

## 1. ABSTRACT

Cette communication décrit une expérience pédagogique menée durant 4 ans avec le groupe de PFE<sup>1</sup> «Expérimentation» de l'ENSA de Normandie, en partenariat avec le Laboratoire Aérodynamique Eiffel<sup>2</sup>.

Les objectifs pédagogiques visent à enseigner autrement les sciences et techniques de l'architecture en les arrimant au projet d'architecture, afin de lutter contre la connaissance très abstraite des phénomènes physiques enseignée *ex-cathedra* et contre l'inhibition qui en résulte souvent. La démarche pédagogique renoue donc avec l'expérimentation comme origine de la connaissance. Les étudiants formulent eux-mêmes le sujet de leur PFE mais sont invités à questionner plus spécifiquement l'environnement créé par l'air, le vent et le caractère sensoriel et physique de leur projet. Ils définissent une problématique spécifique articulant : se protéger du vent, mettre en place une ventilation hygiénique naturelle ou bien définir une ventilation de confort. Deuxièmement ils formulent une hypothèse du comportement aéraulique et aérodynamique et ils l'expriment en maquettes expérimentales, pour les études aérodynamiques.

Cette démarche pédagogique peut se développer vers d'autres domaines de la connaissance et d'autres phénomènes physiques. Elle pourrait constituer un renouvellement des pratiques pédagogiques par le projet d'architecture qui ne segmentent plus les connaissances en disciplines étanches mais accepte de les considérer en situation complexe dans leurs interrelations.

## 2. INTRODUCTION

Cette expérience a été menée depuis 2012 par une équipe pluridisciplinaire composée par des enseignants des Sciences et Techniques pour l'Architecture (STA) de l'ENSA de Normandie et l'équipe de Aérodynamique Eiffel.

L'ENSA de Normandie a développé une réflexion centrée sur «les énergies dans l'architecture» et des expérimentations pédagogiques autour des variables climatiques de l'environnement. Le Laboratoire Aérodynamique Eiffel souhaitait pouvoir développer la pratique de l'expérimentation dans la conception architecturale et urbaine en choisissant des solutions morphologiques et techniques sans contraintes de type économique ou prédéterminées par les mandataires.

Les champs d'application étaient: la morphologie urbaine et architecturale, les dispositifs aéroclimatiques, la ventilation naturelle, l'aération, le confort dans les espaces, les charges et les formes aérodynamiques, les espaces inter climatiques.

Les objectifs scientifiques étaient de mener une réflexion décloisonnée non limitée par le cadre restreint de la norme, qui a marqué la période contemporaine de ses processus de standardisation technologique. Cette méthode associe les dimensions sensibles de l'architecture à celles objectives de la science pour en rechercher les compatibilités pertinentes, et valorise ainsi les dimensions physiques et architecturales de la place que l'homme occupe dans l'environnement.

Les *enjeux scientifiques* étaient de développer :

- les outils et les méthodes d'interprétation croisant les différents phénomènes

<i>Sujet</i>	<i>Etudiant</i>	<i>Année</i>	<i>Problématique étudiée</i>
Mur en dépression- Le Havre	Gaëlle Lochet et Jhon Angelin	2012	Charges du vent sur la structure et ventilation naturelle hygiénique.
Centre communautaire à Haïti	Nelly Schaeffert	2012	Ventilation naturelle et confort des espaces extérieures
Hôtel sur une rivière à Pont-Audemer	Sophie Jauneau	2012	Ventilation naturelle nocturne .
L'eau dans tous ses états. Equipement sportif : patinoire piscine et bains vapeurs - Angers	Laura Jaunet	2013	Ventilation naturelle hygiénique
« Au début, ou à la fin de la Terre ? » une Ecole de voile, une bibliothèque, implantée sur une presque-île – Bretagne.	Philippe Maelle	2013	Protection du vent extérieur, ventilation estivale intérieure .
Base vie en Terre Adélie – Antarctique.	Pierric Flandrin	2013	Confort dans les espaces extérieures/ protection aux vents/ charges du vent sur la structure
Habiter in-isolé - Rouen	Amelie Kerlau	2014	Ventilation naturelle hygiénique/ventilation hybride
Autour des agro matériaux : Pôle de recherche et formation – Rouen.	Mathilde Alexia Pioline	2014	Ventilation naturelle
Centre de Street Art - Presqu'île Rollet – Rouen.	Maxime Melocco	2015	Ventilation naturelle et confort .

Tableau 1

physiques interagissant entre l'architecture et l'environnement,

- la recherche architecturale sur les qualités climatiques et la valorisation énergétique des espaces,
- la recherche sur les processus de conception collaborative.

Les enjeux pédagogiques étaient:

- consolider l'approche pédagogique de sensibilisation des étudiants aux phénomènes environnementaux interagissant avec l'architecture,
- développer la recherche sur la valorisation des énergies renouvelables.

Le partenariat s'est déroulé sur 4 ans dans le cadre de l'atelier de Projets de Fin d'étude (10 projets concernés au total).

Les objectifs pédagogiques de l'atelier sont d'enseigner autrement les sciences et techniques de l'architecture en les arrimant au projet d'architecture, afin de lutter contre la connaissance très abstraite des phénomènes physiques enseignée *ex-cathedra* et contre l'inhibition qui en résulte souvent<sup>3</sup>. La recherche qui en découle réduit la fracture entre la théorie et la pratique. Elle tisse des liens entre les sciences fondamentales et la recherche appliquée, pour laquelle le projet d'architecture est ici utilisé comme outil.

1- Projet Fin d'Etudes, Groupe «Expérimentation» coordonné par Stéphane Berthier et Laurent Mouly, enseignants (2012-2015)

2- Aérodynamique Eiffel, filiale du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment exploite la soufflerie conçue par Gustave Eiffel (1912) pour la réalisation d'études aérodynamiques

3- John Dewey : philosophe américain de l'éducation par Marie France Blanquet, septembre 2010, <https://www.reseau-canope.fr/savoirscdi/societe-de-linformation/le-monde-du-livre-et-de-la-presse/histoire-du-livre-et-de-la-documentation/biographies/john-dewey-philosophe-americain-de-leducation.html>

La recherche qui en dérive est une recherche sans fossé entre les enseignants, les professionnels de l'architecture et de l'ingénierie et les étudiants.

### 3. LA METHODE

La démarche se compose de trois phases.

Premièrement les étudiants formulent eux-mêmes le sujet de leur PFE (site et programme) mais sont invités à questionner plus spécifiquement l'environnement créé par l'air, le vent, l'ensoleillement. Ces questionnements, couplés avec l'analyse du microclimat du site conduisent à l'énoncé d'une problématique architecturale propre à chaque projet. Bien évidemment elles sont multiples, mais les étudiants sont invités à en choisir une, principale, qui orientera le projet entendu comme outil de recherche: se protéger du vent (Mur en dépression de G. Lochet et J. Angelin; Base vie en Terre Adélie de P. Flandrin), mettre en place une ventilation hygiénique naturelle (L'eau dans tous ses états de L. Jaunet) ou bien définir une ventilation de confort (centre communautaire à Haïti, N. Schaeffert). Cette question doit être cohérente avec les autres aspects du projet d'architecture tels que les enjeux de situation, de programme, de construction, d'usage et d'espace. Les 10 projets qui ont participé à ce dispositif sont rassemblés dans le Tableau 1.

La seconde phase du travail consiste à formuler une hypothèse du comportement aéraulique et aérodynamique attendu à partir de connaissances théoriques, de références architecturales et démonstrations physiques dans la soufflerie.

Dans la troisième phase, les hypothèses du comportement aéraulique et aérodynamique des PFE sont exprimées en maquettes expérimentales. Ces modélisations de travail sont destinées à être modifiées et à évoluer en soufflerie pendant les essais. Les mouvements d'air sont visualisés et qualifiés avec des fumigènes ou des fils de laine, des capteurs mesurent la vitesse et la pression du vent. Les élèves interagissent eux-mêmes avec l'expérimentation, ils constatent les phénomènes physiques rendus visibles par l'expérience. Ils font évoluer leur projet avec des modifications concrètes sur la maquette et ils peuvent rapidement en évaluer les conséquences sur le projet. In fine, la maquette de travail, «abimée», porte l'empreinte des modifications apportées pendant les essais, devient la trace de la transformation et de l'évolution du projet. Avec cette plongée expérimentale les étudiants constatent le fort potentiel de la morphologie du bâtiment dans son interaction avec l'environnement.

### 4. RESULTATS

Nous avons choisi de présenter trois projets pour illustrer nôtre pratique pédagogique.

#### **«L'eau dans tous ses états. Equipement sportif : patinoire, piscine et bains vapeurs – Angers»**

Ce projet concerne un centre sportif situé à Angers, ville qui profite de vents modérés portés par la vallée de La Sarthe pendant tout l'année. Le programme situé au bord

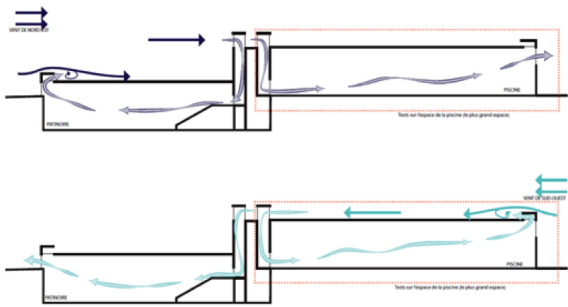


Fig.1. Schéma des circuits aérauliques figurés dans l'équipement sportif. Entourée en rose : la zone qui sera modélisée en soufflerie (PFE de L.Jaunet)

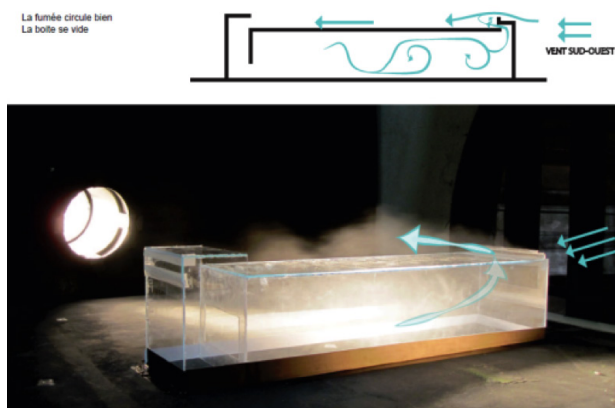


Fig.2. Visualisation au fumigène des circuits aérauliques des vents du sud ouest (PFE de L.Jaunet)

de la rivière croise l'eau dans tous ses états, solide, liquide et gazeux. La ventilation des piscines est très importante pour éviter la prolifération des moisissures et assurer la qualité de l'air dans les espaces et le confort des utilisateurs. Dans ce contexte il a été envisagé de développer une ventilation naturelle hygiénique en hiver comme en été avec l'installation de capteurs des vents et de dispositifs de cheminée d'extraction pour la ventilation. Après plusieurs croquis d'hypothèse de fonctionnement du système, les solutions de la Figure 1 ont été choisies. Un grand atrium, qui assure les fonctions d'entrée et de distribution du projet, est aussi un dispositif de captation du vent sur ses faces Nord-Est et Sud-Ouest, afin de bénéficier de ses multiples directions possibles au fil des saisons. Cette hypothèse a été développée en



Fig.3. Evaluation des effets du vent sur la forme à l'aide de fil de laine (PFE de P.Flandrin)

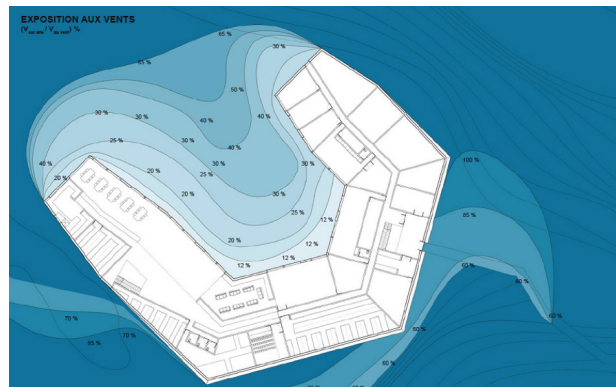


Fig.4. Carte des niveaux d'exposition aux vents sur le site autour du bâtiment (PFE de P.Flandrin)

maquette à échelle réduite (1:100) en plexiglas qu'a été installée dans la soufflerie où des visualisations au fumigène et des mesures de vitesses ont été réalisées pour estimer les renouvellements d'air générés par le vent (Fig.2).

L'expérimentation a permis de définir la forme et de la dimensionner (hauteur des tours, largeur des fentes d'extraction d'air, positionnement des ouvertures, présence de clapets pour amplifier les dépressions créées par le vent).

### «Base vie en Terre Adélie – Antarctique»

Ce projet concerne un centre de recherche en Antarctique. Le programme consiste à donner un lieu de vie confortable aux chercheurs qui y vivent une année. L'étudiant a travaillé sur la forme du bâtiment en se focalisant sur la protection du vent

Margherita FERRUCCI, Stéphane BERTHIER, Laurent MOULY

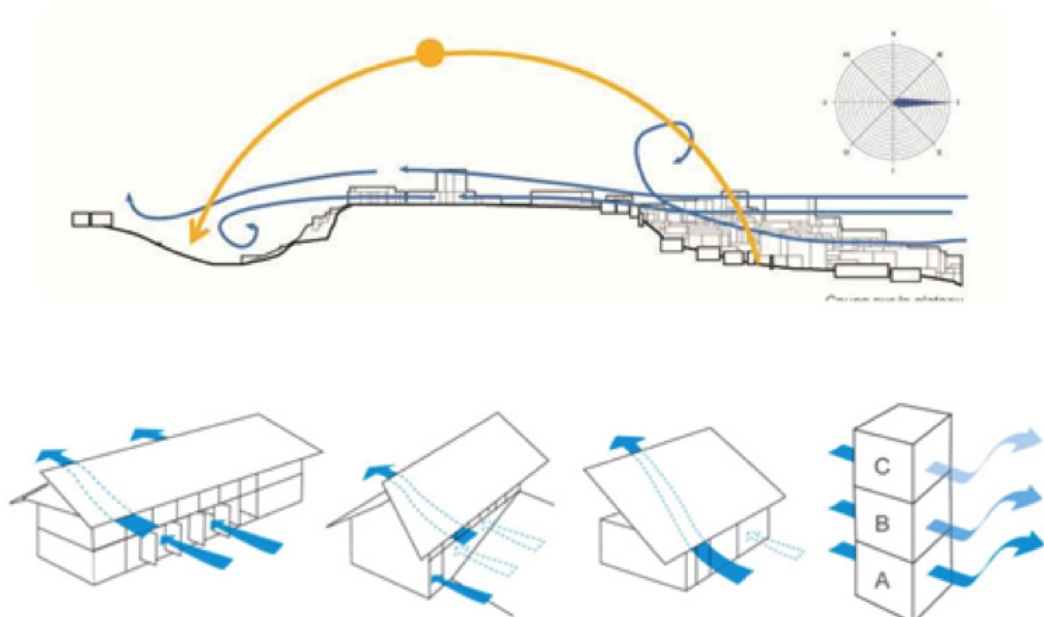


Fig.5. En haut étude topographique et de l'environnement. En bas, hypothèse de fonctionnement de chaque pavillon avant les essais en soufflerie (PFE de N. Shaeffert)

pour générer un espace extérieur protégé, la cour, de sorte que les chercheurs ne soient pas confinés à l'intérieur. L'édifice évoque un roc émergeant d'un sol granitique, en forme de brise-vent protecteur dont la structure résiste aux charges très fortes du vent que il atteint la vitesse de 200 km/h. Après plusieurs hypothèses de formes, l'une d'entre elles a été choisie et réalisée en maquette en mousse à échelle réduite (1:200) (Fig.3).

L'expérimentation a permis de déterminer les charges du vent sur l'enveloppe à l'aide de prises de pression pariétales. La forme du bâtiment a été modélisée pour réduire les efforts d'arrachement en toiture. Les vitesses du vent ont été mesurées dans la cour pour évaluer la protection aux vents les plus forts avec une sonde anémométrique. Ces acquisitions ont été capitalisées dans une carte représentant les niveaux d'exposition aux vents (Fig.4). Les écoulements autour de la forme ont été visualisés grâce à des fils de laine et fumigène.

#### «Centre communautaire à Haïti»

Le programme consiste à créer un centre d'accueil et une salle de spectacle dans un terrain vague au milieu des ruines du séisme du 2010. L'étudiante a travaillé sur le confort des espaces extérieurs et intérieurs. Plusieurs hypothèses de fonctionnement en croquis ont été proposées, (Fig.5) puis plusieurs maquettes expérimentales en plexiglas à l'échelle 1:75 ont été réalisées.

L'expérimentation a permis d'effectuer des relevés de vitesses pour estimer le confort dans la cour et dans les bâtiments et les écoulements autour des formes ont été visualisés grâce au fumigène. Les paramètres morphologiques architecturaux testés étaient la pente des toitures, la position des fenêtres et portes et la position des bâtiments dans la parcelle. A la fin une carte graphique de la distribution des vitesses a été produite.

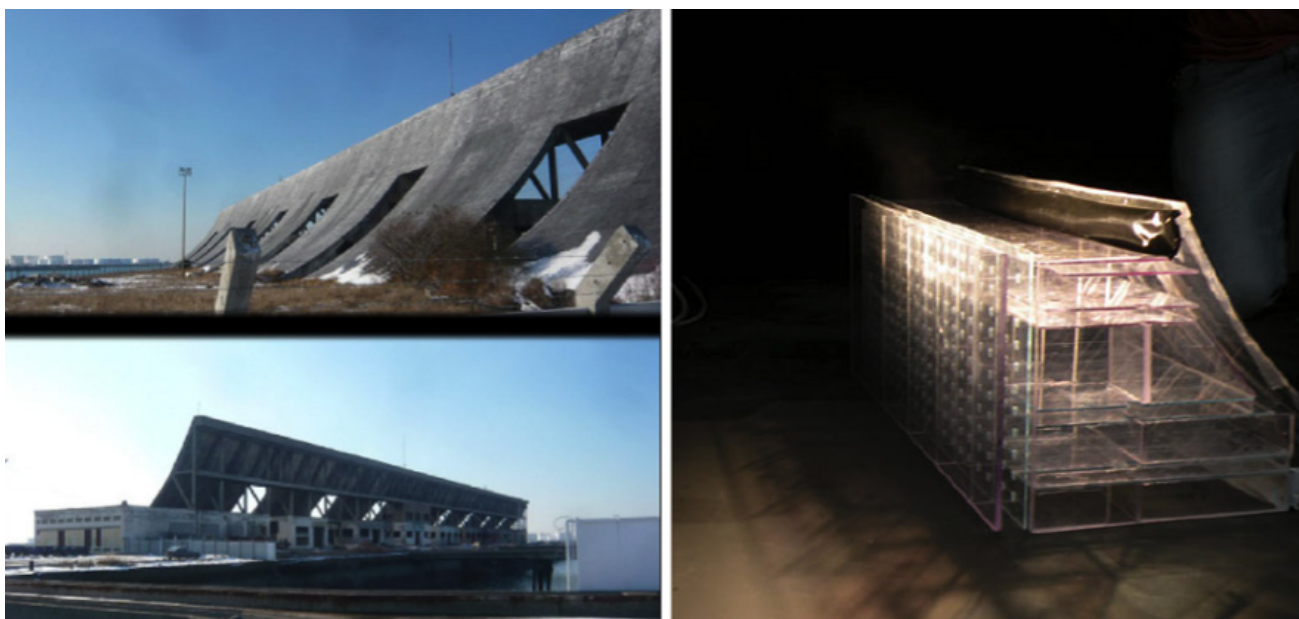


Fig.6. Mur en dépression au havre (PFE de G.Lochet)

## 5. CONCLUSIONS

La démarche pédagogique renoue ainsi avec l'expérimentation comme origine de la connaissance. Elle est aussi une critique de l'enseignement du projet d'architecture par mime des pratiques professionnelles et préfère l'imaginer comme un outil de connaissance et recherche dans une perspective universitaire.

La rencontre avec la soufflerie est l'occasion de faire physiquement l'expérience du vent par l'engagement du corps dans le flux d'air. L'expérimentation permet la compréhension des phénomènes physiques, qu'elle rend visibles et mesurables. Le processus d'expérimentation, par ses moyens métrologiques et de visualisation permet au concepteur de comprendre et intégrer les phénomènes physiques dans sa réflexion conceptuelle.

L'étudiant est aussi amené à représenter l'invisible avec des cartes et schémas. Il s'approprie d'une méthode scientifique avec des codes de représentation qui deviennent ses outils de

travail et de conception. Réunissant ainsi des dimensions à la fois objectives et sensibles dans la représentation architecturale, ces codes marquent de ce fait l'ancrage de l'architecture dans son environnement physique (Fig.4).

A ce stade, les projets sont encore suffisamment immatures pour être malléables et transformables au gré de résultats parfois contre-intuitifs, mais toujours plus complexes et plus enrichissants pour le développement morphologique du projet que le schéma initial imaginé par l'étudiant. Le temps d'un PFE ne permet pas le nombre d'itérations nécessaires à la mise au point complète des dispositifs architecturaux mais ouvre la voie à un exercice enjoué et désinhibant des pratiques scientifiques qui s'avère toujours être l'occasion d'une amélioration du projet dans toute ses composantes. La rencontre de l'imagination intuitive des étudiants avec les méthodes expérimentales du laboratoire renvoie aux origines connaissances scientifiques telles qu'en parle Edgar Morin<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>- Morin Edgar, *Introduction à la pensée complexe*, Ed. du Seuil, Paris 1990. p74

Cette démarche peut se développer vers d'autres domaines de la connaissance et d'autres phénomènes physiques. En effet, bien que les PFE se soient focalisés à l'échelle du bâtiment, ils établissent tous un lien fort avec le paysage (Fig.6) et l'environnement.

Cette méthode pourrait constituer un renouvellement des pratiques pédagogiques par le projet d'architecture, qui ne segmentent plus les connaissances en disciplines étanches mais accepte de les considérer en situation complexe, dans leurs interrelations.

Les expériences menées par les étudiants, sous forme d'apprentissage expérimental, rejoint les domaines de travail des enseignants (architectes ou ingénieurs) mais avec la liberté d'un projet d'étudiant. Ce décalage favorise l'innovation technologique et dynamise la recherche. En effet le Laboratoire Eiffel a trouvé dans cette expérience l'occasion de travailler sur des projets dont les morphologies ne sont pas surdéterminées en amont et dont l'objectif n'est pas qu'une validation a posteriori, mais un objectif de conception à l'échelle architecturale. La forme résultante est guidée par la combinaison du dessin de l'architecte et l'expérimentation, les deux se forment l'une dans l'autre et elles sont mises en relation à travers le projet.

Le projet n'est pas seulement une forme organisant les espaces selon des appréciations programmatiques, fonctionnelles, culturelles, ou esthétiques, ni seulement le produit de contingences scientifiques et techniques, mais le fruit d'un processus dans lequel les deux s'informent mutuellement. L'architecte porte ici un processus proprement transversal et collaboratif, dans lequel le dialogue avec l'ingénieur est central. Ce dernier contribue par ses apports à l'hybridation des dispositifs qui prennent corps en principe formel, capables de guider le dessin architectural. L'architecte est ainsi capable, à travers la prise de conscience et la compréhension des phénomènes physiques à l'œuvre, d'intégrer dans le dessin de la forme architecturale, ces dispositifs d'origine scientifique et technique.

Si un tel processus n'est pas nouveau concernant le champ de la construction, il reste bien singulier et novateur dans l'aérodynamique. Il s'agit d'un domaine d'une grande complexité, qui constitue un axe de recherche en sciences de l'ingénieur. Nous nous rendons compte que si les effets mécaniques du vent sur les constructions sont bien caractérisés, en revanche les relations entre écoulement du vent, morphologie architecturale et localisation dans l'espace, restent un terrain de découvertes scientifiques qui pourraient conduire à l'élaboration de nouvelles connaissances dans un projet de recherche plus large. Les projets sont donc un espace d'expérimentation et d'innovation, dans lequel la forme architecturale peut étayer et rendre possible une avancée de la connaissance. Enfin, la démarche collaborative est ici à l'œuvre dès la discussion des premières intentions, afin de pouvoir conduire la conception dans un domaine de grande complexité, où l'architecture pourra éclore du dialogue fécond de l'architecte et l'ingénieur.