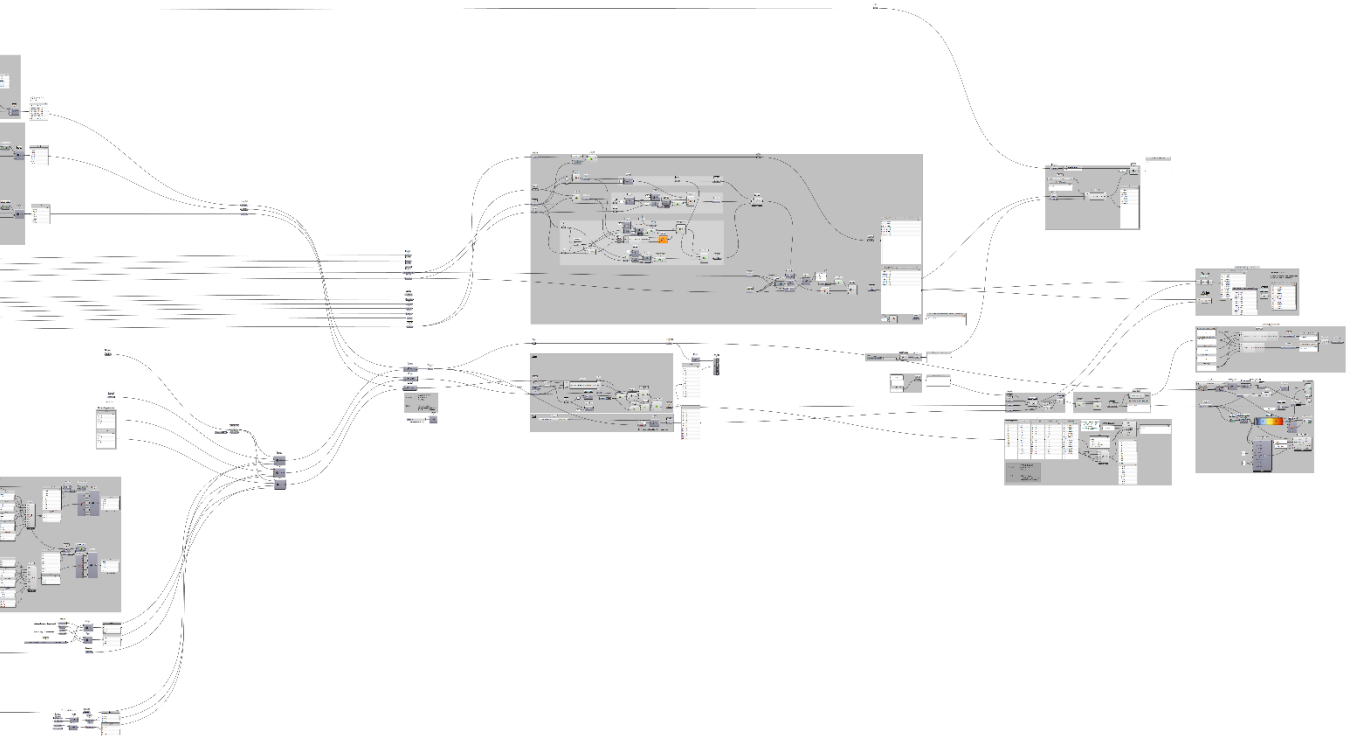


Figure 22 Définition algorithmique du sous-programme de calcul par l'Eurocode, conçu de manière paramétrique dans Grasshopper

4.3 Logiciels utilisés

Des fonctionnalités et des interfaces de logiciels existants sont utilisés pour la création du programme « Conception papillon » et ses sous-programmes. Ils sont disponibles selon les modalités d'utilisation de chacun (Annexe F). Ils permettent de réaliser des tâches particulières durant le déroulement du processus de conception. Lors de l'utilisation du programme principal, seules des bases de connaissance dans les manipulations de Gh sont nécessaires.

Programme	**Version**	**Editeur**	**Mise-à-jour**
Rhinoceros 3D	7 SR36	Robert McNeel & Associates	21-11-2023
Grasshopper3d	5	Robert McNeel & Associates	12-12-2023
Ladybug	1.8.0	Ladybug Tools LLC	23-03-2024
Honeybee	0.0.66	Ladybug Tools LLC	27-08-2020
Butterfly	0.0.05	Ladybug Tools LLC	23-02-2019
Epw maps	/	Ladybug Tools LLC	2-06-2024
Eddy3D	0.4.8.0	Eddy3D	4-03-2024
Bifocals	/	Marc Syp	23-02-2016
Lunchbox	2024.2.9.0	Nathan Miller	16-04-2024
Karamba3D	2.2.0	Karamba3D	22-02-2024
Anémone	0.1	Mateusz Zwierzycki	4-12-2013
Octopus	0.4	Robert Vierlinger, Christoph Zimmel	5-12-2018
Galapagos	/	David Rutten	10-11-2023
OpenFOAM	2312	OpenCFD Ltd (ESI Group)	31-12-2023
BlueCFD-Core	2017-2	FSD Portugal	10-02-2017
ParaView	5.12.0	KitWare	29-08-2023
Visual Studio	1.89.1	Microsoft	9-05-2024
Excel	2021	Microsoft	5-10-2021

5 Cas étude

5.1 Méthodologie

Pour le programme de "Conception Papillon", deux sous-programmes d'analyses au vent sont créés pour extraire des données des arguments liés aux vent.

Le premier code est composé des éléments Butterfly de la suite Ladybug, un CFD dont la dernière mise à jour date du 23 février 2019 . Des tests sont réalisés sur ce programme suivant un modèle d'étude défini. Ainsi la base de données de l'Institut d'Architecture du Japon (IAJ) sont utilisés. Ce modèle nous permet de fixer les paramètres essentiels lors du calcul et de la compilation des données. Il permet également de vérifier la corrélation entre les plugins testés et les expériences réalisées.

Le deuxième apport dans le calcul du vent est entièrement codé sans l'aide de logiciels annexes de CFD. Il se base exclusivement sur l'Eurocode 1 Partie 1-4 "Actions du vent sur les bâtiments". Des exemples de calculs réalisés dans le domaine de l'ingénierie sont trouvés pour comparer les résultats et analyser les comportements du programme. Ce cas est choisi car il offre un détail de calcul par étape et il distingue les différentes possibilités rencontrées lors d'une analyse de vent selon la norme.

Ces deux programmes rentrent dans la fabrication du programme principal. Une fois les tests de pertinence réalisés, une conception concrète est appliquée sur un projet étudié lors d'un atelier d'architecture de bachelier à l'Uclouvain. L'objectif est de mettre en pratique les logiciels pour observer leur comportement.

Cette étape permet de comprendre les points faibles des programmes et de pouvoir implémenter au mieux les paramètres par défaut qui sont utilisés pour le programme final. Les données étant chiffrées et visuelles, deux méthodes de comparaison sont utilisées en parallèle. Le logiciel de gestion de données Excel est utilisé pour les données chiffrées et l'interface de Rhinocéros fournit les éléments visuels.

Il est également important de préciser les limites d'utilisation des deux programmes et dans quelles conditions les attentes dépassent leurs capacités. Comment poursuivre le développement des outils proposés pour offrir plus de flexibilité lors de l'utilisation par le concepteur ? Le facteur temps est un indice primordial dans les différents programmes car il doit respecter les ordonnances du cahier des charges.

5.2 Cas IAJ

Pour confirmer la pertinence des résultats obtenus dans le sous-programme de CFD, deux expériences tirées des cas IAJ sont utilisés.

Les objets d'étude sélectionnés sont les cas A et D de l'IAJ, réalisés lors d'expériences parues dans de nombreux articles entre 2002 et 2006. Ces expériences sont menées par un groupe de chercheurs provenant de plusieurs universités du Japon ainsi que des scientifiques du domaine privé. Un ensemble de sept cas d'étude, allant d'un modèle simple rectangulaire à la modélisation d'une partie de la ville, sont effectués en soufflerie physique et comparés avec des simulations CFD pour déterminer les facteurs clés des simulations (Mochida, Tominaga, et Yoshie s. d.; Tominaga et al. 2008; Zhang, Waibel, et Wortmann 2020).

Ces cas ont été choisis car l'ensemble des données chiffrées des expériences sont publiques et de nombreux articles proposent des descriptions détaillées des expériences effectuées . Par ailleurs, une étude similaire avait eu lieu pour la simulation du vent dans la ville d'Oklahoma (Pavlowsky et Gliedt 2021), mais les données sont beaucoup moins commentées dans la littérature.

Un autre critère de choix est la similitude dans les paramètres choisis avec les recommandations de la Coopération européenne dans le domaine de la recherche scientifique et technique (COST) pour les simulations de vent. Ces règles sont reprises par l'article « "Action C14 "Impact du vent et des tempêtes sur la vie urbaine et l'environnement bâti » du groupe de travail 2-CFD de la COST datant du 1er mai 2007. L'ensemble de ces conditions peut être retrouvé dans des "Guidelines" publiées (Schatzmann et Britter 2011).

Les études de comparaison aux CFD reprennent les mêmes hypothèses que les programmes Butterfly et OpenFOAM, avec un calcul au large coefficient de Re. De plus, de nombreux autres programmes de simulation (Dlubal, Rwind, Eddy3D, RhinoCFD) utilisent les cas IAJ comme moyen de vérification de leurs résultats (Paris et al. 2023) , ce qui augmente le nombre de possibilités de comparaison.

5.2.1 Cas A (1 ;1 ;2)

Le modèle le plus simple de l'IAJ est le "shape building model". Il décrit la répartition des flux d'air autour d'une géométrie simple rectangulaire. Les paramètres d'entrée sont trouvés dans un tableau Excel (annexes X). Le modèle est analysé par un tunnel à vent de section de mesure 1,80 x 1,80 x 1,80 à l'échelle 1/400. Tous les résultats sont normalisés, mais la géométrie utilisée originellement a une hauteur de 30 mètres (Hu et al. 2023).

Les sondes de calcul pour le relevé du vent sont disposées selon trois plans définis. Deux plans horizontaux sont placés respectivement à hauteur d'homme et au milieu de la hauteur du modèle. Le troisième plan est vertical et se situe au centre de la géométrie sur son axe de symétrie (figure23-24). Les données mesurées par les sondes sont la vitesse du vent dans les 3 directions, la pression et les contraintes.

Les paramètres d'entrée du profil de vent ont été déterminés à la suite d'observations sur le site. Le flux d'air entrant pour la simulation suit un profil défini par les scientifiques et retranscrit dans le tableau "Inflows" (Annexes X). Ce flux d'air est généré par un tunnel dit "turn-over", et le profil évolue donc dans le temps pour l'expérience réalisée. L'hypothèse selon laquelle la géométrie ne change pas les conditions d'entrée initiales a été prise pour pouvoir comparer le sous-programme au cas A.

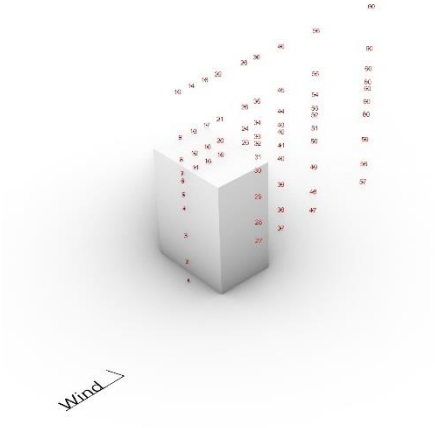


Figure 23 Test case A (2:1:1)

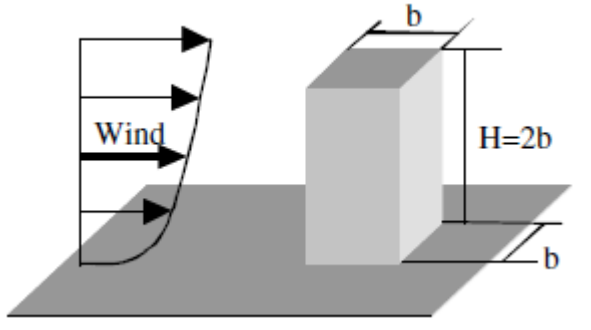


Figure 24 Test case A (2:1:1) par AIJ (Tominaga et al. 2008)

5.2.1.1 Condition aux limites

Les conditions aux limites sont identiques aux modèles proposés par la COST (Schatzmann et Britter 2011). Butterfly reprend les recommandations européennes en termes de conditions. Les réglages par défaut du programme ne doivent pas être modifiés. L'outil proposé par Ladybug reprend quand même la possibilité de changer ces réglages, mais ils sont surtout utilisés pour le calcul de flux intérieurs que propose également le programme.

5.2.1.2 Tunnel

Le tunnel est un élément principal dans Butterfly, il est créé lors du prétraitement en même temps que l'encodage du nom de la simulation. Un paramètre d'entrée est réservé au dimensionnement du tunnel. Il prend comme référence la hauteur maximale de la géométrie implémentée dans Gh pour déterminer la distance entre les parois et le modèle (figure26). Cette distance peut être modifiée pour correspondre aux normes proposées par la COST et également conseillées par la société Buildwind (Srikumar, Gambale, et Mosca 2023). Des dimensions sont prescrites par le groupe et la détermination du tunnel afin d'éviter une accélération excessive du fluide (figure25).

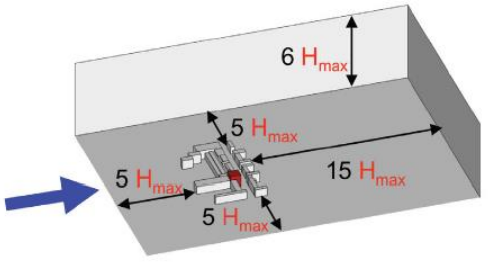


Figure 26 Domaine du tunnel selon le COST (Srikumar, Gambale, et Mosca 2023)

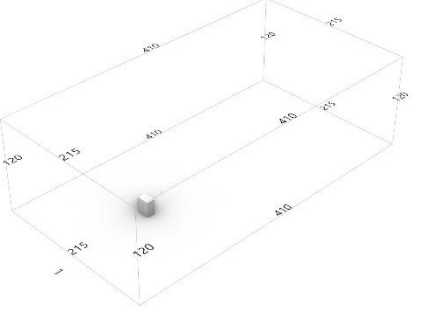


Figure 25 Domaine du tunnel

5.2.1.3 Profil vent

Le flux d'air provenant de la soufflerie est affecté par le relief, la rugosité du terrain et la friction des obstacles. La couche d'air la plus proche du sol est influencée par ces variables. Une couche limite atmosphérique doit être prise en compte sur le profil de l'écoulement du vent. Une fois encore, Butterfly reprend les critères de la COST pour un profil en fonction logarithmique dans les dimensions verticales :

$$U = \frac{U^*}{K} \ln\left(\frac{z - z_g + z_0}{z_0}\right) \qquad (9)$$

$$U^* = K \frac{U_{ref}}{\ln\left(\frac{z_{ref} + z_0}{z_0}\right)} \qquad (10)$$

Href hauteur de référence
Uref vitesse de référence à Href
K constante de Von Karma
z coordonnées verticales
z_0 rugosité des surfaces
z_g conditions initiales à la surface

Pour correspondre à l'expérience du cas A, la vitesse de référence doit correspondre à 6,65 m/s à une hauteur de 30 m pour une rugosité de 0,002 m. Pour les calculs du programme principal, les données des stations météorologiques indiquent, par convention, la vitesse de référence à 10 m au-dessus du sol.

Un problème empêche la récupération des données dans le code interne de Butterfly : il ne permet pas d'entrer une autre valeur que celle par défaut du système. Cela ne pose pas de problème pour la concordance avec les stations météorologiques. Une solution par essais-erreurs est employée pour faire correspondre le diagramme des profils de vent sur un domaine nécessaire, afin de ne pas fausser les données aux points de sondage (figure 27).

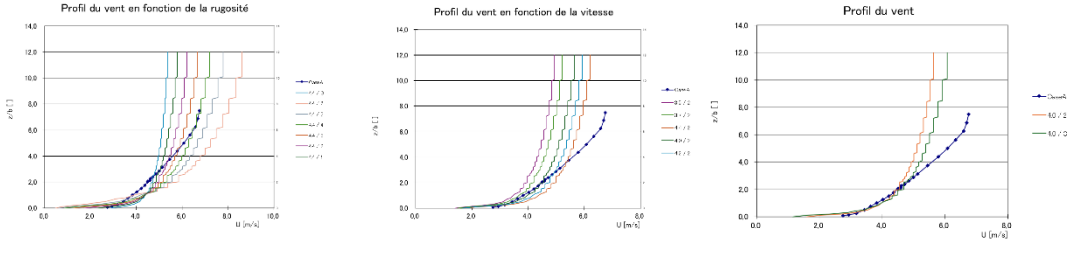


Figure 27 Concordance du profil du vent par essais-erreurs cas A

5.2.1.4 Cellules

Les cellules sont un critère important de la simulation car elles déterminent la taille de la grille tridimensionnelle utilisée. Dans Butterfly, de nombreux éléments leur sont attribués. Une division préconfigurée est disponible par la boîte "gradingMesh"(Gisen s. d.). Elle permet de concentrer les cellules près de l'endroit observé et de les augmenter lorsque le calcul n'est plus déterminant (figure 28-29). La taille de la surface primaire de la cellule est la variable durant les tests de la simulation. On regarde l'influence des différentes façons de diviser le domaine sur le temps de calcul et les concordances avec les données expérimentales.

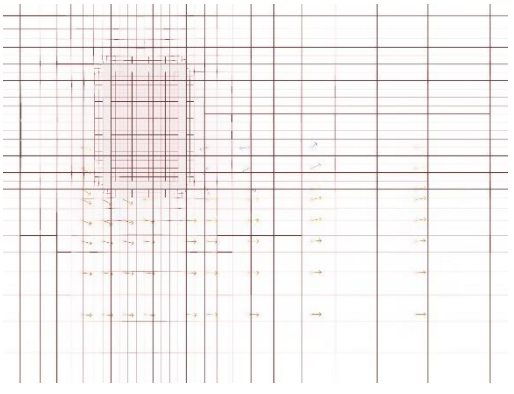


Figure 28 Vue de haut des maillages

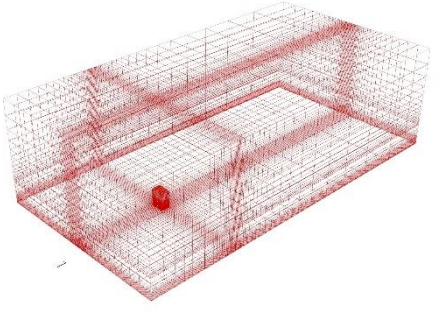


Figure 29 Vue globale des maillages sur le domaine

5.2.1.5 Valeurs caractéristiques

L'ordinateur et le processeur utilisés restent les mêmes durant toute la phase de test[1]. Les valeurs du CPU sont reprises dans la note des données caractéristiques (Annexe B). D'autres valeurs comme les versions des différents programmes de calcul utilisés peuvent être trouvées à cet endroit.

Le sous-programme de simulation de vent par CFD est repris dans l'ensemble des tests proposés. Il présente les différents paramètres abordés et permet une visualisation des résultats graphiques dans l'IU de Rhino. Les données plus détaillées sont reprises par le plugin Lunchbox pour les exporter vers des tableurs Excel (Annexe B).

Le nombre d'itérations pour les calculs est fixé à 100 pour s'assurer que la solution converge et pour augmenter le temps de calcul. Le temps de convergence est observé pour chaque test.

[1] Surface Laptop Studio Model1964 i5

5.2.1.6 Résultats et observations

Une batterie de 8 réglages différents pour la taille des cellules sont opérés (figure31) . Ils visent à tendre vers une solution contenant un taux de corrélation le plus élevé possible avec un temps de calcul minimum. Les résultats obtenus sont comparés sur les sondes du plan vertical puis sur le plan horizontal à mi-hauteur du bâtiment (figure 30).

Cas	1	2	3	4	5	6	7	8
Refinement level geometry								
max	1	1	1	1	1	2	1	1
min	1	1	1	1	1	2	1	1
Nbr Laye	3	3	3	1	3	3	3	3
Refineme	2	2	2	2	1	2	2	1
Tunnel Grading								
Cell size	1	1	1	1	1	1	0.5	1
Cell to ce	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
Wake offs	2	2	2	2	2	2	2	2
Height of	5	30	30	5	30	30	30	30
Snappy hex mesh (SHM)								
max	1	1	2	1	1	2	1	2
min	1	1	2	1	1	2	1	2
Meshes	90600	110600	110600	90600	110600	145138	223886	110600
Iterations	100	100	100	100	100	100	100	100
SHM time	25.3	41.26	26.72	25.8	21.8	33.3	82.96	21.8
Computa	54	125	72	56	68	97	154	67
Converge	40/100	52/100	48/100	40/100	44/100	52/100	52/100	44/100
		Height offset	SHM	idem Cas1	Ref region	Refinement lvl	Grading	idem Cas5

Figure 31 Batterie de réglages avec leurs caractéristiques propres

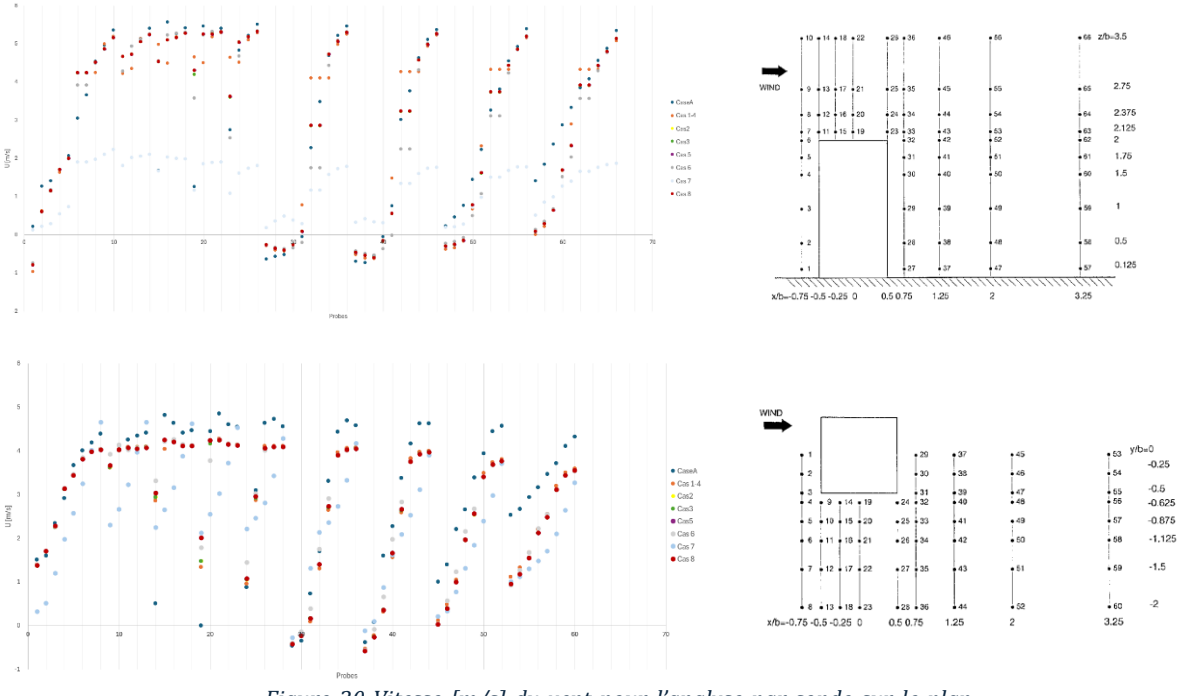


Figure 30 Vitesse [m/s] du vent pour l'analyse par sonde sur le plan vertical et sur le plan horizontal par le programme CFD

Une première observation est faite sur les temps de calcul (tableau 1). On remarque que l'augmentation du gradient sur toute la hauteur du bâtiment permet une amélioration des résultats de 7 % mais augmente le temps de calcul d'un facteur 2 en raison de la présence de plus de cellules. Ce temps de calcul peut être absorbé par une augmentation de la taille pour le lissage "SnappyHexMesh". La simulation a tendance à diminuer son temps de compilation si le niveau de raffinement diminue. Lors du test 7, on remarque que lorsque le volume de la cellule de base diminue de 2, le temps de création des cellules augmente d'un facteur 4 et double le temps de calcul.

Lors de l'analyse des résultats sur les sondes sur le plan vertical, plusieurs autres caractéristiques se dégagent. Les sondes 15, 19 et 23 situées sur le haut du bâtiment posent problème pour la simulation. Seul le test 5 s'en approche. Il s'agit de l'endroit où les turbulences liées au nombre Re apparaissent et agissent sur la paroi du toit. Certaines valeurs successives sont parfois identiques dans le même test. On observe les emplacements des cellules par rapport aux sondes et l'on remarque qu'une cellule englobe plusieurs points de contrôle. Les valeurs sur les faces au vent et sous le vent correspondent à l'expérience de l'IAJ pour 7 des 8 tests effectués.

On remarque le même résultat pour les sondes sur le plan horizontal, les données face et sous le vent correspondent mais des problèmes surviennent lors des sondes 14 et 19 situées dans la zone de turbulence formée par l'arête du bâtiment. Une différence est à souligner lors du test 7 où les valeurs semblent divisées par un coefficient 3.

Les points de traînée situés derrière la zone de turbulence correspondent dans la majorité des cas. Cela se confirme lors d'une observation par un plan de marquage coloré (figure 32-33), où l'on constate une bonne réaction du flux suite à la rencontre avec la géométrie.

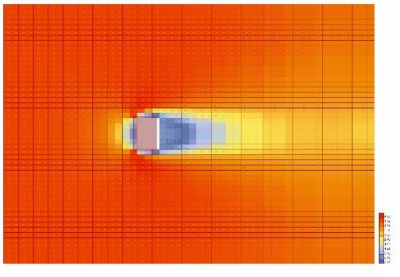


Figure 32 Vue en plan de la vitesse du vent obtenue par simulation au niveau des piétons (H = 2 m)

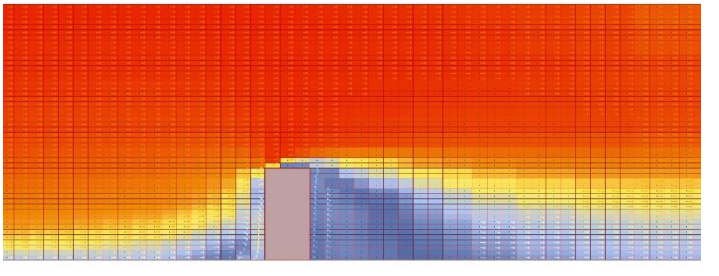


Figure 33 Vue en coupe de la vitesse du vent obtenue par simulation au niveau de l'axe de symétrie du bâtiment

5.2.1.7 Conclusion cas A

Les observations permettent de tirer certains enseignements utiles pour les choix des paramètres de la simulation CFD :

- Le nombre de points autour du bâtiment doit être fortement augmenté en nombre pour apporter la précision dans les zones de turbulences. Ces zones tourbillonnaires se trouvent sur les faces du voisinage et la partie première du toit face au vent.

- Les sondes situées loin derrière la géométrie n'influencent pas les calculs sur la surface. Il n'y a pas de phénomène de retour du vent après qu'une distance de la largeur de la base ait été dépassée. Une diminution du tunnel sur l'arrière de la géométrie peut être appliquée en passant de 15H à 5H, réduisant ainsi le nombre d'opérations à faire par le programme.

- Les régions face au vent et sous le vent ont une très forte corrélation avec l'expérience ; la pression exercée sur la géométrie est grande mais ne fournit pas de turbulence tourbillonnaire non prise en compte par le programme.

- La convergence des solutions arrive aux alentours de la 50e itération, ce qui conclut que les temps de calcul obtenus peuvent être divisés par 2.

Le test numéro 5 est retenu pour les réglages du programme de « conception Papillon » car il fournit un taux de corrélation de 80% et 87% (figure 35-36) tout en consommant le moins de temps de compilation des calculs. On peut estimer entre 30 et 40 secondes le temps d'une simulation de vent sur une géométrie simple.

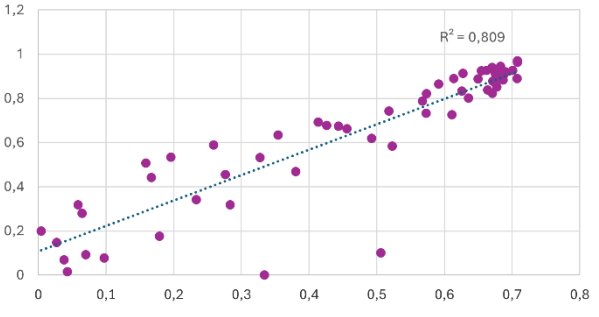


Figure 34 Corrélation n5, sondes plan vertical

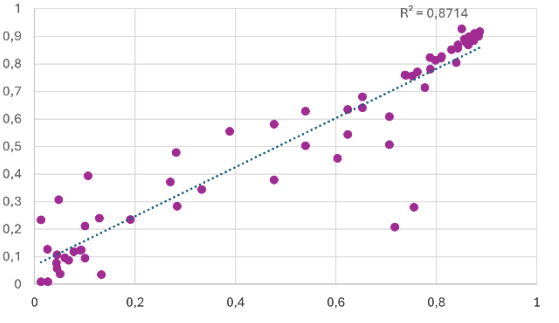


Figure 35 Corrélation n5, sondes plan horizontal

5.2.2 Cas D (A high-rise building in city blocks)

Ce modèle représente le quatrième niveau de complexité dans les expériences de l'IAJ. Il reprend une géométrie semblable au cas A, avec l'ajout de formes géométriques simples placées aux environs de l'étude pour reproduire les turbulences d'un quartier (Hu et al. 2023).
Les tests en soufflerie se sont déroulés dans les mêmes conditions que pour l'expérience A décrite précédemment, avec des paramètres aux limites identiques aux exigences du COST.

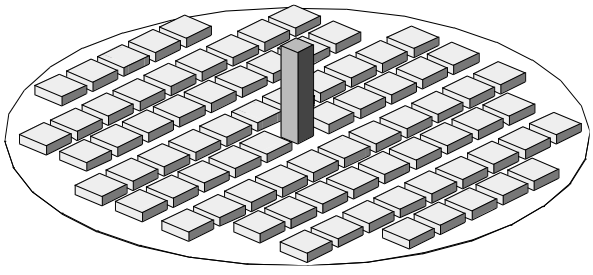


Figure 36 Vue schématique de la zone d'étude autour du gratte-ciel central selon le cas D (Hu et al. 2023)

La disposition des sondes autour du bâtiment sur un plan horizontal est effectuée avec précision, en utilisant des coordonnées spécifiques fournies (Annexe X). Grâce au plugin LunchBox, le programme importe les tableaux. Une fois les informations capturées, la création des points de sondage est réalisée dans Gh. On peut alors observer la répartition des sondes dans les rues environnantes et autour du contour de la géométrie principale (figure37-38).

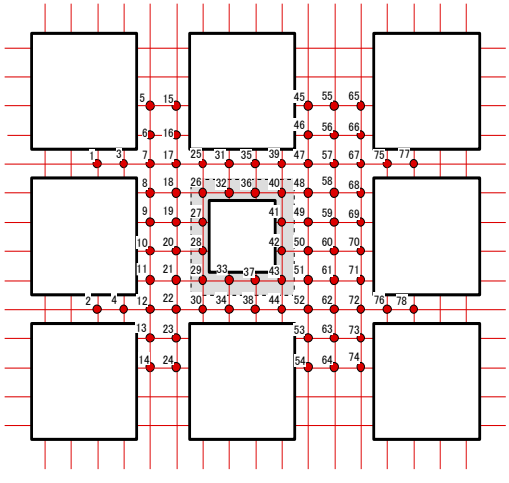


Figure 38 Schéma de la zone cible autour du gratte-ciel central et des points de mesure selon le cas D (Hu et al. 2023).

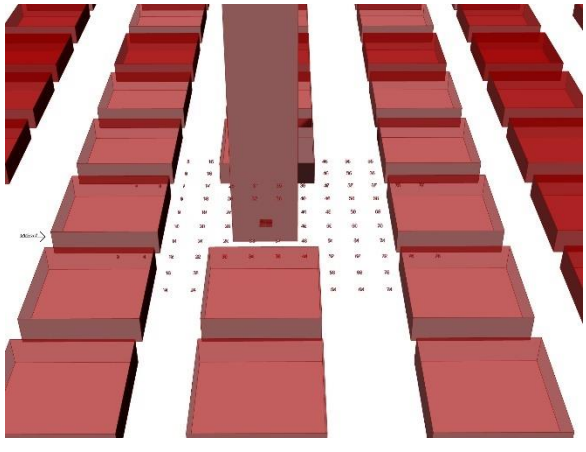


Figure 37 Vue perspective de la zone cible autour du gratte-ciel central et des points de mesure, par programme CFD.

Dans cette expérience, le tunnel de référence reste inchangé, mais nous ajustons la longueur de sortie de 15H à 5H en se basant sur les résultats précédents du cas A. Cette modification permet de réduire le nombre de cellules de calcul, étant donné que le logiciel Butterfly ne prend pas en compte de turn-over dans le diagramme de vent. Ensuite, nous adaptons le diagramme de vent fourni pour cette expérience, en tenant compte du problème d'encodage de la hauteur de référence. Comme précédemment, nous utilisons une approche d'essais-erreurs pour obtenir un profil de vent qui se rapproche de la simulation souhaitée (figure39).

Lors de cette expérience, la taille et le nombre des cellules sont des variables importantes. Nous analysons l'impact de la création de ces cellules sur le temps de création et de compilation des données. Les valeurs caractéristiques de l'ordinateur et le nombre d'itérations restent inchangés. Le sous-programme de simulation CFD est modifié pour inclure la nouvelle géométrie du contexte, tandis que les autres actions ne sont pas affectées par ce changement de contexte.

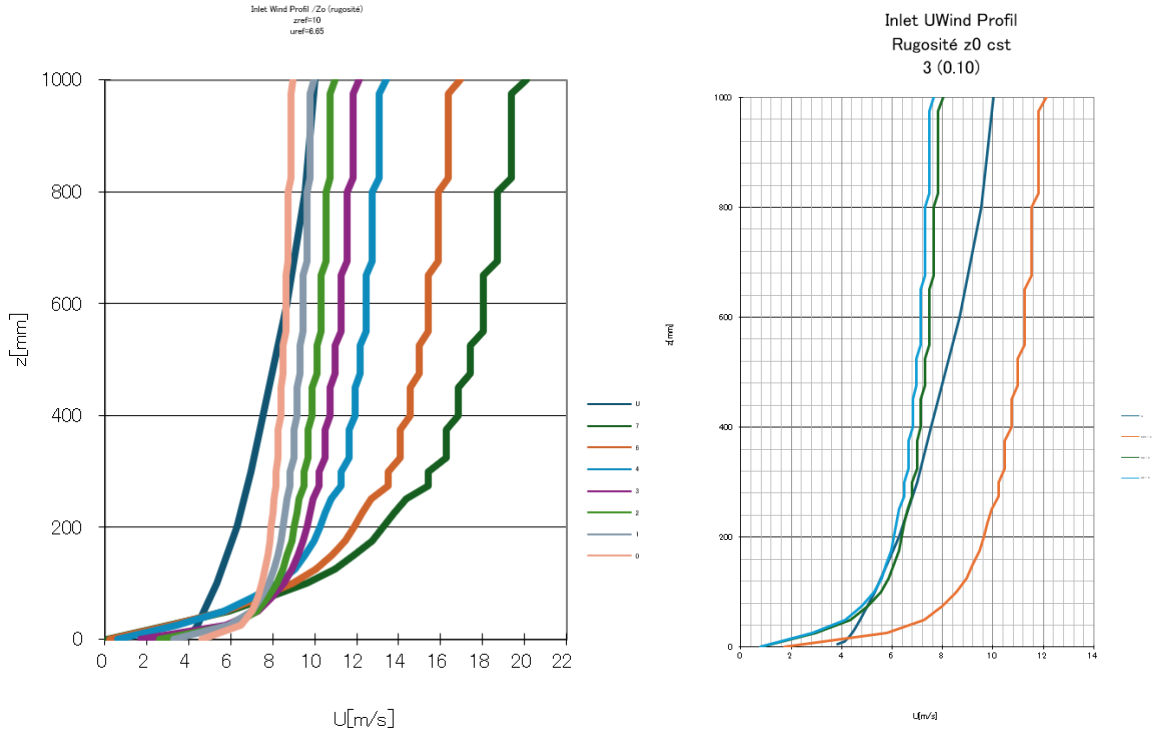


Figure 39 Concordance du profil du vent par essais-erreurs cas D

5.2.2.1 Résultats

La création des cellules autour de la géométrie pour obtenir un résultat détaillé près de la tour pose un problème de capacité mémoire sur l'ordinateur. Après 30 minutes de fonctionnement, les cellules ne sont pas créées pour l'ensemble des modules voisins, ce qui conduit à une coupure du programme Rhino par l'ordinateur en raison du dépassement de la capacité mémoire. Malgré une capacité de mémoire libre de 30 Go et une utilisation des processeurs à 97% de leurs performances maximales, le programme ne parvient pas à terminer l'opération.
Face à cette situation, l'opération est relancée avec six réglages de cellules, le comportement du programme reste le même. Il semble donc nécessaire de revoir l'approche de création des cellules ou d'optimiser les paramètres du programme pour réduire la charge sur la mémoire de l'ordinateur.

5.2.2.2 Conclusion cas D

L'ajout conséquent de géométrie dans le contexte de la simulation n’est pas pris en charge par le programme, car cela pourrait compromettre ou interrompre les calculs en raison des limitations de l'ordinateur. Pour résoudre ce problème, il pourrait être envisagé de développer un programme annexe qui simplifie le contexte, offrant ainsi une solution alternative à l'utilisateur. Le cas C de l'IAJ pourrait servir de modèle de test pour cette approche.

Par ailleurs, d'autres recherches ont été menées sur Butterfly, aboutissant à une méthode similaire pour évaluer la corrélation des simulations avec les expériences de l'IAJ (Hu et al. 2023). Ces recherches ont permis de conclure qu'une taille de maillage d'environ 0,4 million de cellules, avec une taille de référence de 2,5 m², était nécessaire pour atteindre une corrélation d'environ 80%. Cependant, le temps de calcul associé à cette méthode, soit 5 heures et 18 minutes, est peu réaliste pour une utilisation en préconception dans le cadre du programme principal.

Le contexte doit être le plus basique possible, reprenant seulement les formes qui influencent directement la géométrie étudiée par des turbulences tourbillonnantes ou d’accélération d’air significatif.

5.3 Eurocode NBN1

Le second programme apporté est un calcul plus conventionnel. Il est régi par les normes de l'Eurocode1 part1-4. Pour obtenir le taux de corrélation du programme avec un cas existant, on fait appel à un exemple détaillé de calcul. Il s'agit d'un article publié par Danielle Clavaud dans l'ouvrage « Construction et travaux publics. Les superstructures du bâtiment ». Dans la première partie sont développés les différents points abordés par le texte de la norme.

Dans un deuxième temps, il entame les calculs d'un entrepôt à toiture à double pans (figure40-41). Il détaille chaque étape de son calcul mathématique, ce qui permet de vérifier la corrélation lors de la progression dans le sous-programme. Chaque résultat est comparé et analysé (Annexe B).

Lors des calculs des Cpe, plusieurs possibilités de contexte de vent apparaissent, rendant les calculs non linéaires pour le programme. Une autre action réside dans la lecture des tableaux à entrées multiples fournis dans les normes. Enfin, l'application de ces coefficients sur des régions prédéfinies selon la forme du bâtiment est réalisée. Une attention particulière est portée sur ces éléments.

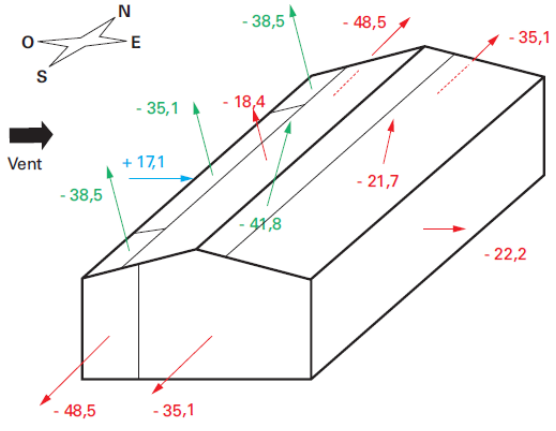


Figure 41 Résultat graphique obtenu par calcul (Clavaud 2014)

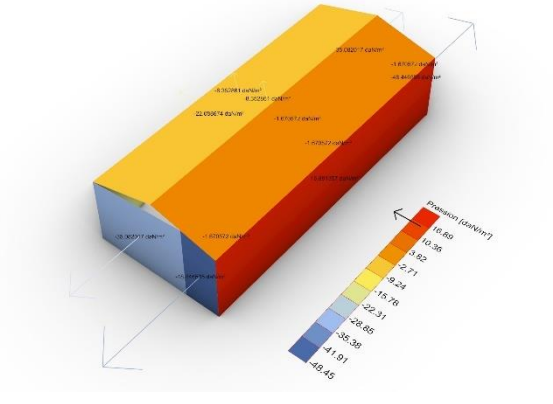


Figure 40 Résultat graphique obtenu par simulation du logiciel de calculs selon l'Eurocode

5.3.1 Résultats et observations

Les résultats obtenus par la simulation sont identiques pour 96% des cas. La lecture des tableaux de Cpe avec l'attribution des valeurs aux différentes régions est l'un des points critiques du programme (figure42). Un changement dans le contexte de vent entraîne la modification des arborescences dans les données de Gh. Lorsque plusieurs cas sont simulés avec des contextes différents, la structure des données rend le débogage du programme très compliqué pour le développeur.

L'analyse géométrique du relief fournissant le coefficient d'orographie n'est pas prise en compte par le programme qui se place du côté de la sécurité en fixant ce coefficient à 1. L'encodage des tableaux des Cpe est réalisé pour deux typologies de toiture, l'encodage des toitures à quatre pans et en « shades » (multipans) peuvent être développés en parallèle du programme existant. La structure des données à cet endroit du programme est conditionnelle. Pour les bâtiments encodés dans le programme Conception Papillon, il s'agit généralement d'une toiture plate.

Le programme ne rencontrera pas de problème au niveau de la détermination des Cpe sur la toiture. Une hypothèse de calcul du programme est que les arêtes de la forme géométrique étudiée sont vives et ne présentent ni acrotères ni rives arrondies. Pour les bâtiments de grande hauteur, ces détails peuvent être minimisés en raison de l'élancement des géométries qui sont analysées.

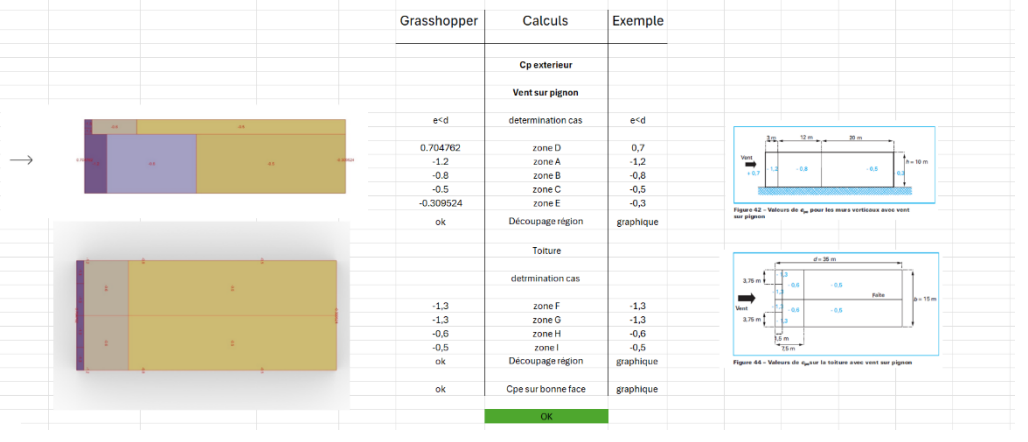


Figure 42 Comparaison des résultats obtenus pour les calculs selon l'Eurocode

5.4 Cas de conception architecturale

Pour tester le logiciel et vérifier son processus de conception chez l'utilisateur, un projet d'architecture est repris. Il s'agit du programme et du site rencontrés lors d'un atelier de bachelier en 2022. Le logiciel « Conception Papillon » permet de résoudre une question de pré-design que nous avons rencontrée. Chaque étape est détaillée afin d'établir une critique du logiciel.

5.4.1 Atelier LICAR1607

L'atelier est organisé au sein de la faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme à LOCI UCLouvain. Son code référence est LICAR 1607 avec comme intitulé « Molenwest-Densifier les friches ferroviaires » par Dorothée Stiernon, Nicolas Van Oost et Olivier Bourez.

Il est demandé de densifier une friche ferroviaire dans le quartier de la Gare de l'Ouest à Bruxelles, Belgique. Par groupe de quatre, il est proposé de réfléchir à des suggestions de logement et des typographies d'habitation variées. Lors de la réflexion en pré-design de l'architecture des questions de formes et de placement sont analysées avec Pierre Bacquart, Guillaume Bronchart et Thérèse van Rijckevorsel constituant le groupe3.

Deux bandes d'habitations de 35m de haut sont placées en parallèle pour offrir un parc au quartier de Molenbeek (figure45). Les décalages des bâtiments permettent des interactions et des vues avec les différents lieux bordant le site. La situation des entrées de ce parc fait suite à une réflexion plus poussée pour garder cet effet de continuité des bâtiments. La partie sud-ouest du site, où se trouve la Gare de l'Ouest, doit accueillir un bâtiment qui marque le début du parc ainsi abordé (figure 44-45-46).

Une constatation est que le vent qui vient de cette allée constituée des bâtiments est plus important qu'à d'autres endroits de la ville. Lors de cet atelier nous ne disposions pas d'outils pour pouvoir appréhender ce problème mais nous allons l'investiguer comme cas d'étude pour le programme « Conception Papillon ». En tant que concepteur nous voulons limiter l'empreinte de notre bâtiment avec une structure optimisée (Annexes C).

Figure 44 Plan de situation du projet LICAR1607 par le groupe 3

Figure 45 Plan d'implantation du projet LICAR1607 par le groupe 3

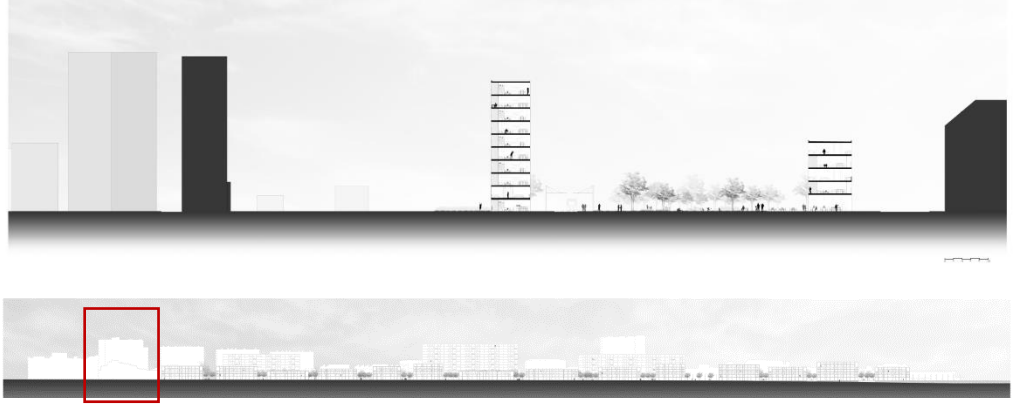


Figure 43 Coupes du projet LICAR1607 par le groupe 3

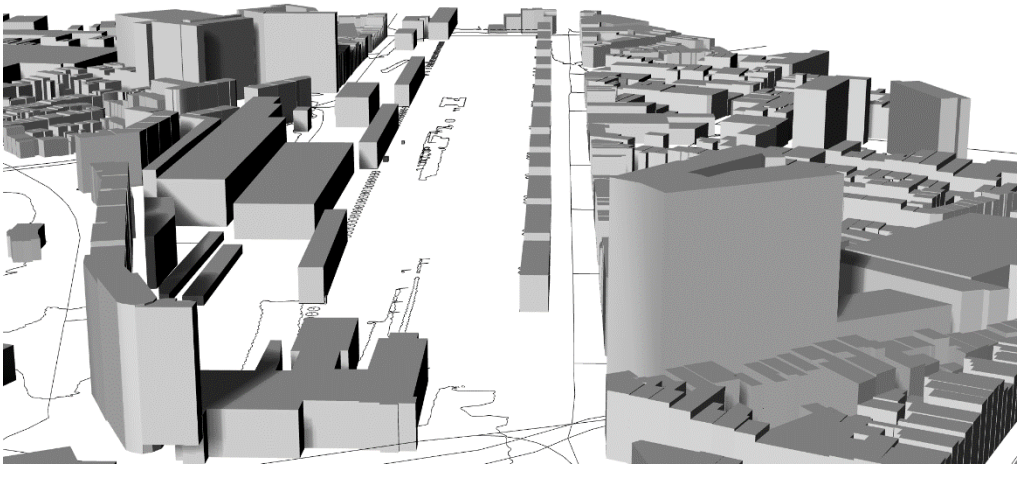


Figure 46 Maquette numérique de travail du groupe3

5.4.2 Situation actuelle du vent sur le site

Une première analyse sur un bâtiment existant est réalisée pour comprendre la dimension des forces qui s'appliquent sur le projet d'immeuble déjà présent (figure 48). Le sous-programme à l'Eurocode permet de visualiser les effets dus au vent. Le second sous-programme permet d'analyser les effets de Venturi engendrés par la position des constructions aux alentours (figure 47).

Par ce phénomène le vent converge entre les bâtiments (figure 49). Le même effet est remarqué dans l'autre direction avec l'ouverture vers la ville faite par les voies ferrées au sud-ouest. Elle va engendrer une vitesse du vent plus élevée et des efforts sur la structure plus importants si la géométrie n'est pas adaptée.

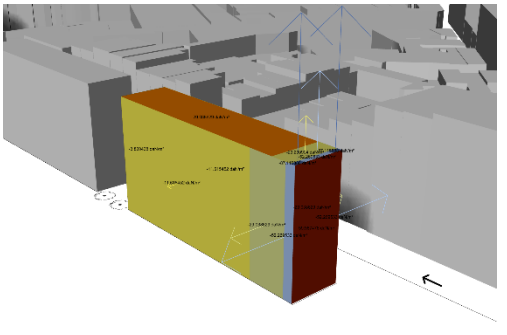


Figure 48 Actions du vent sur un bâtiment du projet du groupe3 sur le site de la Gare de l'Ouest

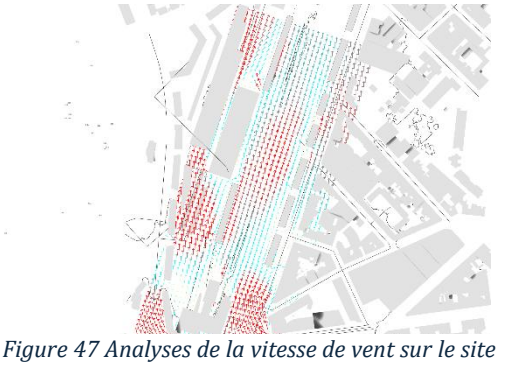


Figure 47 Analyses de la vitesse de vent sur le site de la Gare de l'Ouest

Après l'ouverture du programme principal et de la première étape, une station météorologique ainsi que ses données relatives sont téléchargées puis adaptées au site. Le vent dominant arrive de sud-ouest durant la majorité de l'année (figure 50). La force et la vitesse du vent sont enregistrés pour la suite des observations.

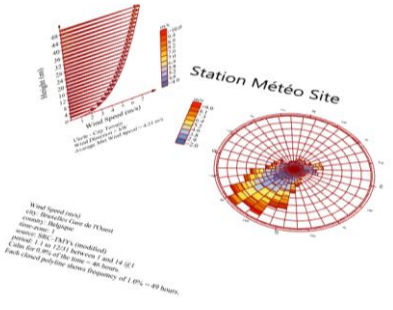


Figure 50 Affichage des données relatives au vent sur le site par le programme « Coneption Papillon »

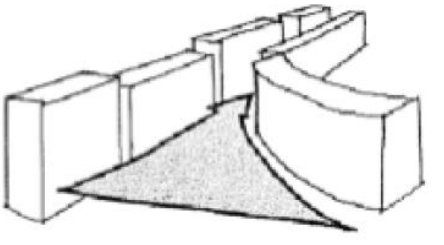


Figure 49 Effet de Venturi (Srikumar, Gambale, et Mosca 2023)

5.4.3 La proposition

L'idée du nouveau projet est de marquer la limite du parc au niveau de la Gare de l'Ouest par un bâtiment élancé répondant à celui déjà présent au sud-est. Sa programmation vise des commerces publics au rez-de-chaussée tandis que les étages supérieurs sont réservés à des espaces de coworking. L'image renvoyée par l'édifice doit être innovante et doit posséder une architecture non conventionnelle.

5.4.4 Conception paramétrique basée sur le vent

Une première esquisse est réalisée avec l'outils de CAO, Grasshopper , qui détermine les lignes directrices du projet. Un ensemble de possibilités sont sélectionnées pour correspondre aux contraintes rencontrées. Chaque possibilité est instaurée par la création des génomes dans le programme « Conception Papillon ».

Les caractéristiques du vent sont visibles sur l'IU du génératif design et une géométrie est choisie après analyse visuelle des efforts sur la structure. Lors de la 3eme itération, après modifications des différents paramètres, une géométrie est sélectionnée visuellement (figure 51).

Elle est extraite du programme par la reconstitution de l'esquisse avec les valeurs du génome sélectionné. Par des codages Gh contenus dans les annexes, les dalles des étages, le noyau structurel et les contreventements sont ajoutés à la géométrie obtenue (figure 52).

5.4.5 Discussions

Dans les conditions uniques du site de la Gare de l'Ouest et des phénomènes de vent présents sur place, un bâtiment interagit avec le microclimat du lieu. La direction de conception est orientée sur création de forme fluide, visant à réduire l'épaisseur des structures du bâtiment. Grâce aux progrès de la conception numérique, les effets de l'environnement peuvent être simulés et prédits dès la phase de conception, ce qui permet de réduire les coûts de construction et d'améliorer l'efficacité énergétique.

Cependant les formes proposées par l'esquisse pourraient être redessinées afin d'offrir davantage de courbes et de fluidité à la structure (L Kabošová 2019).

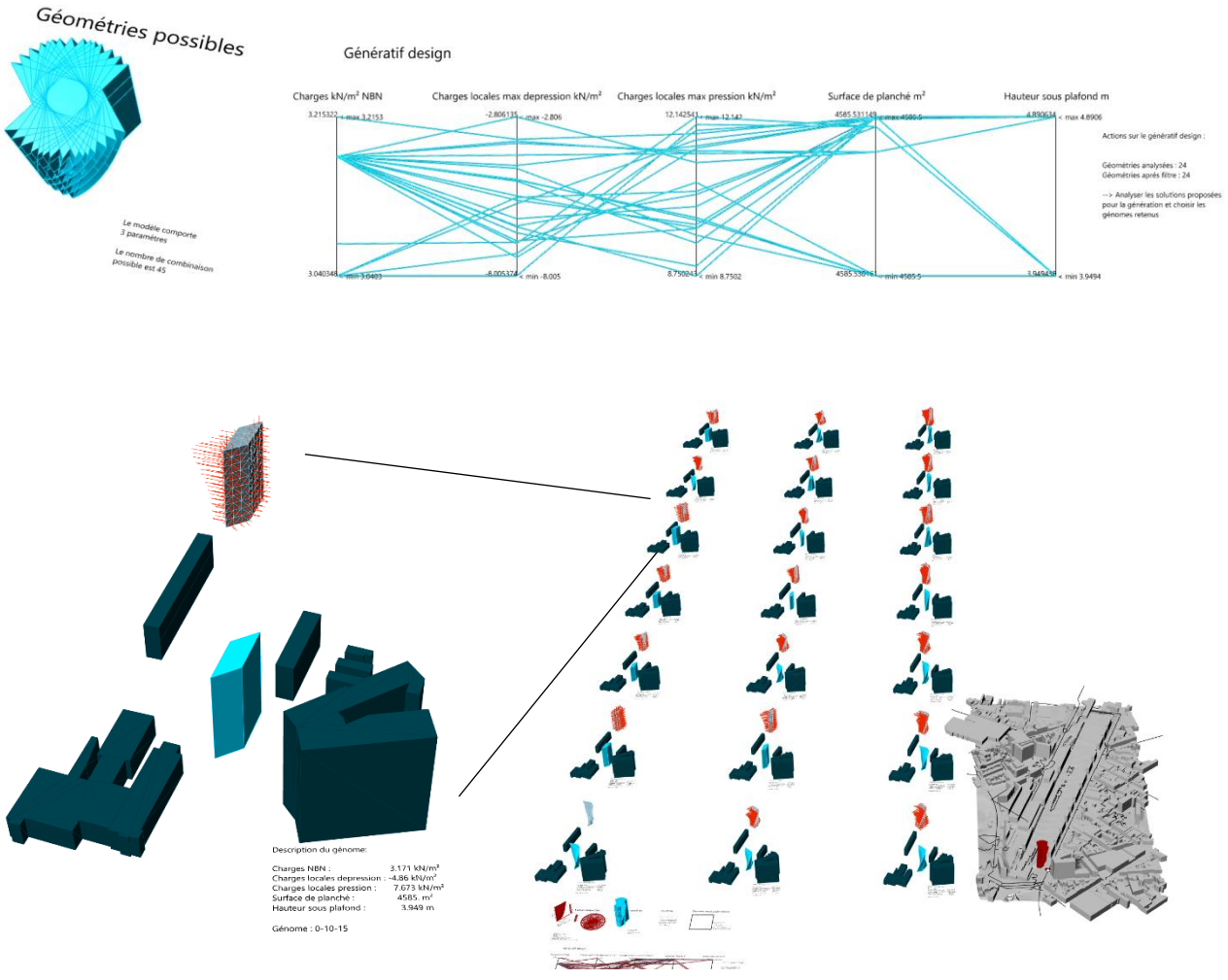


Figure 51 Interfaces utilisateur lors de la conception avec le programme « conception Papillon

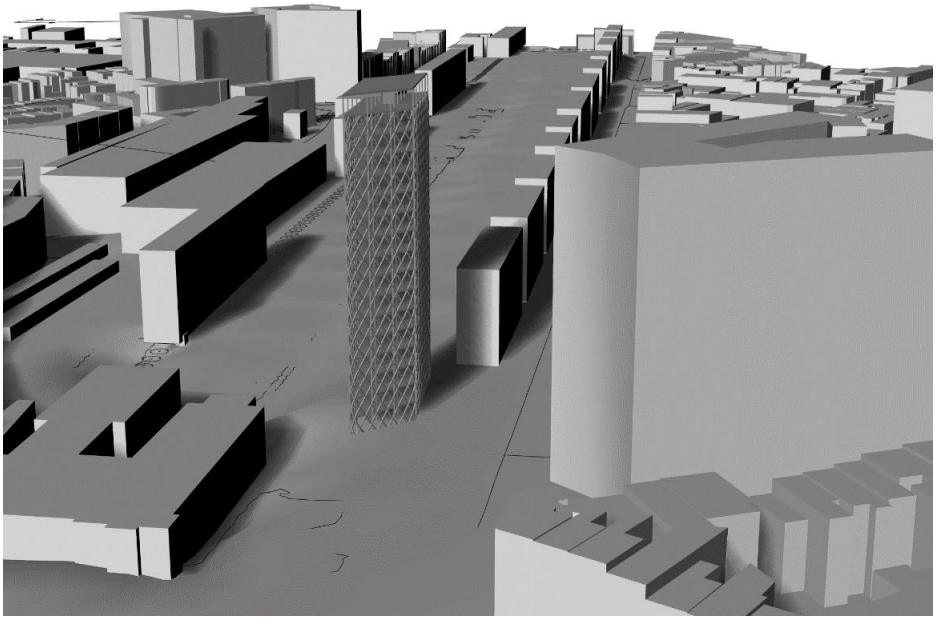


Figure 52 Géométrie sélectionnée après la conception avec les effets du vent

5.5 Conclusion des cas d'étude

Les trois approches observées montrent la complexité du phénomène du vent dans la conception des bâtiments de moyenne hauteur. Les deux sous-programmes répondent aux attentes formulées dans le cahier des charges. Ils obtiennent une corrélation avec les phénomènes observés en restant dans une limite de temp minimale. Le programme principal permet une réflexion dans le processus de conception, certaines fonctionnalités sont cependant à ajouter.

Le sous-programme CFD calcule les forces en fonction de la taille et du nombre de cellules attribué au modèle. Un grand nombre d'itérations et de calculs sont nécessaires mais présentent un taux de corrélation de 80 à 87% avec les réglages optimisés. Le nombre et la taille des cellules influencent grandement le temps de fonctionnement des programmes. Le nombre de cellules pour un fonctionnement optimum est aux environs de 120 000 cellules. Les temps de calculs sont alors estimés à 40 secondes par géométrie. Le sous-programme appelle à des améliorations dans le domaine de l'instauration du contexte qui reste gourmand d'un point de vue temporel.

Le deuxième sous-programme basé sur les normes définit des régions suivant les ordonnances prescrites. Les Cpe et efforts sur chaque région sont recueillis par tableaux Excel pour obtenir des données chiffrées rapidement. Les vecteurs de vitesses et de pressions sont définis plus globalement. Ils permettent une meilleure appropriation des normes de l'Eurocode. Cependant les cas de géométrie restent encore trop précis au niveau de la forme des toitures rencontrées.

L'étude du cas de la conception par le logiciel « Conception Papillon » par l'atelier 1607, permet de dresser un nombre de constatations pour améliorer d'avantage la fluidité dans le processus qui doit être pris en compte pour le développement futur du programme. Au vu du nombre important d'étapes et de manipulations, une notice d'utilisation est créée ainsi qu'une vidéo explicative des possibilités et limites du logiciel.

6 Conclusion

Ce mémoire avait pour ambition la création d'un outil concret, testé et simple à utiliser qui peut aider les concepteurs dans un domaine bien particulier : l'élaboration de la conception schématique d'un bâtiment de moyenne hauteur en intégrant l'influence du vent. A terme, cela permet de réduire l'utilisation de matière primaire dans la structure de ces bâtiments.

Il a fallu dans un premier temps identifier les solutions d'analyse qui sont offertes à l'heure actuelle dans le domaine du vent en architecture et en ingénierie. Les études du phénomène par le calcul au CFD et par les normes de l'Eurcode1 ont été sélectionnées comme les plus pertinentes dans le cas de la conception architecturale.

Il convenait de s'intéresser aux besoins de l'utilisateur et au contexte dans lequel il va effectuer son processus de conception schématique d'architecture afin de créer un cahier des charges adapté aux usages spécifiques de cet utilisateur.

La création du logiciel Papillon a été développée pour inclure une interaction, lors du processus de conception, entre les résultats d'analyses et la réflexion architecturale. Chaque résultat obtenu par les sous-programmes liés au vent sont détaillés par des études empiriques afin d'en connaitre la pertinence. Une série d'étapes sont suivies par le programme pour accompagner l'utilisateur vers une décision dans la forme du bâtiment. Le processus se veut itératif en utilisant la paramétrisation de l'outil de conception assisté par ordinateur de Rhinocéros, Grasshopper.

Au moyen d'une interface simple, de la notice d'utilisateur et d'une vidéo de démonstration (annexes X), le logiciel est à portée de tous les architectes. Il leur permet de concevoir en accumulant les connaissances liées aux phénomènes du vent sur les structures de moyenne hauteur.

A l'aube de la révolution des intelligences artificielles accessibles à tout public, apparaissent d'autres solutions d'analyses du vent par l'utilisation de grands nombres de données et d'ordinateurs toujours plus puissants (Lguensat 2023). Ce travail de mémoire se voulait principalement en lien avec les outils de l'architecture, mais dans cette nouvelle perspective, il serait pertinent d'inclure ces nouveaux modèles dans les supports à la conception chez les architectes.

7 Bibliographie

Altomonte, Sergio, André Stephan, et Goeffrey van Moeseke. 2023. « LICAR2801 -Théorie et recherche en science physique, édification soutenable ».

Archambeau, Frédéric, Namane Méchitoua, et Marc Sakiz. « Code Saturne: A Finite Volume Code for the computation of turbulent incompressible flows - Industrial Applications ».

de Boissieu, Aurélie. 2013. « Modélisation paramétrique en conception architecturale : Caractérisation des opérations cognitives de conception pour une pédagogie ». Université Paris Est.

Brook-Lawson, Joshua, et Sophie Holz. 2020. *CFD Comparison Project for Wind Simulation in Landscape Architecture*. DE: Wichmann Verlag. https://doi.org/10.14627/537690033 (6 juin 2024).

Burdèse, Jean-Claude. « La conception architecturale, tradition et CAO ».

Calvin, Katherine, Dipak Dasgupta, Gerhard Krinner, Aditi Mukherji, Peter W. Thorne, Christopher Trisos, José Romero, et al. 2023. *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* First. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). doi:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

Carrega, Pierre. « Le vent : importance, mesures, modélisation et tribulations ».

Catalano, Pietro, Meng Wang, Gianluca Iaccarino, et Parviz Moin. 2003. « Numerical Simulation of the Flow around a Circular Cylinder at High Reynolds Numbers ». *International Journal of Heat and Fluid Flow* 24(4): 463-69. doi:10.1016/S0142-727X(03)00061-4.

Chen, Goong, Qingang Xiong, Phillip J. Morris, Eric G. Paterson, Alexey Sergeev, et Yi-Ching Wang. 2014. « OpenFOAM for Computational Fluid Dynamics ». *Notices of the American Mathematical Society* 61(4): 354. doi:10.1090/noti1095.

Clavaud, Danielle. 2014. « Actions du vent sur les bâtiments selon l'Eurocode 1 – Partie 1-4 ». *Les superstructures du bâtiment*. doi:10.51257/a-v1-c3306.

Delvaux, Frédéric, et Philippe Marin. « La logique paramétrique, héritage d'une science de la variation pour un renforce- ment de la connaissance en architecture. »

Deshayes, Philippe. 2012. « Le secteur du bâtiment face aux enjeux du développement durable : logiques d'innovation et/ou problématiques du changement: » *Innovations* n°37(1): 219-36. doi:10.3917/inno.037.0219.

Frère, A, T Andrianne, et B Parmentier. 2013. « Simulations, Normes, Soufflerie en ingénierie du vent : Quel outil pour quelle application ? » Présenté à Charleroi, Belgium.

Garg, Harish. 2016. « A Hybrid PSO-GA Algorithm for Constrained Optimization Problems ». *Applied Mathematics and Computation* 274: 292-305. doi:10.1016/j.amc.2015.11.001.

Geurts, C P W. « Towards a Reliable Design of Facade and Roof Elements against Wind Loading ».

Gisen, D. « Generation of a 3D Mesh Using snappyHexMesh Featuring Anisotropic Refinement and Near-Wall Layers ».

Harris, Mark. 2005. « Fast Fluid Dynamics Simulation on the GPU ». In *ACM SIGGRAPH 2005 Courses on - SIGGRAPH '05*, Los Angeles, California: ACM Press, 220. doi:10.1145/1198555.1198790.

Hu, Yongyu, Yunlong Peng, Zhi Gao, et Fusuo Xu. 2023. « Application of CFD Plug-Ins Integrated into Urban and Building Design Platforms for Performance Simulations: A Literature Review ». *Frontiers of Architectural Research* 12(1): 148-74. doi:10.1016/j.foar.2022.06.005.

Kabošová, L. 2019. « The Search for an Optimal Architectural Shape Using Wind Performance Analysis ». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 566(1): 012012. doi:10.1088/1757-899X/566/1/012012.

Kabošová, Lenka, Dušan Katunský, et Stanislav Kmet. 2020. « Wind-Based Parametric Design in the Changing Climate ». *Applied Sciences* 10(23): 8603. doi:10.3390/app10238603.

Kaseb, Z., et M. Rahbar. 2022. « Towards CFD-Based Optimization of Urban Wind Conditions: Comparison of Genetic Algorithm, Particle Swarm Optimization, and a Hybrid Algorithm ». *Sustainable Cities and Society* 77: 103565. doi:10.1016/j.scs.2021.103565.

Krish, Sivam. 2011. « A Practical Generative Design Method ». *Computer-Aided Design* 43(1): 88-100. doi:10.1016/j.cad.2010.09.009.

Leroux, Marcel. 2000. « Les phénomènes extrêmes récents s'inscrivent-ils dans une évolution perceptible du temps ? / Do recent extreme conditions form part of a perceptible change in the weather ? » *Géocarrefour* 75(3): 261-70. doi:10.3406/geoca.2000.2473.

Lguensat, Redouane. 2023. « Les nouveaux modèles de prévision météorologique basés sur l'intelligence artificielle : opportunité ou menace ? » *La Météorologie* (121): 011. doi:10.37053/lameteorologie-2023-0030.

Méquignon, Marc, et Laurent Teresi. 2024. « L'éthique de l'architecte dans son rôle: » *Droit et Ville* N° 96(2): 37-51. doi:10.3917/dv.096.0037.

Mochida, Akashi, Yoshihide Tominaga, et Ryuichiro Yoshie. « AIJ Guideline for Practical Applications of CFD to Wind Environment around Buildings ».

Mode Lab. 2015. *A Data Tree and a hierarchical structure for storing data in nested lists*. http://grasshopperprimer.com/en/1-foundations/1-5/2_what-is-a-data-tree.html (2 juin 2024).

Paris, Mathieu, Frédéric Dubois, Stéphane Bosc, et Philippe Devillers. 2023. « Integrating Wind Flow Analysis in Early Urban Design: Guidelines for Practitioners ». *Journal of Contemporary Urban Affairs* 7(2): 194-211. doi:10.25034/ijcua.2023.v7n2-12.

Pavlowsky, Caroline E., et Travis Gliedt. 2021. « Individual and Local Scale Interactions and Adaptations to Wind Energy Development: A Case Study of Oklahoma, USA ». *Geography and Sustainability* 2(3): 175-81. doi:10.1016/j.geosus.2021.08.003.

Popinet, Stéphane. 2003. « Gerris: A Tree-Based Adaptive Solver for the Incompressible Euler Equations in Complex Geometries ». *Journal of Computational Physics* 190(2): 572-600. doi:10.1016/S0021-9991(03)00298-5.

Rao, k, et A Manur. 2013. *Regimes of fluid flow across cylinders*. https://www.semanticscholar.org/paper/Modeling-of-Vortex-Induced-Vibration-based-Energy-Rao-Manur/34ddf4a4074d9b6ff2609eefd159f9672662ede7 (6 juin 2024).

Sadeghipour Roudsari, Mostapha, Michelle Pak, et Anthony Viola. 2013. « Ladybug: A Parametric Environmental Plugin For Grasshopper To Help Designers Create An Environmentally-Conscious Design ». doi:10.26868/25222708.2013.2499.

Schatzmann, Michael, et Rex Britter. 2011. « Quality Assurance and Improvement of Micro-Scale Meteorological Models ». *International Journal of Environment and Pollution* 44(1/2/3/4): 139. doi:10.1504/IJEP.2011.038412.

Srikumar, S K R, A Gambale, et G Mosca. 2023. « Wind Simulations Using Computational Fluid Dynamics ».

Stals, Adeline. « Pratiques numériques émergentes en conception architecturale dans les bureaux de petite taille ».

Tominaga, Yoshihide, Akashi Mochida, Ryuichiro Yoshie, Hiroto Kataoka, Tsuyoshi Nozu, Masaru Yoshikawa, et Taichi Shirasawa. 2008. « AIJ Guidelines for Practical Applications of CFD to Pedestrian Wind Environment around Buildings ». *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96(10-11): 1749-61. doi:10.1016/j.jweia.2008.02.058.

Uliège. 2014. *Tunnel subsonique multidisciplinaire*. https://www.wind-tunnel.uliege.be/cms/c_4360056/en/wind-tunnel-lab?id=c_4360056 (5 avril 2024).

Van Leer, Bram, et Kenneth G. Powell. 2010. « Introduction to Computational Fluid Dynamics ». In *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, éd. Richard Blockley et Wei Shyy. Wiley. doi:10.1002/9780470686652.eae048.

Van Oost, Nicolas, Olivier Bourez, et Dorothée Stiernon. 2023. « LICAR 1607 Atelier7 Molenwest-Densifier les friches ferroviaires ».

Van Oost, Nicolas, et Robert Grabczan. 2023. « LICAR 2902 : Gestion de projet et monde de l'édification ». Présenté à Uclouvain.

Waibel, Christoph, Lukas Bystricky, Aytaç Kubilay, Ralph Evins, et Jan Carmeliet. 2017. « Validation of Grasshopper-Based Fast Fluid Dynamics for Air Flow around Buildings in Early Design Stage ». doi:10.26868/25222708.2017.582.

Zastavni, Denis. 2023. « LICAR2711 Structure architecturale 3 ».

Zhang, Ran, Christoph Waibel, et Thomas Wortmann. 2020. « Aerodynamic Shape Optimization for High-Rise Conceptual Design - Integrating and Validating Parametric Design, (Fast) Fluid Dynamics, Structural Analysis and Optimization ». In Berlin, Germany, 37-45. doi:10.52842/conf.ecaade.2020.1.037.

8 Annexes

A. Ensemble des programmes
B. Case Study
C. Case Study : Gare de l'Ouest
D. Notice utilisateur
E. Vidéo de démonstration
F. Logiciels utilisés

« Une personne intelligente résout un problème.
Une personne sage l'évite. »

Albert Einstein
Mathématicien, Physicien, Scientifique

LOCI
Bruxelles
Louvain-la-Neuve
Tournai

Faculté d'architecture
d'ingénierie architecturale
d'urbanisme

UCLOUVAIN
Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme
Rue du Levant, 1 bte L5.05.02, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/loci**