

CONCEVOIR UN URBANISME CLIMATIQUE EN MILIEU TROPICAL

Guide de conception urbaine
favorisant la ventilation naturelle

RAPPORT FINAL

Janv.
2023



EXPERTISES

CITATION DE CE RAPPORT

Valentin DELPLANQUE, Jacques GANDEMER, Benoit BLANCHARD, Dominique MARCHIO, Pascal STABAT, François CAUNEAU et Antoine PERRAU, ADEME. 2023. Guide pratique de conception pour un urbanisme climatique en milieu tropical. 49 pages

Cet ouvrage est disponible en ligne <https://librairie.ademe.fr/>

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (art. L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (art. 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé de copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relatives à la reproduction par reprographie.

Ce document est diffusé par l'ADEME

ADEME

20, avenue du Grésillé
BP 90 406 | 49004 Angers Cedex 01
Numéro de contrat : 1604C0022

Étude réalisée par Valentin DELPLANQUE (Mines Paris), Jacques GANDEMER, Benoit BLANCHARD (Aérodynamique Eiffel), Dominique MARCHIO (Mines Paris), Pascal STABAT (Mines Paris), François CAUNEAU (Mines Paris) et Antoine PERRAU (LEU) pour ce projet cofinancé par l'ADEME

Projet de recherche coordonné par : Mines Paris
Appel à projet de recherche : Vers des Bâtiments Responsables (APR BAT RESP)

Coordination technique - ADEME : Nicolas DORE, Etienne MARX
Direction/Service : Direction Villes et Territoires Durables/Service Bâtiment

SOMMAIRE

RESUME.....	5
ABSTRACT	6
1. PREAMBULE ET CADRAGE	7
2. LA PROBLEMATIQUE URBANISTIQUE ET LES ATTENTES TERRAIN	8
3. LA CONCEPTION BIOCLIMATIQUE DE L'URBANISME EN MILIEU TROPICAL HUMIDE	9
3.1. Les enjeux de la ventilation naturelle	9
3.2. Les mécanismes aérodynamiques et aérauliques de la ventilation naturelle	10
3.2.1. Le vent	10
3.2.2. Le champ de pression externe.....	11
3.2.3. Les écoulements d'équilibrage internes (débitants).....	12
3.3. Méthodologie de développement d'un plan masse à fort potentiel de climatisation naturelle	13
3.3.1. Evaluation du signal vent sur le site	13
3.3.2. Qualification et quantification des champs de pression sur les masses bâties et du champ de vitesse entre les bâtiments	14
3.3.3. Présentation des grandeurs aérodynamiques caractéristiques de l'urbanisme climatique : champs de pression et de vitesse.....	15
3.4. Paramètres aérodynamiques influents.....	15
4. PRINCIPAUX RESULTATS POUR FAVORISER LE POTENTIEL DE VENTILATION NATURELLE ISSUS DU MODELE NUMERIQUE	18
4.1. Présentation du modèle numérique.....	18
4.1.1. La méthode CFD.....	18
4.1.2. Limites de l'interprétation des résultats	19
4.1.3. Sensibilité aux dérives de direction du vent à +/- 10° près.....	20
4.1.4. Sensibilité du modèle aux variations locales d'implantation du bâtiment témoin dans son environnement immédiat	21
4.1.5. Confrontation entre l'approche sur maquette physique en soufflerie turbulente et le modèle numérique : exemple type et conclusions.....	22
4.2. Définition des paramètres caractérisant l'aérodynamique d'un plan masse.....	22
4.2.1. Présentation des paramètres	22
4.2.2. Indépendance des paramètres et influences relatives.....	24
4.3. Analyse des résultats du modèle numérique pour favoriser le potentiel de ventilation naturelle	24
4.3.1. Cas d'un plan masse non orienté au vent	24
4.3.2. Environnement favorable au développement d'une urbanisation à potentiel de ventilation naturelle	26
4.3.3. Cas d'un plan masse balayé par le vent suivant une direction	28
4.3.4. Quelles architectures pour favoriser le potentiel de ventilation naturelle ?.....	38

5. RESUME DES CONCLUSIONS OPERATIONNELLES POUR LE DEVELOPPEMENT D'UN URBANISME CLIMATIQUE	40
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	45
INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES.....	46

RÉSUMÉ

Pour répondre au besoin de confort thermique en milieu tropical, la ventilation naturelle est une alternative à la climatisation à condition que la morphologie urbaine permette d'exploiter le fort potentiel de vent dans les tropiques. La ventilation naturelle permet non seulement d'accéder au confort thermique dans les logements pour les personnes en situation de précarité énergétique mais aussi de limiter l'usage de climatiseurs induisant des appels de puissance contraignants pour le réseau électrique et des consommations d'énergie contribuant au réchauffement climatique. En outre, les unités de climatisation dégradent l'esthétique des quartiers et entraînent des nuisances sonores.

Le but de ce guide est de proposer des recommandations aux urbanistes afin de concevoir des quartiers en zone tropicale qui maximisent le potentiel de ventilation naturelle. Un urbanisme aérodynamique doit permettre de développer des champs de pressions en façade et toiture suffisants pour que les débits et les vitesses d'air internes conduisent à la décharge thermique et au confort thermique des occupants.

La méthodologie repose sur des simulations CFD et des essais en soufflerie atmosphérique sur des maquettes de deux quartiers à l'île de la Réunion. Les essais en soufflerie ont permis de calibrer le modèle numérique, lequel a ensuite été utilisé pour effectuer une étude paramétrique statistique visant à identifier des corrélations entre l'évolution de paramètres urbains significatifs et le potentiel de ventilation à l'échelle du quartier.

Avant de construire un nouveau quartier, il est indispensable de faire une évaluation locale des conditions de vent. Il est ensuite recommandé, par rapport à la direction dominante du vent, de cumuler une progression de la densification des sols et de la hauteur moyenne des bâtiments. A l'échelle des bâtiments, des structures architecturales en forme de U perpendiculairement à l'axe des vents dominants permettent de favoriser les pressions motrices en façade. Enfin, le tirage dépressionnaire permet de garantir un potentiel intéressant quel que soit le taux d'occupation des sols.

Le droit au vent devient un enjeu de la construction en urbanisme et la connaissance des impacts d'un nouveau tissu bâti est une aide à la conception pour l'urbaniste mais peut aussi orienter des textes réglementaires comme le PLU.

ABSTRACT

To answer the need for thermal comfort in tropical environments, natural ventilation is an alternative to air conditioning, provided that the urban morphology makes it possible to exploit the strong wind potential in the tropics. Natural ventilation not only provides access to thermal comfort in housing for people in a situation of energy insecurity, but also limits the use of air conditioners, which generate high power demands on the electricity network and energy consumption that contributes to global warming. In addition, air conditioning units degrade the aesthetics of neighbourhoods and cause noise pollution.

The aim of this guide is to provide recommendations for planners to design neighbourhoods in tropical areas that maximise the potential for natural ventilation. Aerodynamic planning should allow the development of sufficient facade and roof pressure fields so that internal air flows and velocities lead to thermal discharge and thermal comfort of the occupants.

The methodology is based on CFD simulations and atmospheric wind tunnel tests on models of two districts in Reunion Island. The wind tunnel tests were used to calibrate the numerical model, which was then used to carry out a statistical parametric study aimed at identifying correlations between the evolution of significant urban parameters and the ventilation potential at the neighbourhood scale.

Before building a new neighbourhood, a local assessment of the wind conditions is essential. It is then recommended that, in relation to the prevailing wind direction, an increase in the land use rate and the average height of the buildings should be accumulated progressively. At the building scale, U-shaped architectural structures perpendicular to the axis of the prevailing winds favour driving pressures at the façade. Finally, the depressional draft guarantees an interesting potential whatever the land use rate.

The « right to the wind » is becoming an issue in town planning and the knowledge of the impacts of a new district is an aid to design for the town planner but can also guide regulatory texts such as the local urban plan.

1. Préambule et cadrage

Pour optimiser le confort thermique de l'utilisateur mais aussi limiter le recours à la climatisation, la conception en ventilation naturelle de bâtiments, de logements ou de bureaux est devenue un enjeu majeur en zone tropicale. Pour répondre à ce besoin, les urbanistes sont à la recherche de recommandations permettant de concevoir de nouveaux quartiers qui maximisent le potentiel en ventilation naturelle.

La différence de pression entre façades ou entre façade et toiture est le moteur des écoulements dans le bâtiment et donc de la ventilation naturelle. La connaissance de son évolution sur un bâtiment en fonction des caractéristiques des quartiers d'étude devient un outil pour imaginer de nouveaux quartiers bio climatiques.

La mise en œuvre de simulations numériques, validées préalablement par des simulations physiques en soufflerie à couche limite atmosphérique permet d'établir des règles de conception aussi bien qualitatives (typologie de tissu urbain à développer en fonction des conditions de vent de la parcelle) que quantitatives (rapport largeur de rue / hauteur et largeur de bâtiment / forme et volumétrie architecturale) (Figure 1, Figure 2, Figure 3).

Ce guide propose des règles pratiques en urbanisme favorisant la ventilation naturelle sur des bâtiments. Il s'appuie sur les résultats d'expérimentations dans la soufflerie EIFFEL et de simulations numériques, menées dans le cadre du projet VnatDOM financé par l'ADEME.



Figure 1: Exemple d'un bâtiment en soufflerie

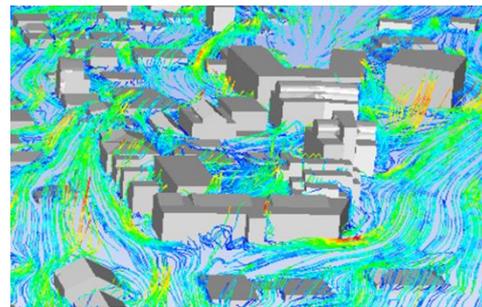


Figure 2: Exemple d'un bâtiment en simulation



Figure 3: Quartier de Saint Pierre - Ile de la Réunion en soufflerie

2. La problématique urbanistique et les attentes terrain

La conception en ventilation naturelle d'un bâtiment s'appuie sur des textes réglementaires (RTAA DOM notamment) et des outils de conception qui reprennent les différents paramètres à considérer (livrets techniques du programme PREBAT Réunion, outil PERENE 2009, etc.). Des simulations physiques en soufflerie sur plusieurs projets ont permis de valider et optimiser plusieurs concepts, d'établir des règles, et ces bâtiments deviennent des démonstrateurs.

L'environnement bâti proche (interaction directe avec effet de masque par exemple) ou plus lointain (rugosité de terrain) a un impact direct sur le fonctionnement en ventilation naturelle d'un bâtiment et, s'il est pris en compte au moment de sa conception, on mesure mal aujourd'hui, l'impact de l'évolution d'un quartier ou de la construction d'un nouveau quartier.

Le droit au vent devient un enjeu de la construction en urbanisme et la connaissance des impacts d'un nouveau tissu bâti est une aide à la conception pour l'urbaniste mais peut aussi orienter des textes réglementaires comme le plan local d'urbanisme (PLU).

Le second aspect concerne l'aménagement et le bâti d'un nouveau quartier qui doit être pensé à l'échelle du quartier mais aussi dans son environnement urbain avec des constructions limitrophes plus ou moins denses et des formes architecturales propres. La conception en ventilation naturelle à l'échelle du quartier sera optimum si on sait considérer les impacts réciproques d'un tissu urbain sur un autre.

Pour autant, favoriser la ventilation naturelle des bâtiments n'est pas suffisant, pour optimiser les conditions de confort thermique. Il faudra aussi limiter les apports solaires, notamment en utilisant des matériaux réfléchissants, et avoir recours à la végétation pour créer de l'ombre et provoquer un refroidissement par évaporation.

3. La conception bioclimatique de l'urbanisme en milieu tropical humide

La ventilation naturelle est une solution incontournable de la conception bioclimatique de la construction en milieu tropical et du contrôle du bien être thermique des occupants. Son efficacité de rafraîchissement, en décharge thermique et en convection forcée sur le corps humain, y est particulièrement efficace car le moteur vent est omniprésent et les températures maximums sont limitées à 32°C. Dans ces contrées, l'homme peut s'affranchir dans la majorité des cas et en particulier dans le secteur résidentiel de climatisation mécanique (à l'exception de zones d'activités et à fonctionnements particuliers).

La réussite d'une ventilation naturelle efficace repose cependant sur une approche systémique, avec prise en compte de chaque phase intermédiaire du « parcours fluide » : Partant de la donnée climatique du signal vent sur le site, pondérée par l'histoire et la nature de la rugosité et la topographie en amont, il faudra considérer les interactions aérodynamiques entre l'environnement immédiat et l'objet à bâtir, puis intégrer ces résultats pour développer une architecture aérodynamique (développement de différences de pression les plus marquées possible entre façades et entre façades et toitures) et définir au final des circuits aérauliques internes appropriés à l'irrigation des espaces de vie.

En outre, une bonne conception en ventilation naturelle deviendra inopérante si elle n'est pas gérée, ce qui suppose un pilotage approprié des ouvrants par l'utilisateur, devenu acteur de son confort. Cette dernière condition de réussite, liée au fonctionnement même du dispositif aéraulique, demande un accompagnement et une formation¹.

3.1. Les enjeux de la ventilation naturelle

Il faut distinguer et classer les diverses définitions et les enjeux de la ventilation naturelle en climat tropical :

- Le premier enjeu est **la ventilation hygiénique des espaces intérieurs**

Cette contrainte sanitaire obligatoire est particulièrement aisée à résoudre aérodynamiquement dans des régions où les brises thermiques et les alizés soufflent à longueur d'année. L'objectif de qualité d'air demande seulement de 1,5 à 2 volumes/heure de renouvellement d'air et est donc directement accessible en ventilation naturelle.

- Le deuxième enjeu est **le contrôle thermique des ambiances intérieures**

Partant d'une conception thermique aboutie de l'enveloppe (dont la protection solaire directe et l'isolation), d'une aéraulique interne des écoulements d'air (ajutages des entrées et des sorties, transparence interne, etc.) et avec des sources thermiques internes minimisées (éclairage basse tension, zonage thermique intérieur, etc.), il est possible d'évacuer les charges thermiques en période d'utilisation des espaces et de maintenir les températures intérieures au même niveau que les températures extérieures, évitant la surchauffe interne.

Le cheminement des flux d'air intérieurs n'est pas contraignant, il faut seulement assurer des taux de renouvellement d'air supérieurs à 15 volumes/heure.

Note : Lorsque des débits de 15-20 volumes par heure sont aérodynamiquement et naturellement atteints, le confort thermique des occupants peut être obtenu grâce à des brasseurs d'air (le déplacement d'air induit par le brasseur diminue la température ressentie par l'occupant par rapport à la température ambiante du fait de l'augmentation des transferts convectifs – voir ci-dessous).

- Le troisième enjeu est **le confort thermique des occupants**

Deux paramètres majeurs interviennent :

¹ Livrets techniques du programme PREBAT Réunion, Livret 3 Ventilation naturelle. ADEME

- **L'inertie des masses bâties**, qui caractérise la capacité à accumuler de la chaleur (ou du frais) et de la restituer avec un certain déphasage temporel. Ce mécanisme lent permet par exemple de retarder la montée en température de l'espace intérieur par rapport à l'élévation de la température extérieure, et d'écrêter ainsi les pointes. Dans ces conditions c'est le rayonnement des masses (plus chaudes ou plus froides que l'ambiance intérieure) qui joue et qui induit une sensation de chaleur ou de fraîcheur sur l'occupant.

Note : En référence au climat de la Réunion, on constate qu'en période nocturne, et même en saison d'été, la température moyenne (sur 12h) est toujours inférieure d'au moins 3°C par rapport au jour. Pour les valeurs extrêmes (jour – nuit) on obtient des écarts supérieurs à 6°C. Il s'agit donc de refroidir les masses bâties la nuit (elles se sont réchauffées le jour) par une surventilation des espaces intérieurs. Au lever du jour, il faudra alors fermer les ouvertures de ventilation pour que les parois restituent en matinée la fraîcheur emmagasinée la nuit. Les ouvrants de ventilation ne seront réouverts que lorsque la température intérieure deviendra égale à la température extérieure.

L'efficacité d'une telle gestion dépend de la conception de l'ouvrage et des capacités thermiques des matériaux utilisés, mais il y a toujours intérêt à ventiler la nuit, et des gains directs en température ambiante le matin de 2°C sont facilement accessibles.

Dans ce cadre de contrôle des charges thermiques, la ventilation naturelle (décharge thermique de nuit) demande des taux de renouvellement d'air de l'ordre de 5 à 7 volumes/heure.

- **Les courants dynamiques d'air et les cheminements d'irrigation d'air** dans les zones de vie et d'activités accélèrent les échanges thermiques entre la peau des occupants et l'ambiance extérieure. Cela conduit alors à une température ressentie inférieure à celle de l'ambiance. Ainsi pour des vitesses d'air comprises entre 0,5 m/s et 1,5 m/s (écoulement turbulent et fluctuant de vitesse moyenne de 1 m/s) l'abaissement ressenti est de 4°C. Il augmente avec la vitesse d'air, mais pour des raisons de gêne (cas d'activités statiques par exemple), on évitera par la gestion des ouvrants (continuellement variable) de dépasser 2,5 m/s.

Pour cet objectif de contrôle du confort thermique des personnes, il faut développer aérodynamiquement et aérauliquement des vitesses d'écoulement suffisamment fortes (en moyenne autour de 1 m/s). Ceci se traduit par une gamme de taux de renouvellement débitant à 60 volumes/heure, et se positionnant plutôt largement au-delà (de 100 à 200 volumes/heure).

Le développement de tels systèmes fluides d'irrigation et d'extraction en ventilation naturelle est gouverné par l'exploitation appropriée des différences de pression aérodynamique induites par le vent sur les façades et les toitures des constructions. Cette différence de pression motrice induit un débit d'équilibrage dans le logement.

En partant du principe que le signal vent existe et est suffisant sur le site, l'urbanisme climatique consiste à développer et mettre en œuvre des organisations de masses bâties et des architectures externes et internes appropriées pour générer et créer des écoulements d'irrigation tant à l'intérieur des bâtiments qu'autour des constructions (balayage des couches voisines du sol).

3.2. Les mécanismes aérodynamiques et aérauliques de la ventilation naturelle

Rappelons que la réussite d'une ventilation naturelle repose sur la résolution de chaque maillon d'une chaîne : **Climatique** (vent sur le site) - **Environnementale** (topographie, histoire de la rugosité amont et de l'environnement proche) - **Aérodynamique** (organisation des masses bâties, et architectures) - **Aéraulique** (aménagement intérieur).

3.2.1. Le vent

Le vent est le moteur de la ventilation naturelle. Il est une conséquence au sol de courants d'équilibrage de différences de pression entre masses atmosphériques d'altitude, elles-mêmes régies par des effets thermiques (mer - terre). Dans les basses couches, le vent est en contact avec le sol et ses caractéristiques sont régies par la climatologie et la géographie des sites, d'une part, et la topographie du lieu et l'histoire des rugosités amont d'autre part.

Le vent est un écoulement de nature fondamentalement turbulente (Figure 4), il est variable instantanément en module (vitesse fluctuante de 50 % à 150 % de sa valeur en 3 ou 4 secondes) et en

direction (inflexion directionnelle instantanée de +/- 15° à 25°). Ce type d'écoulement (à caractère aléatoire) est caractérisé statistiquement. Il peut être cependant stationnaire en moyenne (Figure 5) (pas de temps minimum significatif : périodes de 10 min, comme adopté par Météo France).

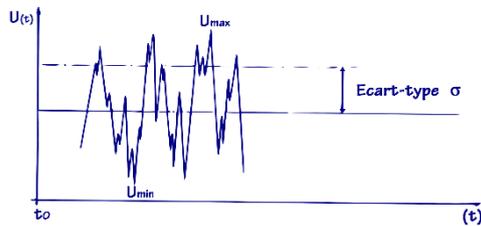


Figure 4: Vitesse du vent en fonction du temps

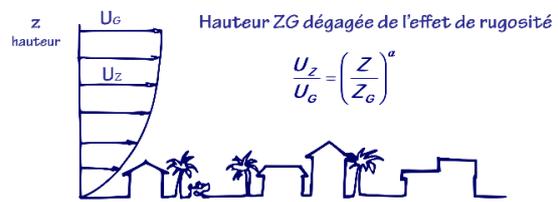


Figure 5: Croissance verticale du vent moyen

3.2.2. Le champ de pression externe

3.2.2.1. Cas d'un bâtiment isolé

A la rencontre des obstacles bâtis, le vent développe sur les constructions un champ de pressions (Figure 6) avec une répartition fluctuante de zones en sur pression ou dépression. Ce champ de pression est lui aussi turbulent, tridimensionnel et instationnaire, il n'est donc caractérisable que statistiquement (valeur moyenne, écart type, valeurs mini et maxi sur la période donnée, etc.). Ce champ est variable en fonction de la forme du bâtiment, de ses dimensions, de sa perméabilité, de ses interactions avec l'environnement immédiat, et de la direction du vent.

Note : Les pressions et vitesses sont toujours adimensionnées pour pouvoir s'affranchir de la valeur absolue de la vitesse du flux incident ($U_{ref} = U_h$ ou U_{10} , en m/s à la hauteur du bâtiment h , ou plus généralement à 10 m de hauteur). On leur donne une expression plus universelle sous forme de coefficient de pression $C_p = \frac{P_{facade} - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho U_{ref}^2}$ et de coefficient de vitesse $C_v = U/U_{ref}$ (Figure 7) avec P_{facade} la pression statique absolue pariétale en façade d'un bâtiment en Pascal, P_{ref} la pression statique absolue de référence en Pascal (la référence est prise à 10 m en amont du quartier où l'écoulement est non perturbé), ρ la masse volumique de l'air kg/m^3 , U_{ref} la vitesse de référence non perturbée à 10 m et U la vitesse locale.

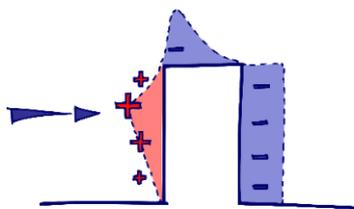


Figure 6: Répartition classique d'un champ de pression

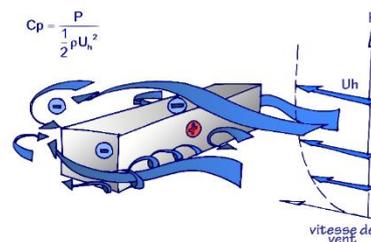


Figure 7: Coefficient de pression

3.2.2.2. Cas d'un groupe de bâtiments

Lorsque plusieurs formes bâties sont juxtaposées (plan masse), elles interfèrent aérodynamiquement et modèlent les écoulements entre elles (Figure 8, Figure 9). Par suite, le champ de pression développé sur une construction devient la résultante du système fluide vent - environnement plus ou moins complexe.

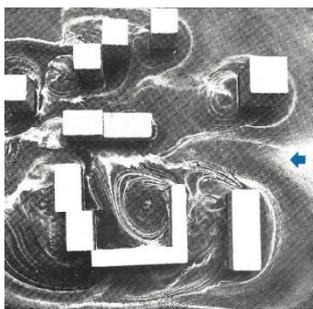


Figure 8: Visualisation par enduit du champ de vitesse au sol

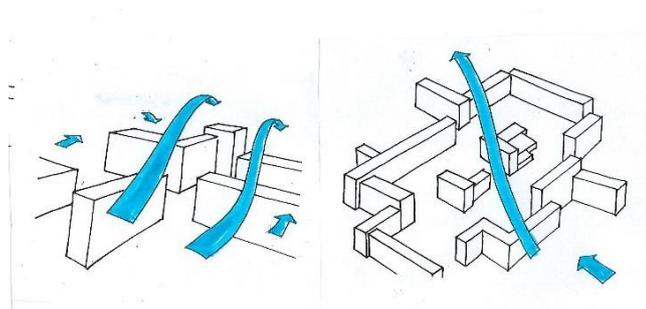


Figure 9: Interactions entre le vent et l'environnement

Le champ d'interactions aérodynamiques majeures autour d'un bâtiment particulier représente un cercle dont le diamètre est compris entre 5 et 10 fois sa hauteur.

En termes d'urbanisation climatique, on distingue plusieurs échelles d'influences et effets aérodynamiques, avec des rapports de force différents :

- L'environnement lointain : Pour un secteur de vent donné, la nature et les caractéristiques de la rugosité amont vont conditionner le gradient vertical de vitesse moyenne et la turbulence incidente. Son échelle est le kilomètre amont.
- L'environnement proche : Le quartier, avec son organisation de bâtis, fixe le jeu des irrigations et insertions fluides dans le plan masse. Son échelle est 200 m (maille type 200 m par 200 m).
- L'environnement immédiat : C'est la frange directement en interaction avec la construction, et qui se conjugue avec elle. La lisère sensible est de 3 à 5 fois la hauteur de la construction considérée (cercle type de diamètre 5 h).
- La construction concernée : Sa forme, ses dimensions relatives, son orientation, sa transparence finiront par « fixer » le champ de pression sur l'obstacle.

3.2.3. Les écoulements d'équilibrage internes (débitants)

Pour caractériser les écoulements internes, il faut passer de la « pression motrice potentielle » entre façades aux débits et vitesses. En effet, lorsqu'on relie aérauliquement des façades opposées de pression différente, il y a création d'un courant d'équilibrage débitant (Figure 10). Cependant, dans le cadre du projet VnatDOM, nous nous sommes bornés à la potentialité en pression motrice aux façades.

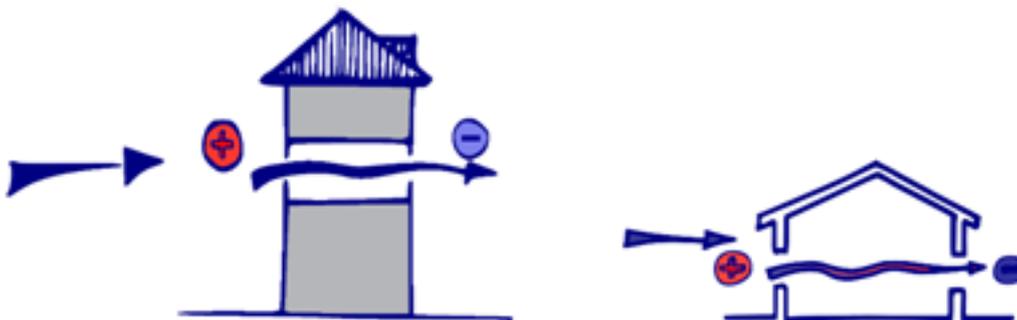


Figure 10: Courant d'équilibrage créant la ventilation naturelle traversante

L'implantation réfléchie des fenêtres et baies de façades opposées (entrées et sorties), associée à un développement approprié des cheminements fluides, et à la mise en œuvre des transparences et perméabilités (cloisonnement interne) permettent alors la création d'une dynamique de ventilation nécessaire à la décharge thermique et au confort thermique (Figure 11, Figure 12).

Ces écoulements traversants et débitants d'irrigation sont toujours orientés dans le sens de la compensation de la pression relative la plus faible. En outre on cherchera à ce que les courants

aérodynamiques et thermiques (potentiels et transitoires) se développent dans le même sens pour cumuler les effets.

Pour des raisons de dissipation d'énergie fluide au passage des ajutages et ouvertures d'entrée et de sortie (perte de charge), mais aussi de fluidité du parcours interne (obstacle, cloisons, rétrécissements de passage, etc.), la différence de pression motrice externe ne pourra se transformer que partiellement en dynamique d'irrigation.

Note: A la condition expresse que les circulations internes puissent exister par un jeu approprié de transparence intérieure, les cheminements d'air sont d'autant plus complexes et interactifs qu'il existe plusieurs entrées et sorties ; il s'opère toujours un cheminement fluide prioritaire.



Figure 11: Pas de débit d'irrigation possible

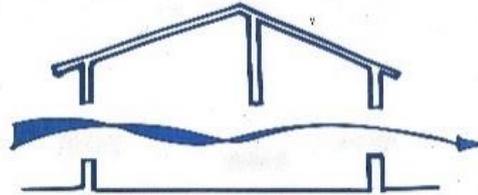


Figure 12: Cohérence des passages d'air entre façades et cloisons

Globalement le système fluide interne est lui aussi typiquement instationnaire, turbulent et constamment évolutif, comme son moteur le vent. Les vitesses d'écoulement internes sont turbulentes (et alors caractérisées par des valeurs moyennes) et varient d'un point à un autre d'un même volume (circulations conditionnées par la répartition des ouvertures propres au volume et leurs dimensions).

3.3. Méthodologie de développement d'un plan masse à fort potentiel de climatisation naturelle

3.3.1. Evaluation du signal vent sur le site

Avant d'entreprendre un travail aérodynamique sur l'organisation du plan masse, il faut s'assurer qu'il existe une irrigation minimum du site : En approche empirique, on estime que le seuil de vitesse moyenne sur 10 min du vent de 2,5 m/s est atteint et dépassé, en été, de jour pendant plus de 50% du temps (à 10 m de hauteur, en zone dégagée de constructions). De même il sera nécessaire de connaître les directions dominantes des vents sur le site.

Sans ces données de signal vent d'irrigation du site, il est illusoire de prétendre faire une contribution adaptée et efficace sur la mise en œuvre d'un programme d'urbanisation climatique.

Note: Cette connaissance suppose un **recalage climatique** des données météorologiques (les plus proches). L'exercice peut se faire théoriquement (méthodes numériques fiables et/ou analogie en ordre de grandeur) mais on préférera et recommandera toujours l'**implantation** (temporaire) **d'un pylône anémométrique** (Figure 13) (vitesses et directions sur une période estivale, *a minima*).

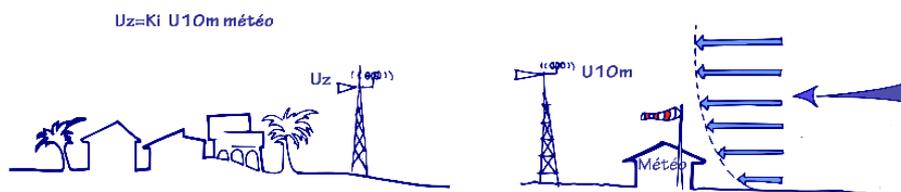


Figure 13: Evaluation du vent avec un pylône

3.3.2. Qualification et quantification des champs de pression sur les masses bâties et du champ de vitesse entre les bâtiments

3.3.2.1. L'objectif

La réussite d'une ventilation naturelle efficace transversale repose sur l'existence d'une différence suffisante de pression motrice entre façades.

Ce traceur quantitatif clé doit permettre la détermination et la comparaison des divers champs de pression obtenus en fonction des aménagements et organisations du bâti proposées : Les formes et architectures, leurs dimensions relatives, les associations et juxtapositions (orientées ou pas), les transparences, la création de brèches et de discontinuité, le développement de pilotis, etc. sont les paramètres aérodynamiques de l'urbanisme climatique.

Pour caractériser totalement le potentiel climatique d'un plan masse, il faut associer au champ de pression développé sur les constructions la connaissance des champs de vitesse entre bâtiments. Une dynamique suffisante de ces écoulements permet de réussir le confort thermique extérieur au niveau piédestre d'une part, et un développement approprié de la végétation (Figure 14).

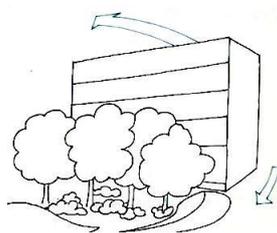


Figure 14: Une représentation d'un espace extérieur

En synthèse, il faut donc deux qualifications pour caractériser les performances bioclimatiques d'un quartier : l'une majeure, ce sont **les champs de pression** sur les façades et l'autre complémentaire que sont **les champs de vitesse au niveau du sol** (couche 1 à 3 m de hauteur).

3.3.2.2. Les outils et méthodes de simulation aérodynamique

La connaissance de ces champs de pression et de vitesse pour une configuration ou un aménagement donné requiert une approche en simulation lourde à mettre en œuvre et demandant une grande expertise. Les outils disponibles sont de deux types, complémentaires :

- La **simulation physique** en soufflerie turbulente est la référence scientifique :

Depuis 50 ans le monde du Wind Engineering, en charge de tous les dimensionnements au vent des grands ouvrages de génie civil et des constructions (hors architecture standard), utilise en permanence la simulation physique.

Historiquement, et pendant des décennies, le Wind Engineering a construit et mis au point cette méthode, a comparé et confronté les résultats obtenus entre différentes souffleries atmosphériques et des mesures en vraie grandeur (bâtiments équipés de capteurs et campagnes de mesures spécifiques). Ainsi, ont pu être développées de manière partagée les meilleures approches et méthodes expérimentales de simulation (dont les techniques de restitution à échelle réduite des caractéristiques statiques et dynamiques du vent), les technologies de capteur, ou encore les modes de dépouillement et traitement statistique de données.

- La **simulation numérique de la dynamique des fluides** (Computation Fluid Dynamics) :

Elle repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes par la méthode des volumes finis. Le domaine de calcul est discrétisé en cellules dans lesquelles les équations sont simplifiées et résolues par itération.

Dans le cadre du projet VnatDOM, les expérimentations dédiées sur maquettes en soufflerie au Laboratoire aérodynamique Eiffel ont permis à Mines de Paris de mettre au point un outil de simulation numérique propre au développement d'un urbanisme climatique, en milieu tropical humide.

3.3.3. Présentation des grandeurs aérodynamiques caractéristiques de l'urbanisme climatique : champs de pression et de vitesse

Les grandeurs sont des moyennes temporelles mesurées sur maquette ou calculées par approche numérique, et adimensionnelles (Figure 15) pour pouvoir être généralisables. Ces grandeurs sont :

$$C_v = \frac{U_j}{U_{ref}}$$
$$\Delta C_p = \frac{P_{façade,1} - P_{façade,2}}{1/2 \rho U_{ref}^2}$$

Elles deviennent dimensionnelles dès que l'on fixe une valeur de la vitesse de référence U_{ref} à 10 m de hauteur à l'amont du site :

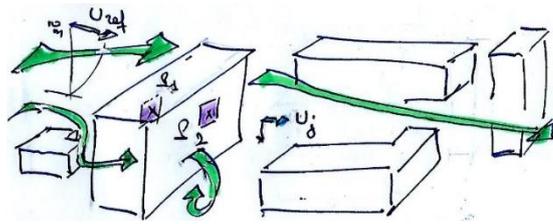


Figure 15: Coefficient de vitesse local (point j) et Coefficient différence de pression « motrice » locale à la hauteur z

3.4. Paramètres aérodynamiques influents

Les résultats expérimentaux de champs de pression sur des obstacles en écoulement à couche limite sont transposés aux bâtiments dans un environnement particulier. Les effets suivants sont à signaler :

- Une organisation du bâti privilégiant les directions des vents dominants. En d'autres termes, il faut favoriser des grandes dimensions plutôt perpendiculaires au vent qui induisent des pressions motrices augmentées.
- Une forte compacité (densité de constructions élevée et hauteurs uniformes par exemple) entrave la pénétration du flux d'air ; de ce fait l'écoulement global du vent contourne le quartier (Figure 16), notamment par le dessus, en uniformisant les différences de pression sur les bâtiments (sauf pour les émergences).

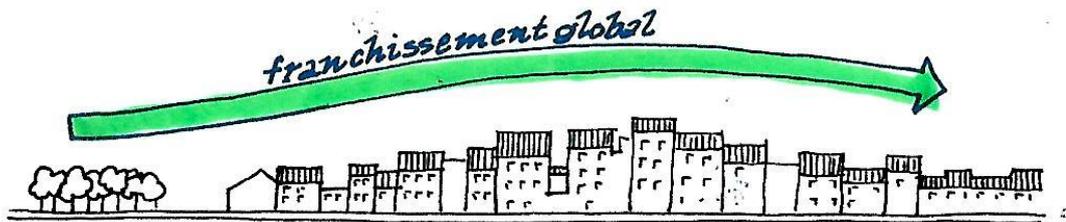


Figure 16: Principe d'un contournement global

Au changement de hauteur de rugosité entre une zone lisse (non bâtie) et une rugueuse, il existe un espace de transition dans lequel et bien que freinés, les flux d'air pénètrent. En conséquence, l'organisation du bâti est importante sur le potentiel de ventilation. Au-delà d'une distance de transition de l'ordre de 20 fois la hauteur moyenne des bâtiments, H_{moyen} , l'organisation du bâti influence peu le développement du potentiel de ventilation (le champ de pression devient plus uniforme), le vent contournant alors fortement par le dessus les rugosités. A l'aval de cette zone de transition, seules les unités émergentes de la rugosité peuvent « accrocher » un bon potentiel après $20 H_{moy}$ (Figure 17).



Figure 17: Schéma d'une transition de rugosité

- Plus les constructions ou obstacles bâtis émergent de la rugosité environnante (paramètre de hauteur) d'une part, et plus les dimensions (hauteur et largeur) sont importantes perpendiculairement au vent d'autre part, plus le vent rentrera en interaction avec l'obstacle et mieux il fixera sur les masses bâties un champ de pression fort et stable (Figure 18).

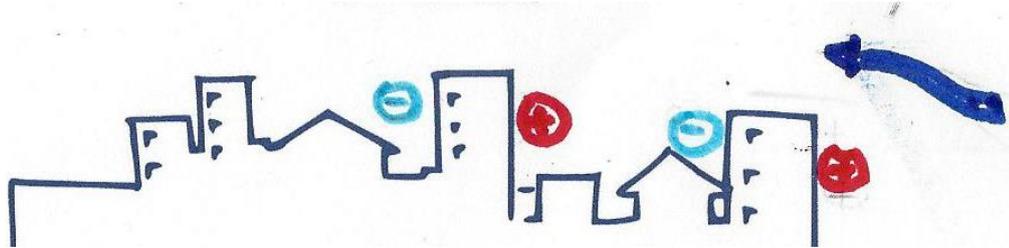


Figure 18: Plan masse avec fixation des masses bâties

Note: En conséquence pratique, il y a intérêt à développer des formes à architecture monolithique (Figure 19) qui présentent un comportement global déterminant par rapport au vent.

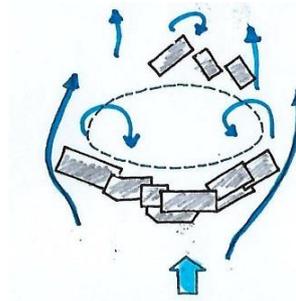


Figure 19: Plan masse monolithique orienté

- Les perméabilités des constructions ou /et les transparences locales (passages, etc.), ou encore la présence de pilotis n'altéreront en rien le champ aérodynamique développé sur les bâtiments tant que ces transparences ne dépassent pas 30% de la surface au vent des façades.
- Les environnements lointain et amont du quartier fixent, par jeu statistique des rugosités, le gradient et la turbulence incidents, mais aussi l'impact aérodynamique d'un éventuel masque statistique lié aux hauteurs moyennes relatives entre quartiers (Figure 20).

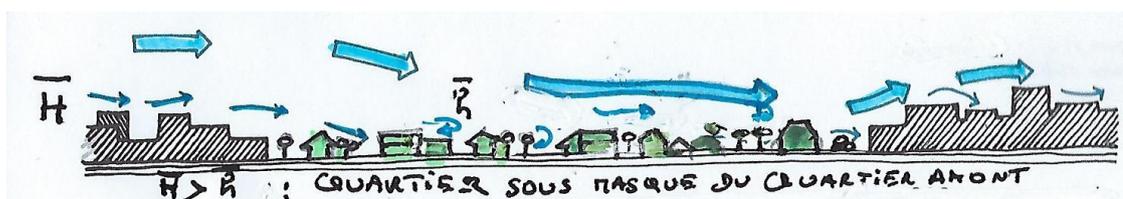


Figure 20: Effet de masque statistique

- L'environnement immédiat est déterminant, et toute juxtaposition de construction dans un espace de $3H$ autour du bâtiment étudié constitue un système aérodynamique global indissociable (Figure 21).

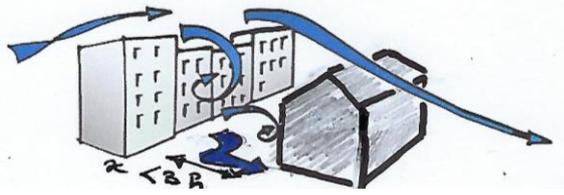


Figure 21: Jeu d'interactions entre bâtiments proches

- L'irrigation des espaces extérieurs :

Le vent étant une fonction croissante de la hauteur, les pressions motrices de la ventilation traversante des logements sont moins fortes dans les bas niveaux. Aussi, en urbanisme climatique, il faudra toujours compléter par une irrigation au voisinage du sol, d'une part pour rendre les espaces intermédiaires ventilés et confortables pour les piétons, et d'autre part développer le végétal qui induit une baisse de température locale pour les logements voisins du sol. Ces précautions compensent le moindre potentiel en ventilation naturelle des bas niveaux.

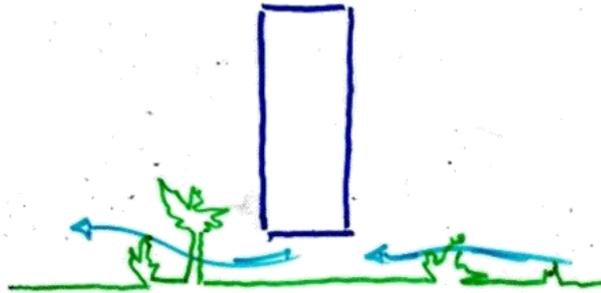


Figure 22: Schéma pilotis

Précisons que la réalisation de bâtiment sur pilotis (Figure 22) n'altère que très peu la différence de pression entre façades, et cela, d'autant moins que le bâtiment est grand et haut

4. Principaux résultats pour favoriser le potentiel de ventilation naturelle issus du modèle numérique

4.1. Présentation du modèle numérique

4.1.1. La méthode CFD

Dans le cadre du projet VnatDOM, l'outil de simulation numérique des écoulements des fluides et de leurs interactions avec des obstacles a été calé puis validé à partir d'essais en soufflerie. Pour de plus amples informations sur les principales hypothèses, le paramétrage de la simulation ainsi que les limites de l'approche, le lecteur pourra se référer à la thèse de Valentin Delpanque (2019). Une fois validée, la simulation numérique permet de faire un grand nombre d'études paramétriques complétant les essais en soufflerie. Dans le cas abordé dans ce guide, elle permet d'étudier l'écoulement du vent dans un environnement urbanisé, en générant un nombre important de configurations urbanistiques.

Avant de présenter les résultats d'études, la méthodologie et les enseignements issus des expérimentations en soufflerie et numériques sont précisés pour faciliter l'interprétation des résultats :

- Les valeurs numériques obtenues (pressions et vitesses) sont équivalentes à des valeurs moyennes temporelles, et le vent (comme en simulation physique) est défini comme stationnaire (en moyenne) en direction et force.
- Les phénomènes thermiques sont négligés. C'est-à-dire que l'on considère que les mouvements d'air induits localement par le vent dans les milieux bâtis balayent tous les effets de convection naturelle.
- Pour connaître le champ de pression entre façades des bâtiments d'un quartier, on considère un ou des bâtiments de référence insérés dans le tissu urbain. Ces bâtiments ont une enveloppe géométrique simplifiée (Figure 23, Figure 24) et une implantation spatiale variable dans un quartier pour rendre compte des phénomènes aérodynamiques d'interactions entre immeubles et d'exposition au vent (champs de pression induits).

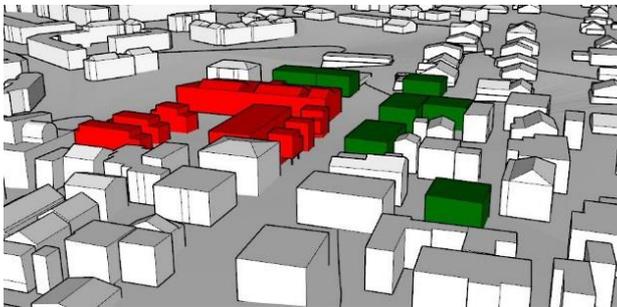


Figure 23: Simplification numérique



Figure 24: Simplification physique

- Les évolutions de pression motrice ΔC_p , suivant les diverses configurations, sont moyennées par façade, en distinguant dans le calcul les couches inférieures et les couches supérieures (Figure 25).

Dans la présentation des résultats finaux, et dans une optique de simplification de l'expression des résultats opérationnels, les deux niveaux ont été en général regroupés.

Dans certains cas d'étude, le ou les bâtiments témoins peuvent être surélevés compte tenu de la mise en œuvre de pilotis.

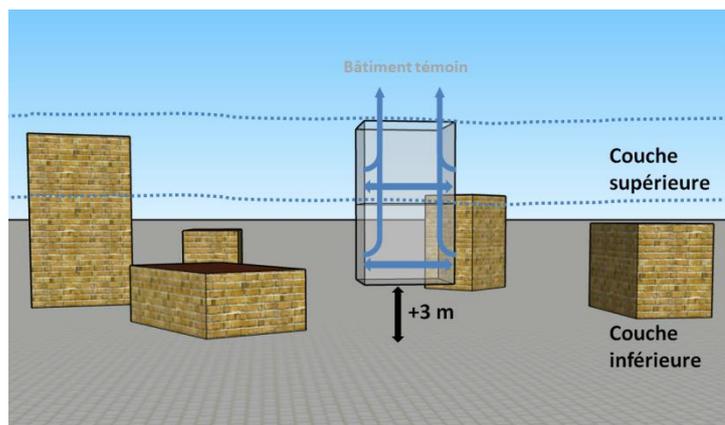


Figure 25: Présentation d'un bâtiment témoin et des 2 couches

- Par rapport aux architectures réelles, seule l'enveloppe des bâtiments est considérée, et certaines simplifications de forme (élimination de détails de surface) doivent être faites pour des raisons de temps de calcul d'une part et pour supprimer des effets de bruits aérodynamiques locaux non significatifs vis-à-vis des paramètres étudiés d'autre part.
- Le terrain est considéré comme plat, sans variations topographiques. Les études en simulation physique montrent que les effets d'une topographie simple telle qu'une pente orientée (jusqu'à 15 %) ne modifient pas les résultats ou les tendances concernant l'effet d'une organisation bâtie, sauf quand le vent « descend » la pente. Dans ce cas, les effets favorables (grands ΔC_p) sont alors largement réduits par rapport à ceux obtenus en sol plat. En conséquence, et pour une généralisation de l'étude, mieux vaut se placer dans l'hypothèse du sol plat.
- Le tissu urbain, reproduit des organisations réelles de plan masse observées à la Réunion. Il est relativement homogène avec peu d'émergences prononcées (quelques bâtiments de plus de 6 étages).
- Le profil vertical du vent et de la turbulence sont fixés en entrée du domaine de calcul pour être représentatif d'un terrain à urbanisation semi dense, de type IIIa au sens de l'EUROCODE.

4.1.2. Limites de l'interprétation des résultats

4.1.2.1. Reproductivité des phénomènes climatiques turbulents

Les phénomènes climatiques en général, et le vent en particulier sont de nature turbulente. On observe une plage de dispersion importante, même avec des conditions limites extérieures du système exactement semblables.

Ainsi dans la réalité physique la plus optimiste, on constate qu'en vraie grandeur, avec des régimes de vent pourtant quasi idéalement stabilisés en module et direction sur des séquences de 10 min et des mesures moyennées statistiquement sur 10 min, les coefficients de pression C_p varient de plus ou moins 30 à 35 %. On observe la même fourchette de variation pour les valeurs de ΔC_p . Pour les coefficients C_v de vitesse, la fourchette de reproductibilité est de plus ou moins 15 à 20 %.

En simulation physique sur maquette, en soufflerie turbulente calibrée sur le vent incident, la stationnarité des phénomènes dynamiques est simplifiée (pas d'effets climatiques et thermiques associés) et la dispersion des mesures de pression et de vitesse plus réduite. De ce fait, les coefficients de pression C_p et ΔC_p ne varient que de +/- 10 % et les coefficients de vitesse C_v de +/- 5 %.

4.1.2.2. Seuil de significativité des résultats

Nous avons pu constater, lors de mesures en vraie grandeur et de simulations associées en soufflerie, qu'il faut des ΔC_p entre façades supérieurs à 0,2 pour que se créent des écoulements de ventilation efficaces et continus. De même, pour les vitesses de balayage, que ce soit à l'intérieur ou à l'extérieur des bâtiments, la condition d'existence d'un flux demande un coefficient de vitesse local C_v supérieur à 0.1.

Il est donc essentiel lors d'une étude d'urbanisme climatique et lorsqu'on analyse les résultats de simulation numérique de garder cette fourchette d'incertitude et les seuils de significativité issus de la simulation physique.

Ainsi, de façon pratique, lorsqu'on comparera les résultats de simulation numérique portant sur deux aménagements d'urbanisme différents, on considérera uniquement comme tendance ou évolution significative des écarts de ΔC_p supérieurs à 20 % et ceux sur les C_v supérieurs à 10 %.

Nous proposons donc la grille de ΔC_p suivante pour qualifier le potentiel de ventilation naturelle d'une construction (Figure 26):



Figure 26: Echelle ΔC_p

Et pour l'irrigation aéraulique des espaces extérieurs caractérisée par C_v (Figure 27):



Figure 27: Echelle C_v

Entre deux options d'aménagement, l'évolution des champs de pression et de vitesse au sol n'est pas forcément la même, mais on cherchera toujours à améliorer les deux aspects ΔC_p et C_v . Cependant, en conception aérothermique (dynamique et thermique), et pour réussir un quartier bioclimatique, on peut se donner deux objectifs :

- Pour des ΔC_p dans la gamme viable (de 0,2 à 0,3) on cherchera à obtenir une bonne irrigation des espaces extérieurs sol ($C_v > 0,2$)
- Pour des ΔC_p bons ($\Delta C_p > 0,3$) on pourra accepter une ventilation moyenne ($C_v > 0,1$)

4.1.3. Sensibilité aux dérives de direction du vent à +/- 10° près

La sensibilité à la direction du vent du champ de pression est très prononcée, et une prévision quantitative significative suppose un pas angulaire inférieur à 20°. D'autre part, il faut restituer les caractéristiques turbulentes du vent baignant le site. C'est pourquoi la notion de moyennage arithmétique de valeurs obtenues sur plusieurs directions n'a pas de sens physique. Cette remarque est illustrée sur le schéma suivant (Figure 28) qui présente un exemple d'estimation du potentiel développé sur un immeuble situé dans la ville du Port à la Réunion.

Les points en orange correspondent au potentiel en ventilation traversante et les points en violet le potentiel par tirage dépressionnaire pour chacune des directions. Par exemple, le secteur allant de 160° à 200° fait apparaître des divergences de potentiel très marquées prouvant que la notion de moyenne n'a pas de sens physique.

La ventilation traversante est la différence de pression motrice entre les 2 façades prépondérantes d'un bâtiment.

Le tirage dépressionnaire est la différence de pression motrice entre une façade prépondérante au vent ou sous le vent avec la dépression en toiture.

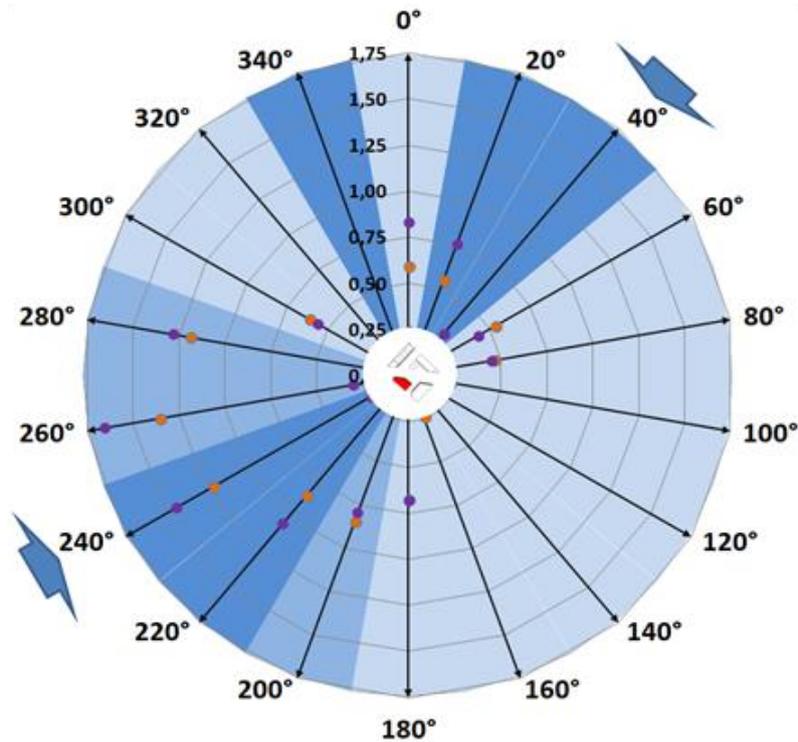


Figure 28: Rose des potentiels pour un bâtiment situé dans la ville du Port à la Réunion - ΔC_p en fonction de l'orientation du vent
 (Les zones en bleu foncé correspondent aux vents dominants, la zone en blanc au seuil de significativité des ΔC_p , les points en orange à la ventilation traversante et les points en violet au tirage dépressionnaire)

4.1.4. Sensibilité du modèle aux variations locales d'implantation du bâtiment témoin dans son environnement immédiat

Les interactions locales correspondent aux effets des bâtiments proches de celui étudié qui dépendent de la direction du vent et des conditions de turbulence. Pour en évaluer l'effet, le bâtiment étudié est déplacé de $\pm L/4$, L désignant sa dimension (Figure 29). Ces variations locales sont une source d'incertitude dans le diagnostic du potentiel d'un site.

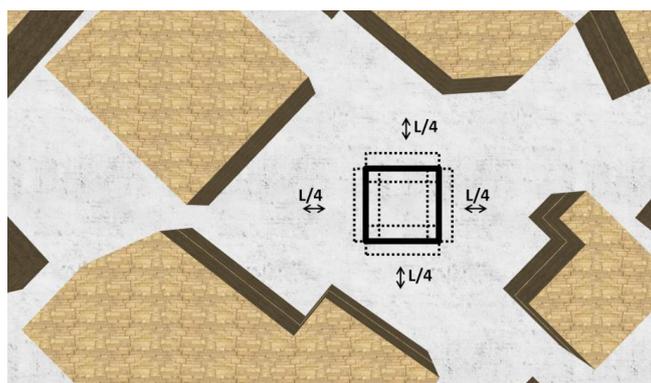


Figure 29: Variation de l'implantation d'un bâtiment témoin

Des précautions sont donc à prendre dans l'interprétation des résultats et nous donnons quelques éléments quantitatifs :

- Incertitude sur les façades en surpression au vent : ± 10 à 30% d'écart à la moyenne
- Incertitude sur les façades en dépression : $\pm 5\%$ d'écart à la moyenne

La seule variation de $L/4$ de l'implantation d'un bâtiment par rapport à son environnement immédiat peut engendrer des variations de potentiel de pression (ΔC_p) entre 6% et 25% .

4.1.5. Confrontation entre l'approche sur maquette physique en soufflerie turbulente et le modèle numérique : exemple type et conclusions

Des écarts significatifs ont été détectés sur les potentiels de ventilation par tirage dépressionnaire entre les modèles numériques et les essais en soufflerie. La CFD a tendance à sous-estimer les dépressions en toiture d'environ 30 % (Figure 30).

La Figure 30 présente des ΔC_p en tirage dépressionnaire de plusieurs bâtiments et pour différentes directions de vent. En abscisse, sont présentées les valeurs mesurées en soufflerie, en ordonnée, celles calculées par le modèle CFD. **On remarque que dans une majorité des cas, la CFD prévoit un potentiel de ventilation inférieur à ce que prévoit la soufflerie.**

Note : la zone des ΔC_p inférieurs à 0,2 n'est pas analysée pour les raisons mentionnées précédemment.

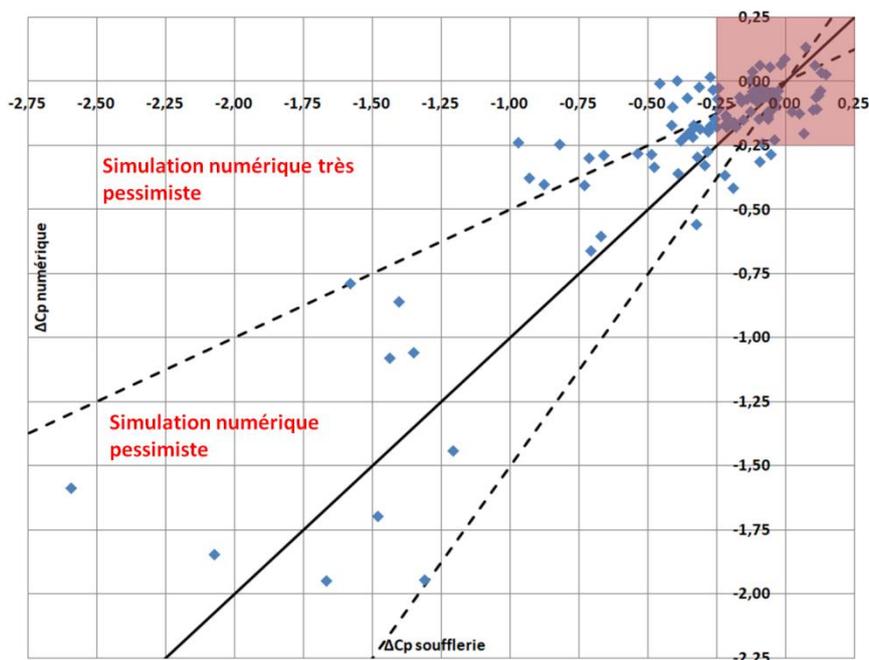


Figure 30: ΔC_p dépressionnaire - Numérique VS Soufflerie

4.2. Définition des paramètres caractérisant l'aérodynamique d'un plan masse

En utilisant l'enseignement des études de la bibliographie et les résultats physiques que nous venons de détailler, nous avons défini un nombre limité de paramètres aérodynamiques fondamentaux qui vont caractériser l'urbanisation.

4.2.1. Présentation des paramètres

- **L'échelle du quartier** et la maille de sensibilité aérodynamique (précédemment évoquée) est une unité carrée bâtie de 200 m par 200 m (Figure 31).

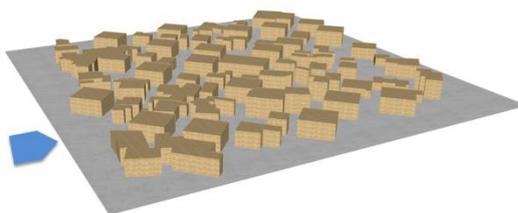


Figure 31: Quartier type 200 m x 200 m

- **Le taux d'occupation surfacique des sols (λ_p)**

λ_p (en %) représente la proportion de surface construite au sol et qui rend compte de la « fluidité » d'irrigation d'un quartier. Sa plage réaliste de variation est de 0 à 50 % (Figure 32).

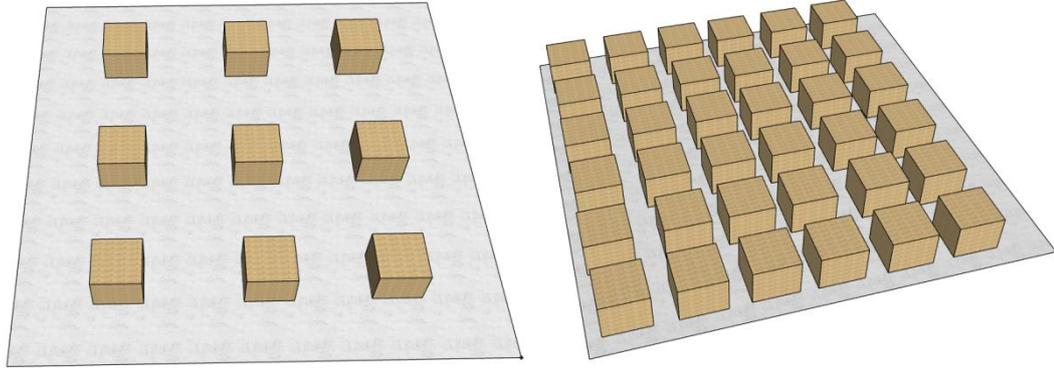


Figure 32: Présentation de λ_p ($\lambda_p = 10\%$ à gauche, et 40% à droite)

- **La hauteur moyenne H_{moy} et la variabilité des hauteurs σ/H_{moy} du quartier**

Pour un quartier de hauteur moyenne de bâtiments (H_{moy}), le paramètre adimensionnel de variabilité σ/H_{moy} caractérise les écarts de hauteur qui peuvent être rencontrés (écart type des hauteurs : σ).

Cette variabilité verticale renseigne sur les effets de brassage tridimensionnels et l'existence de retombées de flux depuis les couches supérieures vers les couches inférieures.

La plage étudiée pour H_{moy} va de 2 à 11 m

La plage de variabilité retenue pour σ/H_{moy} va de 0 à 20 % (Figure 33).

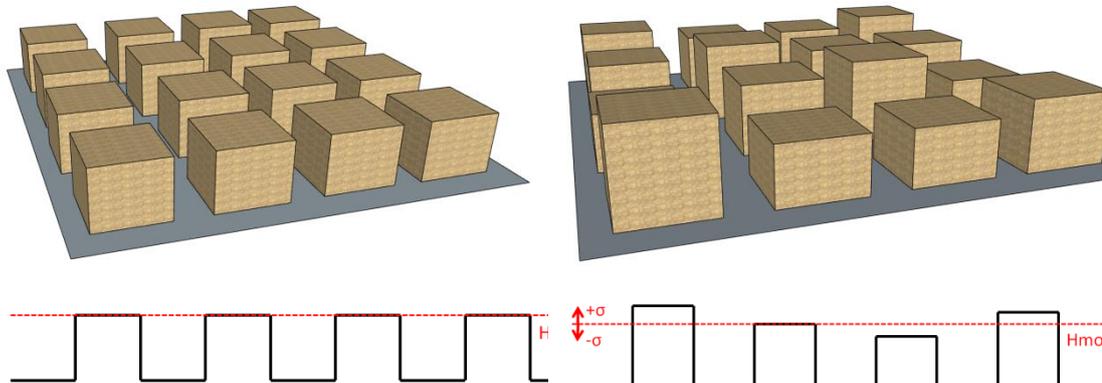


Figure 33: Tridimensionnalité des couches supérieures ($\sigma/H_{moy} = 0\%$ à gauche, et 20% à droite)

- **La rugosité des quartiers amont et témoin**

Ce paramètre est défini comme suit :

$$R_a = \frac{H_{moy}}{2} (1 + \lambda_p)$$

La rugosité aérodynamique R_a (Figure 34) permet d'évaluer les effets de ralentissement ou de masque d'un quartier amont. Cette définition de la rugosité prend en compte la hauteur moyenne des bâtiments et le taux d'occupation des sols. Elle permet de modéliser le phénomène de « hauteur de déplacement », à partir d'une certaine rugosité tout se passe comme si le vent se déplaçait au-dessus de la rugosité bâtie.

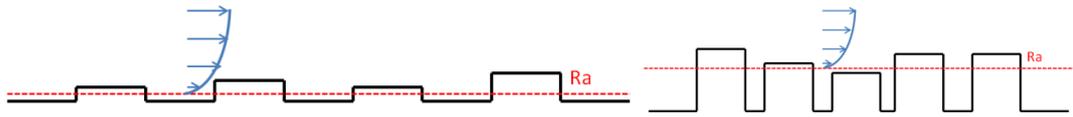


Figure 34: Rugosité aérodynamique (faible R_a à gauche, fort R_a à droite)

La plage de variabilité retenue pour R_a est de 0 à 7 m avec la définition retenue.

La vitesse adimensionnelle d'irrigation au sol, pour le secteur « i » d'un espace intermédiaire extérieur : $C_v = V_i/V_{ref}$

4.2.2. Indépendance des paramètres et influences relatives

Il est important de s'assurer que les paramètres retenus ne se recouvrent pas et sont complémentaires. Sur la Figure 35 sont présentés $R_{a,amont}$ et σ/H_{moy} en fonction de λ_p pour un ensemble de quartiers modélisés. On remarque bien qu'il n'existe aucune tendance entre ces paramètres et qu'ils sont indépendants les uns les autres. Ils vont donc pouvoir décrire correctement un quartier.

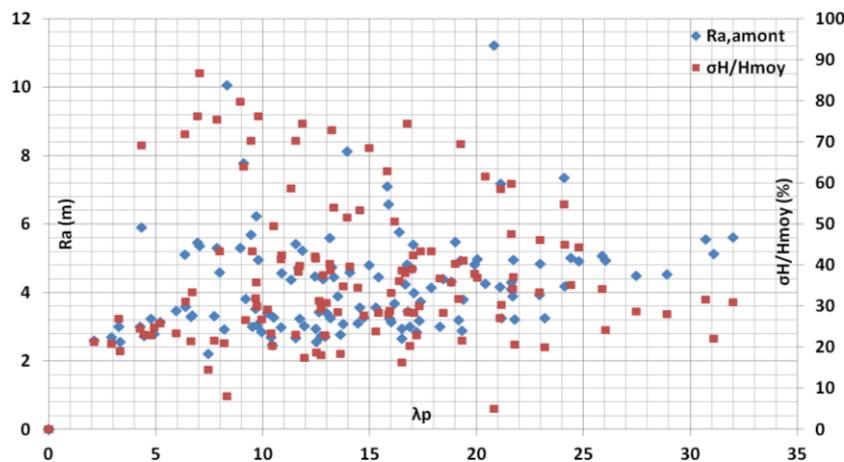


Figure 35: Indépendance des paramètres

4.3. Analyse des résultats du modèle numérique pour favoriser le potentiel de ventilation naturelle

4.3.1. Cas d'un plan masse non orienté au vent

L'objectif est d'évaluer de manière statistique, le potentiel de ventilation médian à l'échelle d'un quartier en fonction de ses paramètres caractéristiques. On recherche la possible existence ou non d'une stratégie d'urbanisation favorisant la ventilation naturelle.

On notera que pour un même jeu de paramètres, un échantillon de plusieurs quartiers a été testé pour éviter de tomber dans un cas particulier et donc s'assurer que les résultats sont extrapolables à tout quartier de mêmes caractéristiques.

On s'intéresse en particulier à l'effet de la densification des sols (λ_p). Le Tableau 1 présente les potentiels médians quantifiés en ΔC_p pour différentes valeurs de λ_p et en distinguant

- VT : ventilation traversante (entre façades)
- TD AR : tirage dépressionnaire entre la façade sous le vent et une prise en hauteur
- TD AV : tirage dépressionnaire entre la façade au vent et une prise en hauteur

La couche inférieure est située à $3 \text{ m} + H_{moy}$ et la couche supérieure à $3 \text{ m} + 2 H_{moy}$

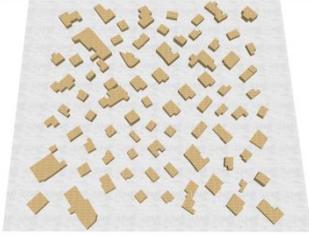
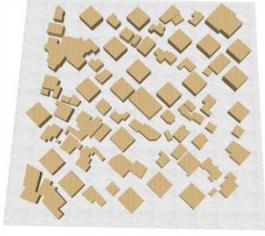
λ_p	20 %			30 %			40 %		
Quartier type									
Option	VT	TD AR	TD AV	VT	TD AR	TD AV	VT	TD AR	TD AV
ΔC_p Couche supérieure	0,94	0,30	1,24	0,94	0,24	1,20	0,66	0,10	0,8
ΔC_p Couche inférieure	0,56	0,27	0,85	0,41	0,20	0,58	0,3	0,12	0,41

Tableau 1: Potentiel de ventilation en fonction de λ_p

Complément sur le champ de vitesse :

Pour rappel ce champ qui évalue la fluidité aéroluque des espaces extérieurs est défini par :

$$C_v = \frac{V_{loc}(1,5\text{ m})}{V_{ref}(10\text{ m})}$$

Le Tableau 2 présente les gammes de C_v moyen pour des taux d'occupation des sols usuels

λ_p	20 %	30 %	40 %
C_v			

Tableau 2: C_v en fonction de λ_p

Il est bon jusqu'à $\lambda_p = 30\%$ et encore viable à $\lambda_p = 40\%$. A noter qu'il est possible de rencontrer dans un quartier à $\lambda_p = 20\%$, une fluidité excellente dans 40 % du quartier contre 18 % dans un quartier à $\lambda_p = 40\%$.

Conclusions opérationnelles

Urbaniser à 40 % d'occupation des sols plutôt qu'à 20 % diminue le potentiel de ventilation traversant dans les basses couches d'environ moitié (niveaux à la limite de la significativité).

Le tirage dépressionnaire à partir de la façade au vent permet de garantir un potentiel intéressant quel que soit le taux d'occupation des sols.

Le potentiel de ventilation traversante dans les couches supérieures reste toujours bon.

De manière générale, les ΔC_p dans les basses couches et dans les couches supérieures évoluent dans le même sens en fonction des options d'aménagement. Cependant leur augmentation n'est pas forcément la même.

4.3.2. Environnement favorable au développement d'une urbanisation à potentiel de ventilation naturelle

L'environnement amont (paramètre R_a), pour à une direction de vent incident conditionne grandement l'efficacité d'une organisation aérodynamique dédiée du quartier. De plus, ce sont les valeurs comparées entre les rugosités de l'environnement amont et du quartier étudié qui fixent le potentiel de développement de la ventilation naturelle :

4.3.2.1. Transition de rugosité

Cas $R_{a1} = R_{a2}$

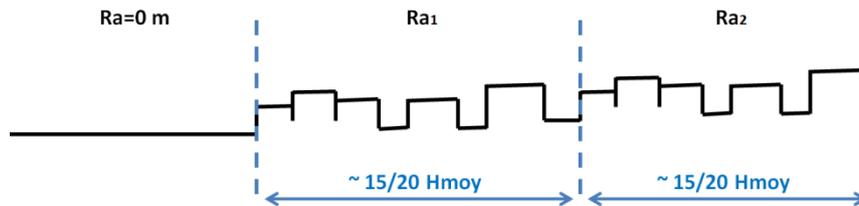


Figure 36: Transition de rugosité $R_{a1} = R_{a2}$

Les résultats montrent que le potentiel ΔC_p reste significatif dans les hautes couches lorsqu'un bâtiment sort un peu de la rugosité bâtie.

Si $\lambda_p = 20\%$, dans les basses couches, le potentiel de ventilation naturelle redevient significatif dans le quartier aval après une distance de transition d'environ $10 H_{max}$. Autrement dit, on retrouve dans le quartier aval (R_{a2}) le même potentiel que dans le quartier amont comme si l'environnement amont (R_{a1}) n'avait pas été introduit (Figure 36).

Si $\lambda_p = 40\%$, la présence d'un environnement amont n'a que peu d'influence, le potentiel étant déjà mauvais.

Cas $R_{a1} > R_{a2}$

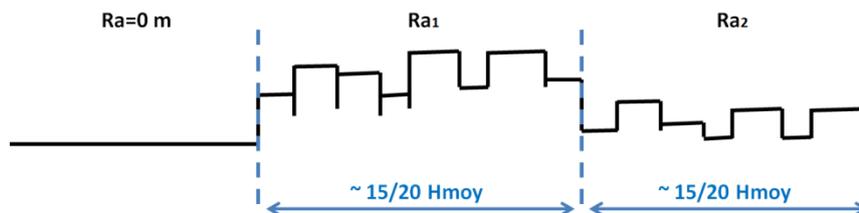


Figure 37: Transition de rugosité $R_{a1} > R_{a2}$

Si $\lambda_p = 20\%$, alors l'introduction d'un environnement amont (Figure 37) de rugosité supérieure de 0,5 à 0,75 m induit une diminution du potentiel de ventilation d'environ 30 % dans les cas testés.

Si $\lambda_p = 40\%$, même conclusion que précédemment, la présence de l'environnement amont n'a que peu d'influence, le potentiel étant mauvais.

4.3.2.2. Notion de « lisière »

Dans le cas d'un quartier ayant un environnement amont nu, il est possible d'introduire une dimension de lisière (Figure 38). Après une distance d'environ 15 à 20 H_{moy} , les champs de pression sont globalement inchangés. Mais dans la zone en contact direct avec la lisière, on observe une phase de transition pendant laquelle le profil de vent s'adapte au terrain urbanisé.

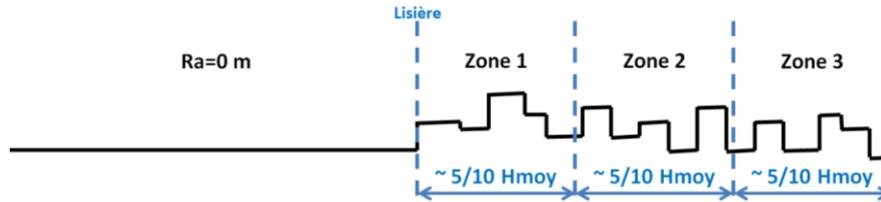


Figure 38: Présentation des 3 subdivisions de profondeur 5-10 H_{moy}

Le Tableau 3 présente l'évolution du potentiel de ventilation traversant dans chaque tranche entre 5 et 10 H_{moy} pour 3 quartiers de taux d'occupation des sols différents.

Potentiel de ventilation traversante ΔC_p en fonction de la distance à la lisière									
λ_p	20 %			30 %			40 %		
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 1	Zone 2	Zone 3
ΔC_p Couche supérieure	1,11	0,92	0,95	1	0,95	0,73	1,35	0,53	0,32
ΔC_p Couche inférieure	0,68	0,36	0,50	0,48	0,48	0,33	0,65	0,23	0,1
Ecart en ΔC_p par rapport au quartier entier									
Couche Supérieure	+17 %	-2 %	+1 %	+6 %	+1 %	-22 %	+104 %	-20 %	-51 %
Couche Inférieure	+22 %	-35 %	-11 %	+17 %	+17 %	-20 %	+116 %	-23 %	-66 %

Tableau 3: Potentiel de ventilation en fonction de la distance à la lisière

Conclusions opérationnelles

Au sein d'un quartier construit en périphérie d'une ville et au vent, il faut garder à l'esprit que la distance à la lisière joue un rôle important. Le potentiel diminue en avançant dans le quartier. Cette transition se fait d'autant plus ressentir que le quartier est dense et que l'on se situe dans les basses couches.

4.3.2.3. Emergences

La variabilité de la hauteur d'un quartier a été testé pour 3 niveaux: $\sigma/H_{moy} = 0, 20$ et 80% dans des quartiers à $\lambda_p = 20\%$ et 40% . Du passage de 0 à 20% de tridimensionnalité (voir Figure 33), il semble bien exister une évolution favorable des champs de pression avec une augmentation du potentiel traversant d'environ 10% dans les couches supérieures, sans impact dans les couches inférieures. Une variation de 10% dans les couches supérieures est limitée pour pouvoir réellement conclure qu'il y a une influence, cependant cette élévation va dans le sens de la littérature. Le cas d'étude d'un quartier très hétérogène

en hauteur de bâtiments, avec un $\sigma/H_{moy} = 80\%$, est une situation extrême montrant clairement une forte diminution du potentiel de ventilation d'environ 50% dans les couches supérieures et à des niveaux à la limite de la sensibilité dans les couches inférieures.

La présence d'émergences se traduit par un léger gain entre 0% et 20% de variation de σ/H_{moy} , sensible uniquement dans les couches supérieures. Les couches inférieures ne sont pas affectées par le jeu de tridimensionnalité pour la gamme testée.

Une variation de σ/H_{moy} de 80% est un cas très limite qui nécessite de travailler à l'échelle du bloc car cette tridimensionnalité induit des différences de hauteurs très importantes avec des effets de masque important à certains emplacements.

4.3.2.4. Intérêt des pilotis

Dans un environnement déjà construit, placer un bâtiment sur pilotis de 3 à 4 m permet d'une part d'améliorer l'irrigation des espaces extérieurs et d'autre part de créer une émergence au-delà de la rugosité bâtie et donc de profiter d'une dynamique de vent plus importante et moins perturbée.

Quelques éléments quantitatifs :

Potentiel de ventilation traversant dans les basses couches - $\lambda_p=20\%$		
Option	Bâtiment au sol	Bâtiment sur pilotis
ΔC_p Couche inférieure	0,22	0,55

Tableau 4: Potentiel de ventilation de la mise sur pilotis d'un bâtiment isolé

Conclusions opérationnelles

Dans un quartier standard ($\lambda_p = 20\%$, $\sigma/H_{moy} = 20\%$ et $H_{moy} = 6\text{ m}$), la mise sur pilotis dans un environnement au sol permet (Tableau 4) :

- Dans les couches supérieures, un potentiel amélioré même s'il était déjà convenable sans pilotis.
- Dans les basses couches, un potentiel intéressant - Augmentation supérieure à 100%.

4.3.3. Cas d'un plan masse balayé par le vent suivant une direction

Dans ce paragraphe, on traite les combinaisons de paramètres morphologiques à l'échelle du bloc de bâtiments de manière à rechercher s'il existe une organisation avantageuse pour la ventilation naturelle. Dans tout ce qui suit, on travaille à **surface habitable inchangée** d'une configuration à l'autre. Ceci pour considérer une même utilisation du foncier.

4.3.3.1. Variation en hauteur des bâtiments

La solution étudiée consiste à augmenter progressivement la hauteur moyenne des bâtiments dans le sens de pénétration du vent. Trois tranches perpendiculaires au vent dominant sont considérées de longueur 5-10 H_{moy} , les mêmes que celles utilisées pour l'étude de la distance à la lisière.

Les résultats sont présentés pour des quartiers qui ont un taux d'occupation des sols compris entre 20 (Tableau 5) et 40% (Tableau 6)

Le principe est présenté Figure 39 et Figure 40 :

Exemple de variation en hauteur - A gauche : Uniforme, A droite : élévation progressive de 75 % (en conservant la surface habitable totale)



Figure 39: Quartier sans progression de H_{moy}

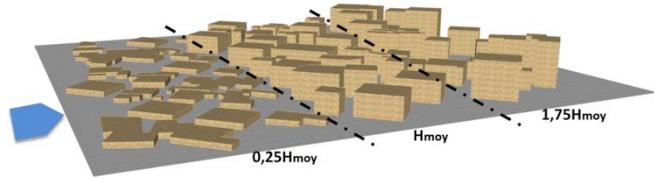


Figure 40: Quartier avec progression de H_{moy}

Potentiel de ventilation traversante ΔC_p en fonction de la progression de H_{moy} pour $\lambda_p = 20\%$												
Progression H_{moy}	0 % - REFERENCE			25 %			33 %			50 %		
Zone	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$H_{moy,zone} = \%H_{moy,quartier}$	100 %			75 %	100 %	125 %	67 %	100 %	133 %	50 %	100 %	150 %
ΔC_p Couche supérieure	1,12	0,95	0,92	Stable			Stable			Stable		
ΔC_p Couche inférieure	0,68	0,38	0,42	Stable	0,6	Stable	Stable	0,6	Stable	Stable	0,78	Stable
Gain/Perte(%) en ΔC_p par rapport au cas de REFERENCE												
Couche supérieure	REFERENCE			Stable								
Couche inférieure					+ 58			+ 58			+ 105	

Tableau 5: Progression de H_{moy} pour $\lambda_p = 20\%$

Potentiel de ventilation traversante ΔC_p en fonction de la progression de H_{moy} pour $\lambda_p = 40\%$												
Progression H_{moy}	0 % - REFERENCE			25 %			50 %			75 %		
Zone	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$H_{moy,zone} = \%$ $H_{moy,quartier}$	100			75	100	125	50	100	150	25	100	175
ΔC_p Couche supérieure	0,66	0,53	0,37	1,34	0,75	0,46	1,15	0,82	1,05	1,08	0,85	1,3
ΔC_p Couche inférieure	0,65	0,28	0,1	0,72	0,37	0,34	0,83	0,36	0,32	0,92	0,41	0,45
Gain/Perte (%) en ΔC_p par rapport au cas de REFERENCE												
Couche supérieure	REFERENCE			+103	+41	+24	+75	+55	+185	+63	+60	+250
Couche inférieure	REFERENCE			+10	+32	+240	+28	+28	+222	+41	+46	+350

Tableau 6: Progression de H_{moy} pour $\lambda_p = 40\%$

Conclusions opérationnelles

Pour des quartiers denses, augmenter progressivement la hauteur moyenne des bâtiments améliore le potentiel de ventilation dans tout le quartier. L'effet est d'autant meilleur que cette progression est forte. Dans les hautes couches, le potentiel devient excellent dès 25 % de progression. Dans les basses couches, la progression permet notamment d'obtenir un bon potentiel dans les zones 2 et 3 inégalement peu ventilées.

Dans les quartiers peu denses, le potentiel de ventilation est moins sensible à la progression de la hauteur moyenne. Insensible dans les hautes couches, le potentiel reste de toute façon excellent. Dans les basses couches, une légère amélioration peut être constatée.

Complément sur le champ de vitesse :

Il est intéressant de remarquer que l'augmentation progressive de H_{moy} dans un quartier influe également sur les niveaux de C_v dans le bon sens (Figure 41). Elle permet à partir de 10-15 H_{moy} de remonter les C_v de telle sorte à avoir une bonne irrigation dans le quartier.



Figure 41: Evolution de C_v en fonction de la distance à la lisière - Progression H_{moy} 75 %

4.3.3.2. Variation en occupation des sols

Il s'agit d'augmenter progressivement dans un quartier, le taux d'occupation des sols en même temps que la hauteur des bâtiments dans le sens de pénétration des vents dominants. Le principe est proposé dans les Figure 42 et Figure 43.

Les résultats sont présentés pour des quartiers qui ont un taux d'occupation moyen des sols compris entre 20 (Figure 44) et 30 % (Figure 45).

Exemple de variation de λ_p - A gauche : Uniforme, A droite : augmentation de 66 %

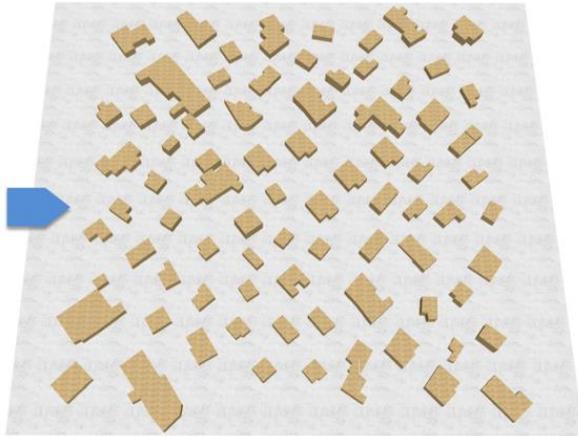


Figure 42: Quartier sans progression de λ_p

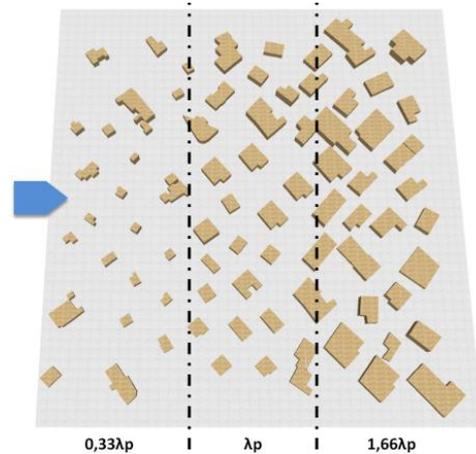


Figure 43: Quartier avec progression de λ_p

Potentiel de ventilation traversante ΔC_p en fonction de la progression de λ_p - $\lambda_p = 20\%$															
Progression H_{moy}	0 %			17 %			33 %			50 %			66 %		
Zone	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\lambda_{p,moy,zone} / \lambda_{p,moy,quartier}$ en %	100			83	100	117	66	100	133	50	100	150	44	100	166
ΔC_p Couche supérieure	1,12	0,95	0,92	Stable											
ΔC_p Couche inférieure	0,95	0,38	0,42	Stable	Stable	Stable	Stable	0,45	Stable	0,5	0,5	Stable	0,5	0,55	Stable
Gain/Perte(%) en ΔC_p par rapport au cas de REFERENCE															
Couche supérieure	REFERENCE			Stable											
Couche inférieure	REFERENCE			Stable	Stable	Stable	Stable	+18	Stable	+17	+31	Stable	+17	+45	Stable

Figure 44: Progression de λ_p - λ_p de base 20 %

Potentiel de ventilation traversante ΔC_p en fonction de la variation de λ_p - $\lambda_p = 30\%$																		
Progression H_{moy}	0 %			17 %			33 %			50 %			66 %			83 %		
Zone	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
$\lambda_{p,moy,zone} / \lambda_{p,moy,quartier}$ en %	100			83	100	117	66	100	133	50	100	150	44	100	166	17	100	183
Couche supérieure	0,99	0,98	0,73	1,18	Stable	Stable	1,25	Stable	Stable	1,38	Stable	Stable	1,3	Stable	Stable	1,38	Stable	Stable
Couche inférieure	0,47	0,48	0,33	0,61	Stable													
Gain/Perte(%) de potentiel par zone par rapport au cas de REFERENCE																		
Couche supérieure	REFERENCE			+19	Stable	Stable	+26	Stable	Stable	+39	Stable	Stable	+31	Stable	Stable	+39	Stable	Stable
Couche inférieure	REFERENCE			+29	Stable	Stable	+82	Stable	Stable	+97	Stable	Stable	+121	Stable	Stable	+91	Stable	Stable

Figure 45: Progression de λ_p - λ_p de base 30 %

Conclusions opérationnelles

Construire avec une hauteur moyenne croissante dans la direction du vent permet d'améliorer le potentiel de ventilation dans les zones amont à 5 à 10 H_{moy} avec un gain important dans les basses couches. Une augmentation de la hauteur tous les 5 H_{moy} de 17 % permet d'obtenir des gains significatifs en ΔC_p (+29 % dans les couches inférieures) et qui peuvent doubler pour des augmentations de la hauteur moyenne supérieures à 50 % tous les 5 H_{moy} . Dédensifier un quartier en amont permet de garder un potentiel de ventilation stable dans le quartier aval densifié pour compenser la dédensification amont.

Complément sur le champ de vitesse :

La Figure 46 montre le bénéfice pour l'irrigation dans les 2 premières tranches avec une légère détérioration dans la dernière tranche, la dernière tranche ayant tout de même, avec une progression de 66 %, un $\lambda_p = 50\%$.

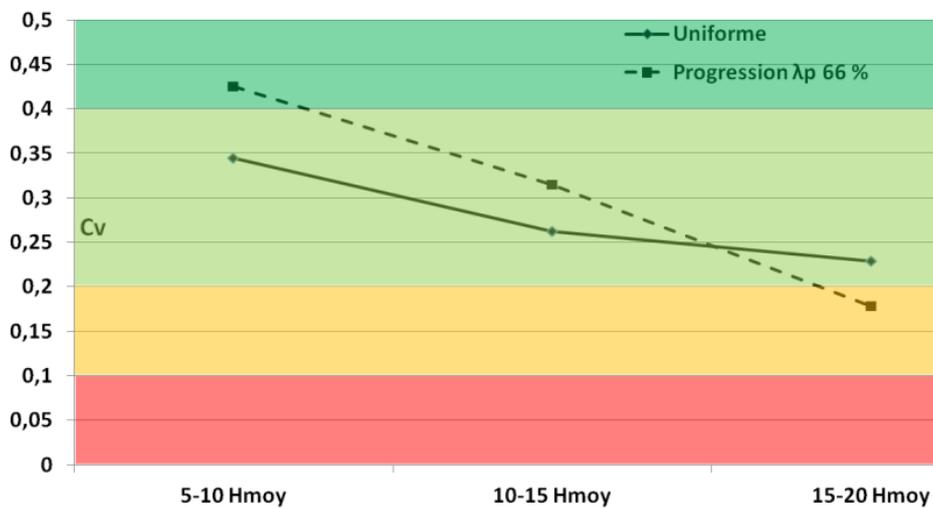


Figure 46: Evolution de C_v en fonction de la distance à la lisière - Progression λ_p 66 %

4.3.3.3. Quartier amont sur pilotis

Précédemment a été présenté le bénéfice d'un bâtiment sur pilotis, ici nous voyons l'intérêt d'un quartier entier mis sur pilotis (Figure 47).

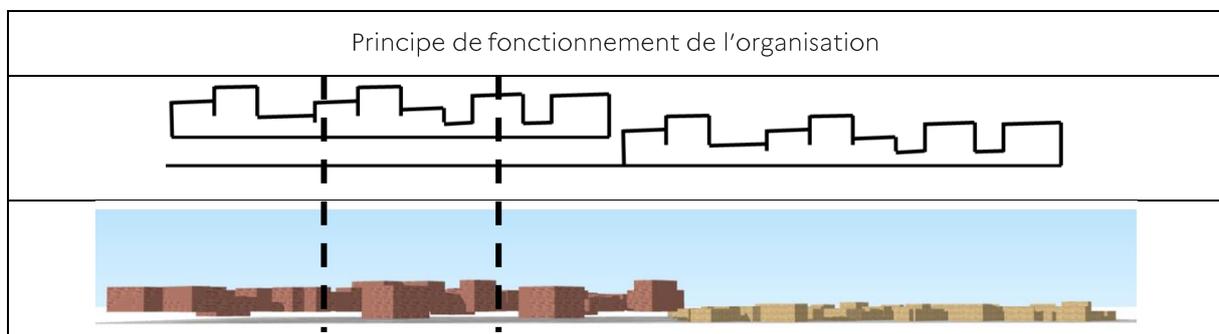


Figure 47: Quartier sur pilotis

Les résultats sont présentés Figure 48 et Figure 49 dans le cas le plus défavorable, c'est-à-dire dans les basses couches.

Quartier $\lambda_{p,moyen} = 30\%$

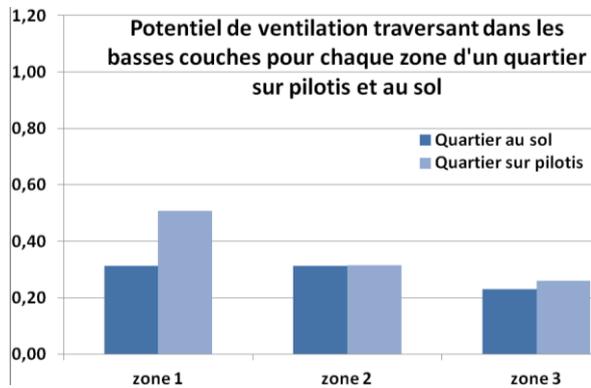


Figure 48: Comparaison du potentiel avec et sans pilotis dans un quartier uniforme

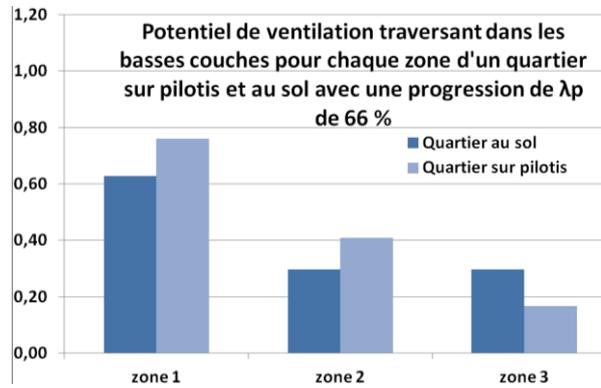


Figure 49: Comparaison du potentiel avec et sans pilotis dans un quartier avec progression de λ_p

Complément sur le champ de vitesse :

Le bénéfice de la mise sur pilotis pour la fluidité des espaces extérieurs est clair (Tableau 7).

λ_p	30 %	40 %
Augmentation de C_v grâce aux pilotis	+85 %	+30 %

Tableau 7: Variation du C_v avec la mise sur pilotis

Conclusions opérationnelles

Construire un quartier sur pilotis en périphérie d'une ville permet d'augmenter le potentiel de ventilation dans les basses couches dans la première tranche 5-10 H_{moy} . Au-delà, l'effet des pilotis ne se fait plus ressentir quel que soit le taux d'occupation des sols λ_p .

4.3.3.4. Promotion du droit au vent

Les résultats (Figure 50, Figure 51) présentent les conséquences pour un quartier qui se trouve en aval d'un autre quartier selon que ce dernier est sur pilotis ou non.

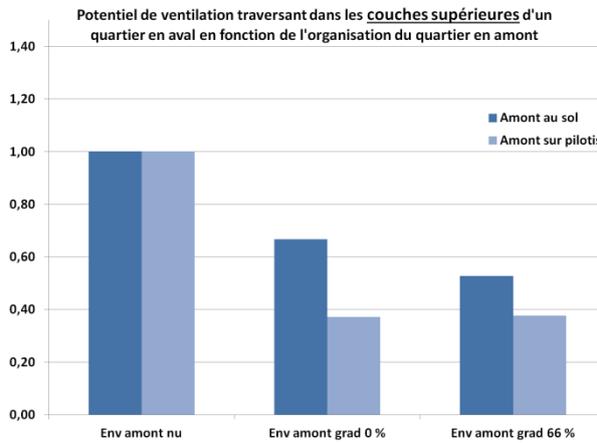


Figure 50: Potentiel de ventilation en fonction de la mise sur pilotis ou non du quartier amont - Couches supérieures

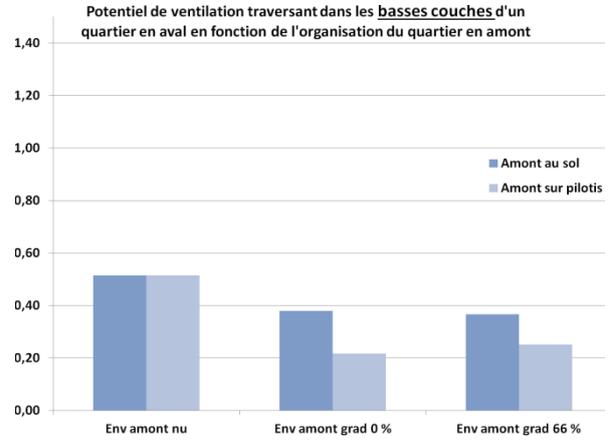


Figure 51: Potentiel de ventilation en fonction de la mise sur pilotis ou non du quartier amont - Couches inférieures

Complément sur le champ de vitesse :

La sur élévation de l'environnement amont n'apporte rien dans l'irrigation des basses couches du quartier en aval. Le niveau de Cv reste à des niveaux juste viables, passant de Cv = 0,22 à Cv = 0,16.

Conclusions opérationnelles

Le quartier amont sur pilotis a un impact plus défavorable que le même quartier implanté au sol. Dans les hautes couches, le potentiel reste viable mais dans les basses couches on arrive à la limite de valeurs significatives. Cependant, l'introduction d'un quartier en amont est particulièrement néfaste pour la ventilation naturelle. Finalement, la question de la mise sur pilotis ou non est du second ordre.

Enfin, la progression en λ_p du quartier amont n'a quasiment aucun impact.

4.3.3.5. Quartier aval sur pilotis

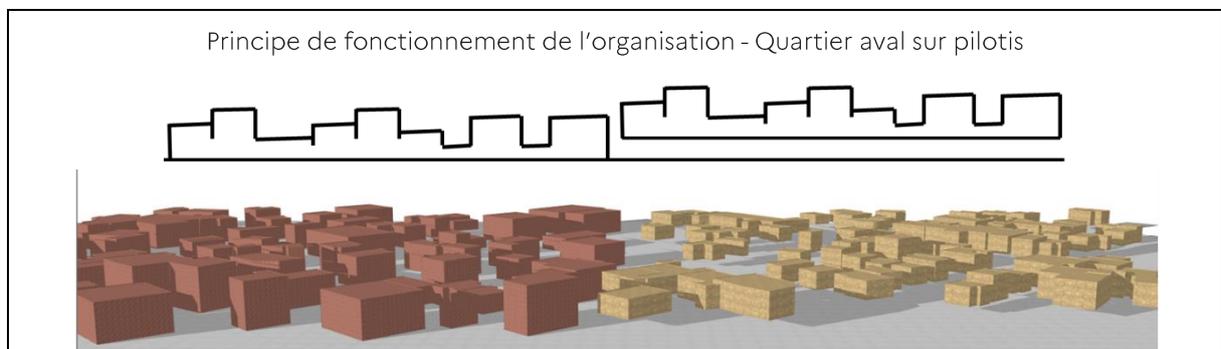
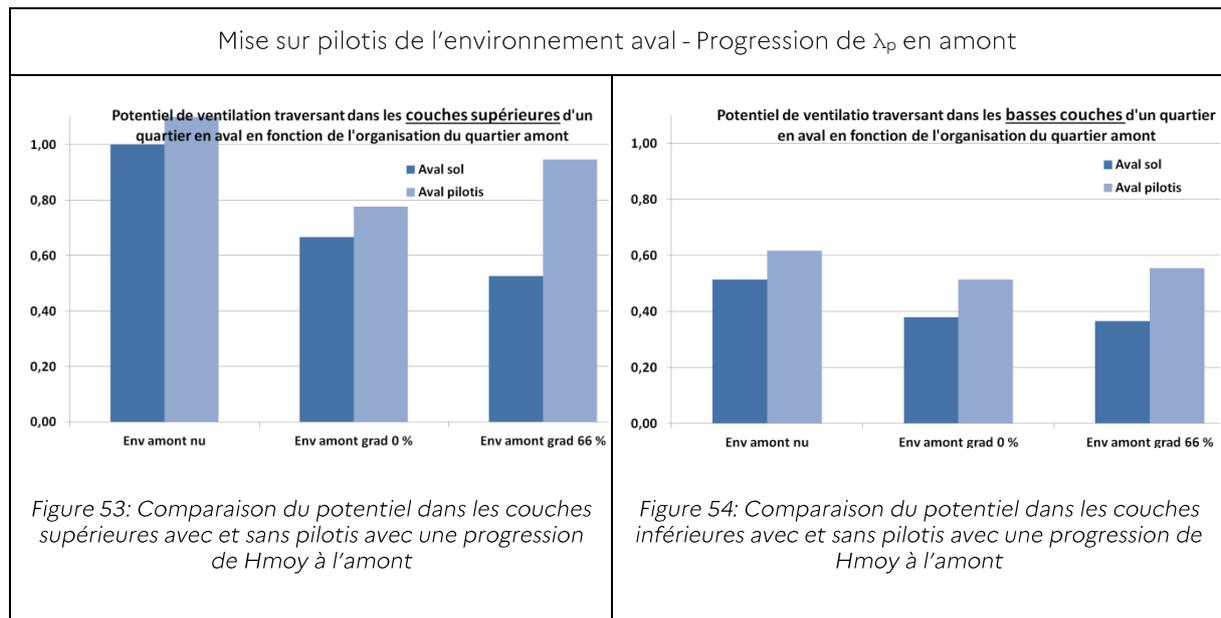


Figure 52: Quartier aval sur pilotis

Les Figure 53 et Figure 54 présentent respectivement le potentiel dans les couches supérieures et inférieures dans le cas d'un environnement amont avec une progression de λ_p :



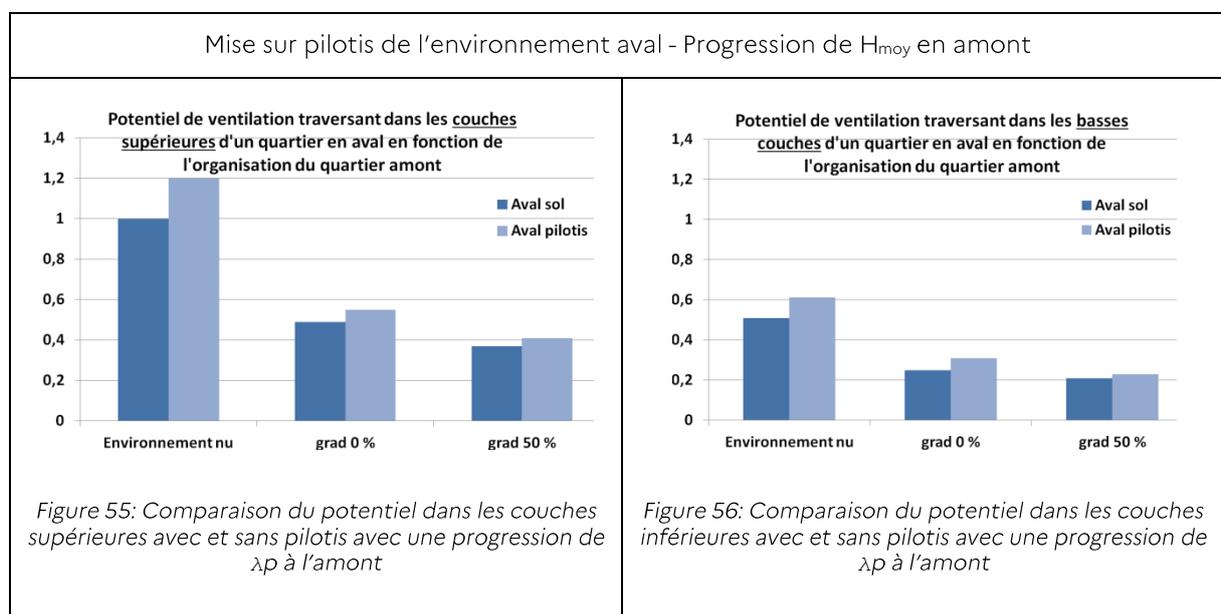
Conclusions opérationnelles

La mise sur pilotis d'un environnement en aval permet, dans les couches supérieures comme dans les couches inférieures de conserver un potentiel de ventilation similaire au cas où l'environnement amont serait nu. Cette remarque est applicable que l'environnement amont soit uniforme ou avec une progression de λ_p .

Complément sur le champ de vitesse :

En plus du gain en ΔC_p , l'irrigation des sols est améliorée en surélevant le quartier aval sur pilotis. Le C_v passe alors de 0,22 à 0,39, c'est-à-dire d'une irrigation viable à excellente. L'augmentation moyenne du C_v est d'environ 50%. Il devient même excellent ($C_v > 0,4$) localement dans environ 45% du quartier contre seulement 15% lorsque le quartier aval n'est pas sur pilotis.

Les Figure 55 et Figure 56 présentent les résultats dans le cas d'un environnement amont avec une progression de H_{moy} :



Conclusions opérationnelles

La mise sur pilotis d'un environnement en aval permet d'améliorer légèrement le potentiel de ventilation. La hauteur moyenne dans la zone 3, c'est-à-dire la dernière tranche du quartier amont en contact direct avec l'environnement aval étant trop importante avec une progression de 50 %, l'effet pilotis n'est pas suffisant et ne permet pas de sortir suffisamment le quartier de la rugosité amont.

4.3.3.6. Compacité d'un quartier en amont

On considère la construction d'un immeuble ou ensemble d'immeubles venant remplacer un quartier existant constitué de bâtiments de faible hauteur en R+1 - R+2 (Figure 57, Figure 58).

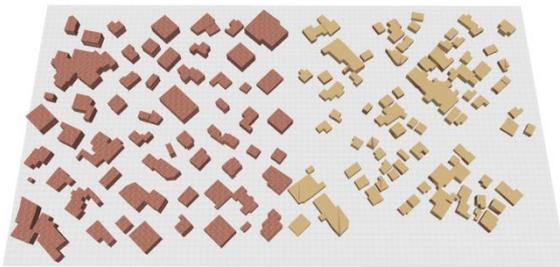


Figure 57: Urbanisation amont étalée

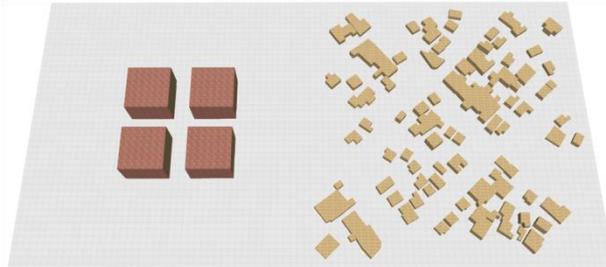


Figure 58: Urbanisation amont en ilot dense

Potentiel de ventilation traversante ΔC_p en fonction de l'environnement amont- $\lambda_p = 20\%$		
Option	Amont étalé - $\lambda_p = 30\%$	Amont - Ilot dense
ΔC_p Couche supérieure	0,66	0,81
ΔC_p Couche inférieure	0,38	0,46

Tableau 8 : Impact d'un urbanisme en ilot dense amont

Il y a une augmentation de 10 à 20 % de ΔC_p dans le cas d'un environnement amont plus dense que l'aval (Tableau 8). Il est donc tout à fait possible de s'attendre à une augmentation plus importante dans le cas d'un environnement amont moins dense.

Complément sur le champ de vitesse :

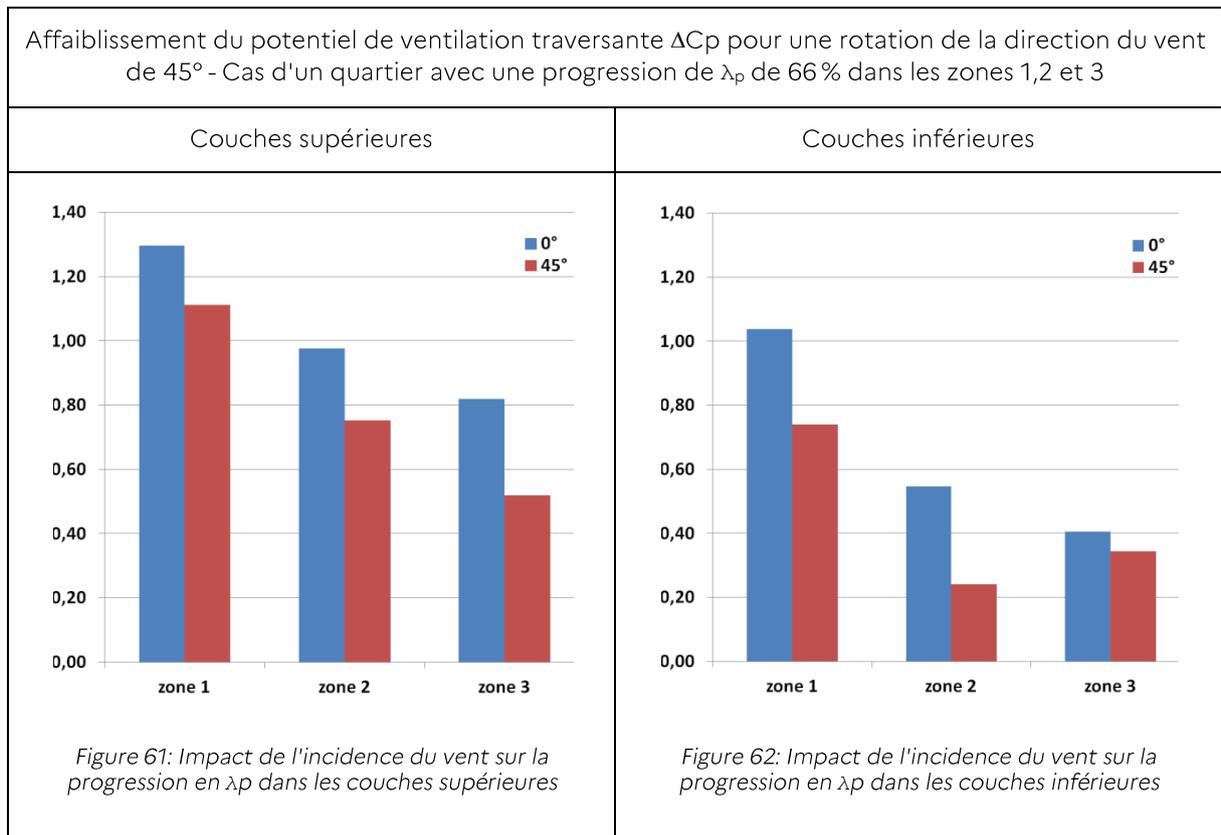
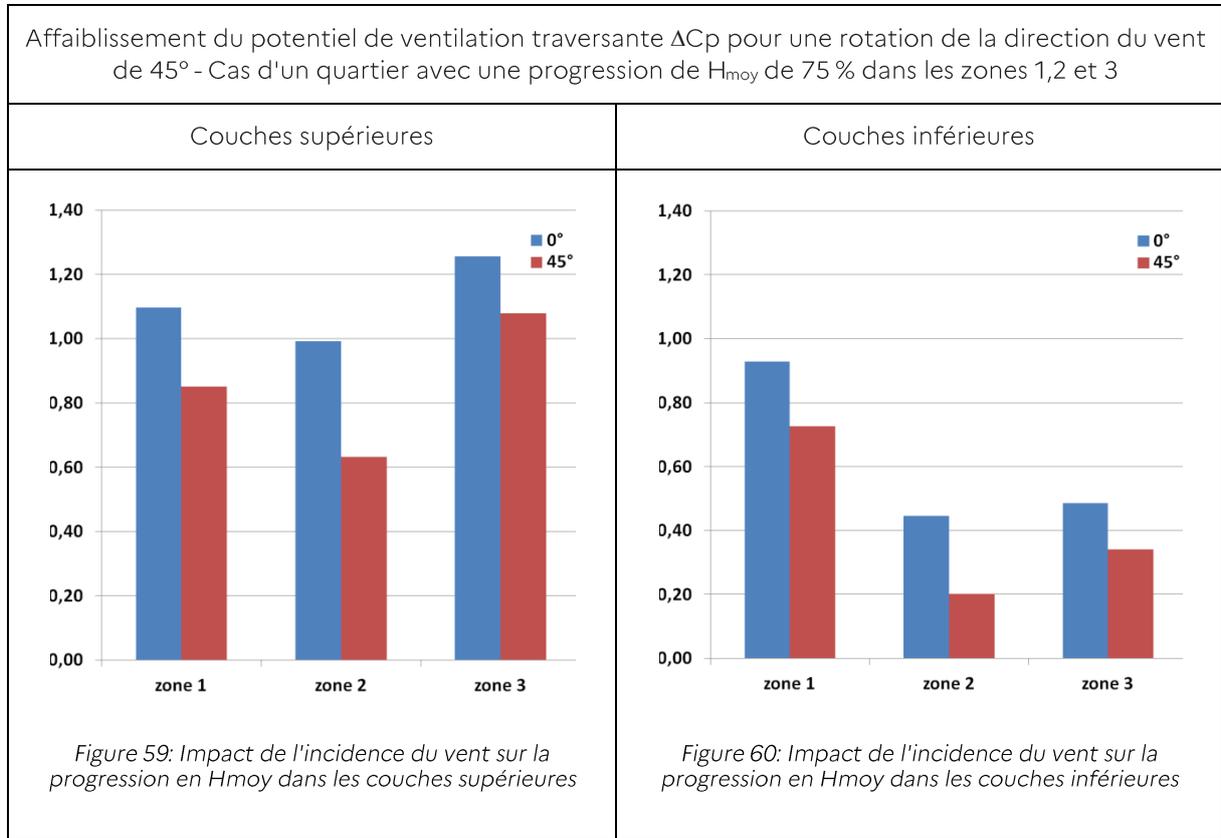
De la même manière que pour le champ de pression, le C_v diminue dans le sillage direct de l'îlot dense. En moyenne, l'irrigation est un peu meilleure lorsque l'environnement amont est compacté, le C_v moyen passe de 0,22 à 0,26.

Conclusions opérationnelles

Construire un ensemble d'immeubles compact permet d'augmenter le potentiel de ventilation à l'aval ainsi que la fluidité des espaces intermédiaires. Attention cependant aux bâtiments dans le sillage direct.

4.3.3.7. Analyse à +/-45° des organisations

Considérer une direction de vent dominant constante est évidemment peu réaliste. Pour tempérer les conclusions qui précèdent, on va examiner comment une variation de 45° de la direction du vent modifie les résultats (Figure 59, Figure 60, Figure 61, Figure 62). Evidemment, pour des rotations de la direction du vent plus faibles, les effets sur les potentiels de ventilation seraient moindres :



Conclusions opérationnelles

Selon la tranche du quartier considérée, l'affaiblissement moyen maximal va de 15 à 35 %. Malgré cette sensibilité à la variation de la direction du vent, les organisations restent intéressantes et peuvent être considérées prometteuses.

4.3.3.8. Recherche de la combinaison la plus favorable

La Figure 63 représente un exemple de cumul des effets présentés précédemment :

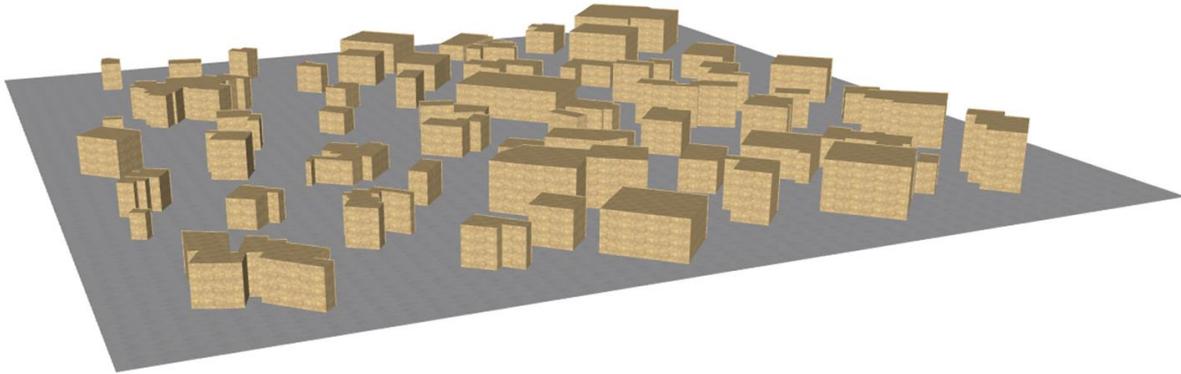


Figure 63: Un exemple de cumulations des effets

Conclusions opérationnelles

Construire à $\lambda_{p\text{moy}} = 20\%$, introduire une progression de λ_p de 33% et introduire une progression de H_{moy} de 50% est le meilleur rapport « Amélioration du potentiel pour le neuf/ Détérioration du potentiel dans la zone aval existante »

S'il n'y a pas de quartier en aval, la dernière tranche du nouveau quartier qui est la plus dense et la plus élevée peut être montée sur pilotis.

4.3.4. Quelles architectures pour favoriser le potentiel de ventilation naturelle ?

Des organisations de « groupements » à grandes échelles marquées constituant des « ensembles globaux structurés » au sein même du plan masse ou des rugosités bâties peuvent constituer des fronts ou géométries de formes particulières qui « captent » les flux au vent sans pénalités sous le vent et créent alors des potentialités de pressions motrices importante : C'est le cas typique adopter des groupements géométriques globaux en « U ou pattes de crabe », ou encore en créneaux. Ces organisations se positionnent plutôt perpendiculairement à l'axe des vents dominants, et sont en outre moins sensibles que des constructions isolées aux fluctuations directionnelles des vents incidents.

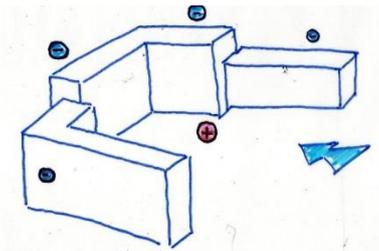


Figure 64: Architecture eu U ouvert

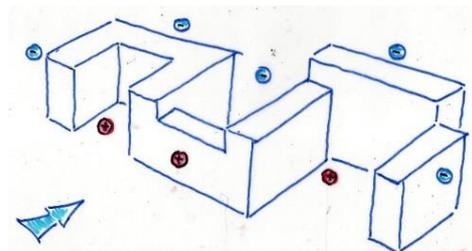


Figure 65: Architecture en créneau

Note: Le schéma en patte de crabe est meilleur lorsque le «U» est ouvert au vent, mais est très compatible avec un flux inversé à 180°. Le schéma en créneaux est totalement réversible, et orienté plutôt perpendiculairement aux vents dominants, il fonctionne de manière identique avec des directions de vents inversées à 180°.

Il existe des architectures aérodynamiques et aérauliques particulières dédiées à la ventilation des unités de vie : ces architectures, en général émergentes de la rugosité environnante, utilise la dynamique forte des flux de contournements de faîtage ou « par le dessus » pour organiser une forte irrigation d'extraction autour d'un puits, d'un patio émergent ou d'un canyon d'extraction, dépressionnaires.

Note: Le concept fonctionne avec émergences de lèvres en toiture pour fixer la dépression locale de décollement, gouvernées par le passage vent du vent.

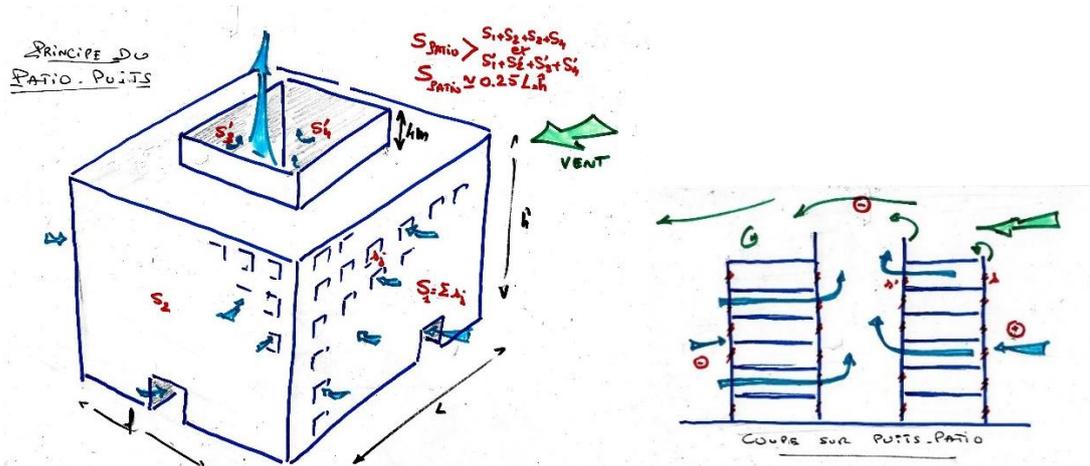


Figure 66: Organisation architecturale en patio dépressionnaire

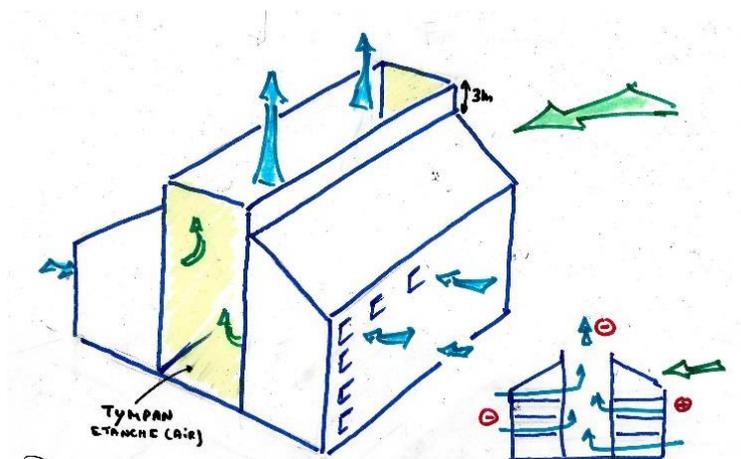


Figure 67: Principe de la rue canyon dépressionnaire

Note: Les avantages considérables de ces organisations architecturales sont un niveau de dépression important (le vent étant une fonction croissante de la hauteur) et toujours supérieure à celles des sillages et la relative indépendance du système aérodynamique vis-à-vis de l'orientation du vent d'autre part.

5. Résumé des conclusions opérationnelles pour le développement d'un urbanisme climatique

Pour des informations plus détaillées, se référer au présent document à l'aide des renvois.

Quels sont les paramètres clés qui permettent d'évaluer l'efficacité d'un projet immobilier optant pour une ventilation naturelle ?

Deux qualifications sont nécessaires : l'une majeure, ce sont les champs de pression sur les façades et l'autre complémentaire que sont les champs de vitesse au niveau du sol. Ces données peuvent être connues par essais en soufflerie ou méthode numérique préalablement fiabilisée.

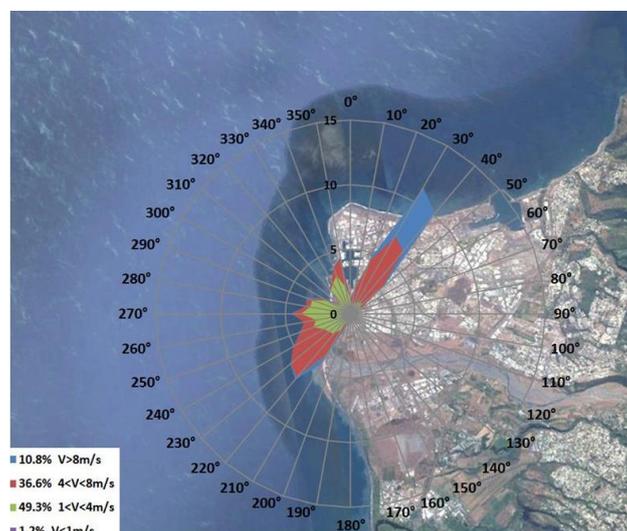
Voir chapitre : *Présentation des grandeurs aérodynamiques caractéristiques de l'urbanisme climatique : champs de pression et de vitesse*

Peut-on se passer d'une évaluation locale des conditions de vent avant de démarrer un projet de nouveau quartier ?

Avant d'entreprendre un travail aérodynamique sur l'organisation du plan masse, il faut s'assurer qu'il existe une irrigation minimum du site : En approche empirique, on vérifiera que le seuil de vitesse moyenne de 2,5 m/s est atteint et dépassé, en été, de jour pendant plus de 50 % du temps (à 10 m de hauteur, en zone dégagée de constructions). De même il sera nécessaire de connaître les directions dominantes des vents sur le site.

Sans ces données de signal vent d'irrigation du site, il est illusoire de prétendre faire une contribution adaptée et efficiente sur la mise en œuvre d'un programme d'urbanisation climatique. La détermination des données météorologiques locales peut se faire par méthodes expérimentales avec pylônes. Le résultat est facilement interprétable sous la forme d'une rose des vents comme ci-dessous, au Port le jour à l'Île de la Réunion.

Voir chapitre : *Le vent*



Comment la topographie du site (flanc d'une colline orientée vers les vents dominants ou sous ces vents) influence-t-elle l'efficacité de la ventilation naturelle ?

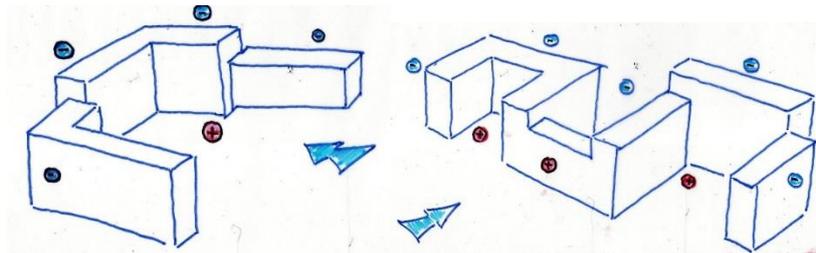
Une pente orientée jusqu'à 15 % ne modifie pas les tendances concernant l'effet d'une organisation bâtie, sauf quand le vent "descend" la pente. Dans ce cas, les effets favorables sont alors largement réduits par rapport à ceux obtenus en sol plat.

Voir chapitre : *La méthode CFDErreur ! Source du renvoi introuvable.*

Comment orienter les bâtiments ?

Connaissant les directions principales des vents dominants il faut disposer les grandes dimensions du bâtiment perpendiculaires au vent. Des organisations de groupements à grandes échelles marquées constituant des ensembles globaux structurés peuvent constituer des fronts ou géométries de formes particulières qui captent les flux au vent sans pénalités sous le vent et créent alors des potentialités de pressions motrices importante : C'est le cas typique des groupements géométriques globaux en « U ou pattes de crabe », ou encore en créneaux. Ces organisations se positionnent plutôt perpendiculairement à l'axe des vents dominants, et sont en outre moins sensibles que des constructions isolées aux fluctuations directionnelles des vents incidents. Le schéma en patte de crabe est meilleur lorsque le « U » est ouvert au vent, mais est très compatible avec un flux inversé à 180°. Le schéma en créneaux est totalement réversible, et orienté plutôt perpendiculairement aux vents dominants, il fonctionne de manière identique avec des directions de vents inversées à 180°.

Voir chapitre : Quelles architectures pour favoriser le potentiel de ventilation naturelle ?



Quels sont les principaux paramètres qui caractérisent l'urbanisation ?

- Le taux d'occupation surfacique des sols qui représente la proportion de surface construite et qui rend compte de la « fluidité » d'irrigation d'un quartier. Sa plage réaliste de variation est de 0 à 50 %.
- La hauteur moyenne des bâtiments et la variabilité de ces hauteurs qui renseigne sur les effets de brassage tridimensionnels et l'existence de retombées de flux depuis les couches supérieures vers les couches inférieures.
- La rugosité des quartiers situés en amont qui ralentit le vent ou le masque.

Voir chapitre : Présentation des paramètres

Quel est l'effet de passer de 20 % d'occupation des sols à 40 % ?

Cela diminue le potentiel de ventilation traversante dans les basses couches d'environ moitié tandis que le potentiel dans les couches supérieures reste bon.

Le tirage dépressionnaire à partir de la façade au vent permet de garantir un potentiel intéressant quel que soit le taux d'occupation des sols.

Voir chapitre : Cas d'un plan masse non orienté au vent

Peut-on espérer réussir un projet de ventilation naturelle au cœur de la zone urbanisée, loin de la périphérie ?

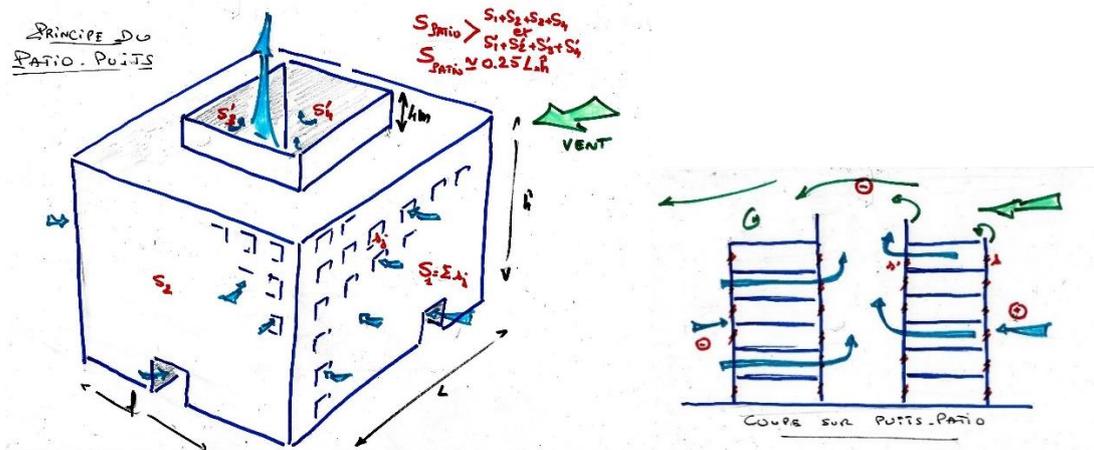
Il existe une « lisière » à l'entrée de la ville qui est une zone de transition où le profil de vent s'adapte au terrain urbanisé. Evidemment, le potentiel de ventilation naturelle diminue en pénétrant dans le quartier et particulièrement au-delà de 20 fois la hauteur moyenne des bâtiments. Si l'occupation des sols dépasse 40%, le potentiel est extrêmement faible au-delà de cette lisière.

Voir chapitre :

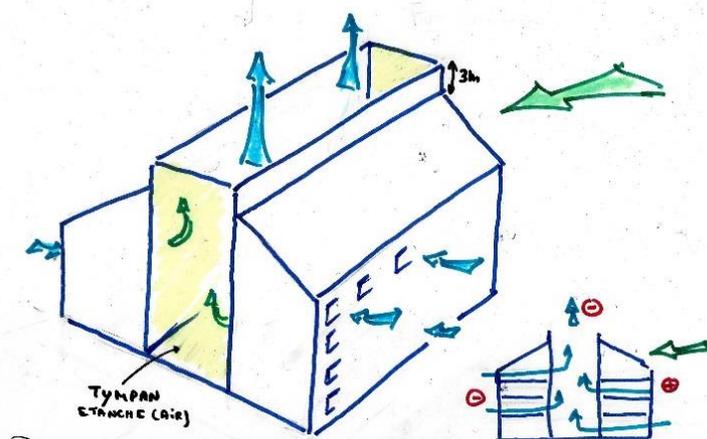
Environnement favorable au développement d'une urbanisation à potentiel de ventilation naturelle

Que faire alors ?

On peut utiliser la dynamique forte des flux de contournements de faîtage ou « par le dessus » pour organiser une forte irrigation d'extraction autour d'un puits, d'un patio émergent ou d'un canyon d'extraction dépressionnaire.



Organisation architecturale en Patio dépressionnaire



Principe de la Rue Canyon dépressionnaire

Note : Les avantages considérables de ces organisations architecturales sont un niveau de dépression important (le vent étant une fonction croissante de la hauteur) et toujours supérieure à celles des sillages et la relative indépendance du système aérodynamique vis-à-vis de l'orientation du vent d'autre part.

Voir chapitre : Quelles architectures pour favoriser le potentiel de ventilation naturelle ?

Est-ce avantageux que les bâtiments nouveaux émergent d'un quartier existant ?

La présence d'émergences se traduit par un léger gain dans les couches supérieures mais est sans effet dans les couches inférieures. Placer un bâtiment sur pilotis de 3 à 4 m permet d'une part d'améliorer l'irrigation des espaces extérieurs et d'autre part de créer une émergence au-delà de la rugosité bâtie et donc de profiter d'une dynamique de vent plus importante et moins perturbée.

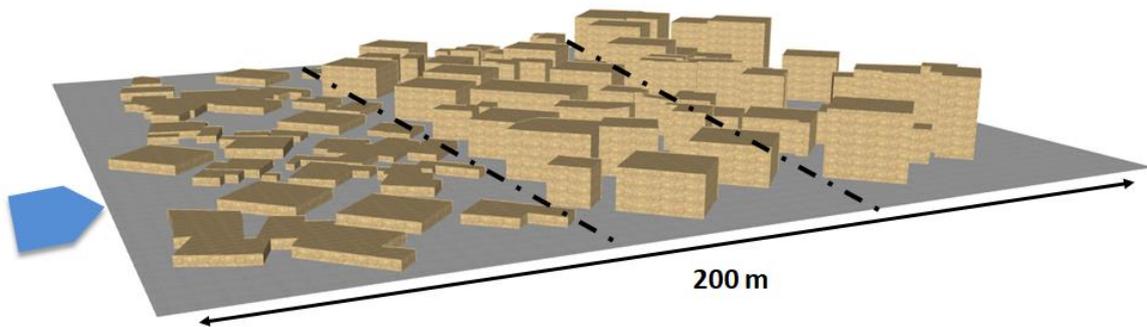
Voir chapitre : Intérêt des pilotis

Mais dans ce cas qu'en est-il du droit au vent des bâtiments existants ?

L'introduction d'un quartier en amont est clairement néfaste pour la ventilation naturelle des bâtiments pré existants et sa mise sur pilotis a même un impact défavorable bien que cette variante soit du second ordre.

Voir chapitre : Promotion du droit au vent

Pour un projet d'aménagement sur une grande surface, quel est l'avantage d'organiser le quartier en augmentant la hauteur dans le sens du vent dominant ?

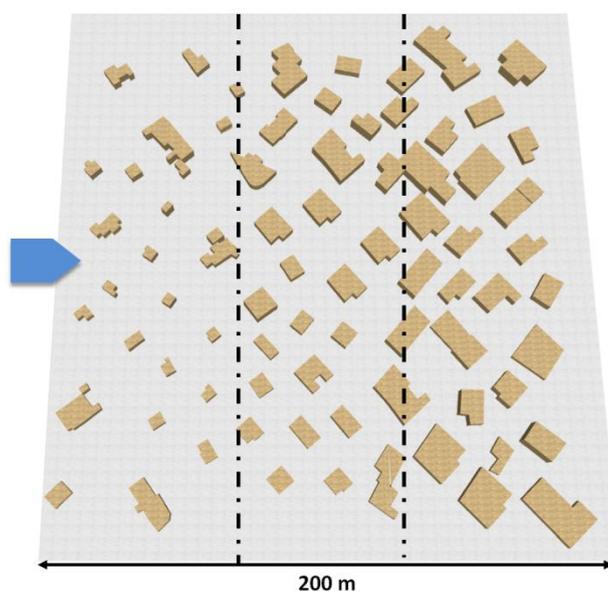


Pour des quartiers denses, augmenter progressivement la hauteur moyenne des bâtiments améliore le potentiel de ventilation dans tout le quartier. Pour un quartier de 200 m x 200 m, il faut considérer 3 tranches d'environ 70 m dans le sens du vent. La hauteur moyenne des bâtiments étant uniforme dans chaque tranche. L'effet est d'autant meilleur que cette progression est forte. Dans les hautes couches, le potentiel devient excellent. Dans les basses couches, la progression permet notamment d'obtenir un bon potentiel.

Dans les quartiers peu denses, le potentiel de ventilation est moins sensible à la progression de la hauteur moyenne. Il est insensible dans les hautes couches où le potentiel est dans tous les cas excellent. Dans les basses couches, une légère amélioration peut être constatée. La progression de hauteur moyenne permet également d'augmenter le champ de vitesse à 1,5 m de hauteur dans les espaces extérieurs.

Voir chapitre : Variation en hauteur des bâtiments

Pour ce même projet d'aménagement sur une grande surface, quel est l'avantage d'organiser le quartier en densifiant progressivement dans le sens du vent dominant ?



Densifier progressivement dans le sens du vent permet d'améliorer le potentiel de ventilation particulièrement dans les basses couches à l'entrée d'un quartier. Cette dédensification amont permet de garder un potentiel de ventilation stable en aval malgré la densification en pénétrant dans la ville. D'un

point de vue du champ de vitesse, il est amélioré en moyenne dans les 2 premières tranches du quartier et à peu près stable dans la dernière tranche.

Voir chapitre : Variation en occupation des sols

Toujours pour ce même projet d'aménagement sur une grande surface, serait-il intéressant d'avoir des bâtiments en entrée de ville sur pilotis ?

Construire un quartier sur pilotis en périphérie d'une ville permet d'augmenter le potentiel de ventilation dans les basses couches dans la zone lisière longue entre 5 et fois la hauteur moyenne. Au-delà, l'effet des pilotis ne se fait plus ressentir quel que soit le taux d'occupation des sols.

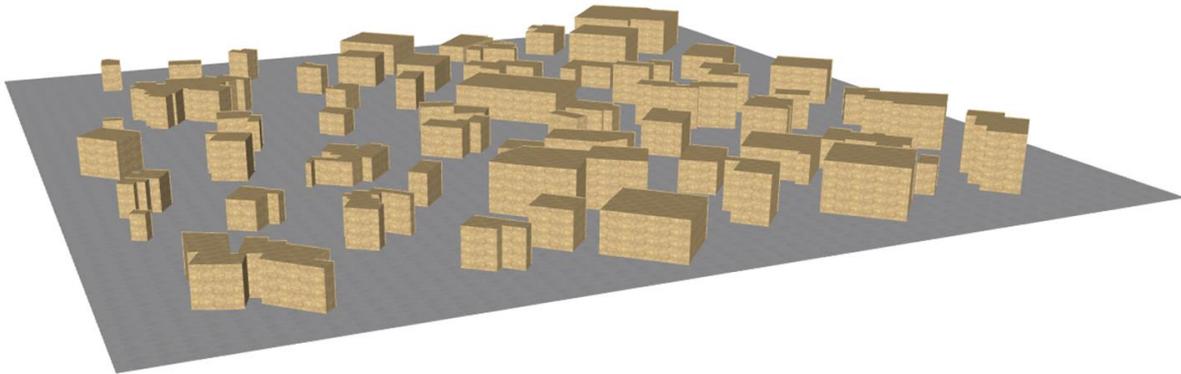
Voir chapitre : Quartier amont sur pilotis

Et disposer les bâtiments éloignés de la lisière sur pilotis ?

La mise sur pilotis de cette zone en aval permet d'améliorer légèrement le potentiel de ventilation. Il faut que l'effet pilotis soit suffisant pour sortir le quartier aval de la rugosité amont.

Voir chapitre : Quartier aval sur pilotis

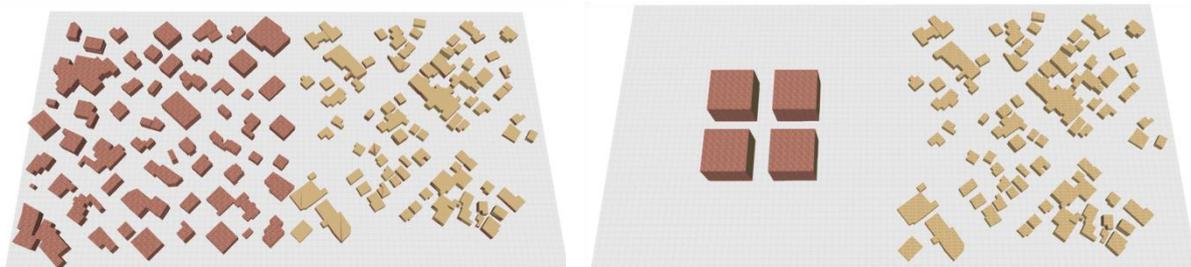
Si l'on cumulait toutes les pistes positives qui précèdent ?



Une cumulation des progressions de la densification des sols et de la hauteur moyenne des bâtiments dans une certaine proportion détaillée dans le guide permet de donner le meilleur compromis entre la favorisation du potentiel du quartier et d'étude et la limitation de la détérioration d'un éventuel quartier en aval. S'il n'y pas de quartier aval alors les bâtiments de la dernière tranche du quartier peuvent être montés sur pilotis pour maximiser le potentiel de ventilation naturelle.

Voir chapitre : Recherche de la combinaison la plus favorable

Dans le cas d'une construction d'un ensemble d'immeubles venant remplacer un quartier existant initialement de faible hauteur vaut-il mieux bâtir compact pour préserver le quartier aval ?



A priori, un ensemble d'immeubles compact permet d'augmenter le potentiel de ventilation à l'aval ainsi que la fluidité des espaces intermédiaires. Attention cependant aux bâtiments dans le sillage direct et souvenons-nous que la nature a horreur du vide, les espaces dégagés le resteront-ils ?

Voir chapitre : Compacité d'un quartier en amont

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- DELPLANQUE Valentin, 2019. Règles de conception urbaine favorisant la ventilation naturelle en milieu insulaire tropical. Thèse en énergétique et procédés. CES, Mines ParisTech, Université PSL, 182 pages.

INDEX DES TABLEAUX ET FIGURES

TABLEAUX

Tableau 1: Potentiel de ventilation en fonction de λ_p	25
Tableau 2: C_v en fonction de λ_p	25
Tableau 3: Potentiel de ventilation en fonction de la distance à la lisière.....	27
Tableau 4: Potentiel de ventilation de la mise sur pilotis d'un bâtiment isolé.....	28
Tableau 5: Progression de H_{moy} pour $\lambda_p = 20\%$	29
Tableau 6: Progression de H_{moy} pour $\lambda_p = 40\%$	30
Tableau 7: Variation du C_v avec la mise sur pilotis.....	33
Tableau 8: Impact d'un urbanisme en ilot dense amont.....	36

FIGURES

Figure 1: Exemple d'un bâtiment en soufflerie.....	7
Figure 2: Exemple d'un bâtiment en simulation.....	7
Figure 3: Quartier de Saint Pierre - Ile de la Réunion en soufflerie.....	7
Figure 4: Vitesse du vent en fonction du temps.....	11
Figure 5: Croissance verticale du vent moyen.....	11
Figure 6: Répartition classique d'un champ de pression.....	11
Figure 7: Coefficient de pression.....	11
Figure 8: Visualisation par enduit du champ de vitesse au sol.....	12
Figure 9: Interactions entre le vent et l'environnement.....	12
Figure 10: Courant d'équilibrage créant la ventilation naturelle traversante.....	12
Figure 11: Pas de débit d'irrigation possible.....	13
Figure 12: Cohérence des passages d'air entre façades et cloisons.....	13
Figure 13: Evaluation du vent avec un pylône.....	13
Figure 14: Une représentation d'un espace extérieur.....	14
Figure 15: Coefficient de vitesse local (point j) et Coefficient différence de pression « motrice » locale à la hauteur z.....	15
Figure 16: Principe d'un contournement global.....	15
Figure 17: Schéma d'une transition de rugosité.....	16
Figure 18: Plan masse avec fixation des masses bâties.....	16
Figure 19: Plan masse monolithique orienté.....	16
Figure 20: Effet de masque statistique.....	16
Figure 21: Jeu d'interactions entre bâtiments proches.....	17
Figure 22: Schéma pilotis.....	17
Figure 23: Simplification numérique.....	18
Figure 24: Simplification physique.....	18
Figure 25: Présentation d'un bâtiment témoin et des 2 couches.....	19
Figure 26: Echelle ΔC_p	20
Figure 27: Echelle C_v	20
Figure 28: Rose des potentiels pour un bâtiment situé dans la ville du Port à la Réunion - ΔC_p en fonction de l'orientation du vent (Les zones en bleu foncé correspondent aux vents dominants, la zone en blanc au seuil de significativité des ΔC_p , les points en orange à la ventilation traversante et les points en violet au tirage dépressionnaire).....	21
Figure 29: Variation de l'implantation d'un bâtiment témoin.....	21
Figure 30: ΔC_p dépressionnaire - Numérique VS Soufflerie.....	22
Figure 31: Quartier type 200 m x 200 m.....	22
Figure 32: Présentation de λ_p ($\lambda_p = 10\%$ à gauche, et 40% à droite).....	23
Figure 33: Tridimensionnalité des couches supérieures ($\sigma/H_{moy} = 0\%$ à gauche, et 20% à droite).....	23
Figure 34: Rugosité aérodynamique (faible R_a à gauche, fort R_a à droite).....	24
Figure 35: Indépendance des paramètres.....	24
Figure 36: Transition de rugosité $R_{a1} = R_{a2}$	26
Figure 37: Transition de rugosité $R_{a1} > R_{a2}$	26
Figure 38: Présentation des 3 subdivisions de profondeur 5-10 H_{moy}	27
Figure 39: Quartier sans progression de H_{moy}	29
Figure 40: Quartier avec progression de H_{moy}	29
Figure 41: Evolution de C_v en fonction de la distance à la lisière - Progression $H_{moy} 75\%$	30
Figure 42: Quartier sans progression de λ_p	31
Figure 43: Quartier avec progression de λ_p	31

Figure 44: Progression de $\lambda_p - \lambda_p$ de base 20 %.....	31
Figure 45: Progression de $\lambda_p - \lambda_p$ de base 30 %.....	31
Figure 46: Evolution de Cv en fonction de la distance à la lisière - Progression λ_p 66 %.....	32
Figure 47: Quartier sur pilotis.....	32
Figure 48: Comparaison du potentiel avec et sans pilotis dans un quartier uniforme.....	33
Figure 49: Comparaison du potentiel avec et sans pilotis dans un quartier avec progression de λ_p	33
Figure 50: Potentiel de ventilation en fonction de la mise sur pilotis ou non du quartier amont - Couches supérieures.....	34
Figure 51: Potentiel de ventilation en fonction de la mise sur pilotis ou non du quartier amont - Couches inférieures.....	34
Figure 52: Quartier aval sur pilotis.....	34
Figure 53: Comparaison du potentiel dans les couches supérieures avec et sans pilotis avec une progression de Hmoy à l'amont.....	35
Figure 54: Comparaison du potentiel dans les couches inférieures avec et sans pilotis avec une progression de Hmoy à l'amont.....	35
Figure 55: Comparaison du potentiel dans les couches supérieures avec et sans pilotis avec une progression de λ_p à l'amont.....	35
Figure 56: Comparaison du potentiel dans les couches inférieures avec et sans pilotis avec une progression de λ_p à l'amont.....	35
Figure 57: Urbanisation amont étalée.....	36
Figure 58: Urbanisation amont en îlot dense.....	36
Figure 59: Impact de l'incidence du vent sur la progression en Hmoy dans les couches supérieures.....	37
Figure 60: Impact de l'incidence du vent sur la progression en Hmoy dans les couches inférieures.....	37
Figure 61: Impact de l'incidence du vent sur la progression en λ_p dans les couches supérieures.....	37
Figure 62: Impact de l'incidence du vent sur la progression en λ_p dans les couches inférieures.....	37
Figure 63: Un exemple de cumulations des effets.....	38
Figure 64: Architecture eu U ouvert.....	38
Figure 65: Architecture en créneau.....	38
Figure 66: Organisation architecturale en patio dépressionnaire.....	39
Figure 67: Principe de la rue canyon dépressionnaire.....	39

L'ADEME EN BREF

À l'ADEME - l'Agence de la transition écologique -, nous sommes résolument engagés dans la lutte contre le réchauffement climatique et la dégradation des ressources.

Sur tous les fronts, nous mobilisons les citoyens, les acteurs économiques et les territoires, leur donnons les moyens de progresser vers une société économe en ressources, plus sobre en carbone, plus juste et harmonieuse.

Dans tous les domaines - énergie, économie circulaire, alimentation, mobilité, qualité de l'air, adaptation au changement climatique, sols... - nous conseillons, facilitons et aidons au financement de nombreux projets, de la recherche jusqu'au partage des solutions.

À tous les niveaux, nous mettons nos capacités d'expertise et de prospective au service des politiques publiques.

L'ADEME est un établissement public sous la tutelle du ministère de la Transition écologique et du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation.

LES COLLECTIONS DE L'ADEME



FAITS ET CHIFFRES

L'ADEME référent : Elle fournit des analyses objectives à partir d'indicateurs chiffrés régulièrement mis à jour.



CLÉS POUR AGIR

L'ADEME facilitateur : Elle élabore des guides pratiques pour aider les acteurs à mettre en œuvre leurs projets de façon méthodique et/ou en conformité avec la réglementation.



ILS L'ONT FAIT

L'ADEME catalyseur : Les acteurs témoignent de leurs expériences et partagent leur savoir-faire.



EXPERTISES

L'ADEME expert : Elle rend compte des résultats de recherches, études et réalisations collectives menées sous son regard.



HORIZONS

L'ADEME tournée vers l'avenir : Elle propose une vision prospective et réaliste des enjeux de la transition énergétique et écologique, pour un futur désirable à construire ensemble.



CONCEVOIR UN URBANISME CLIMATIQUE EN MILIEU TROPICAL

Pour répondre au besoin de confort thermique en milieu tropical, la ventilation naturelle est une alternative à la climatisation à condition que la morphologie urbaine permette d'exploiter le fort potentiel de vent dans les tropiques.

Le but de ce guide est de proposer des recommandations aux urbanistes afin de concevoir des quartiers en zone tropicale qui maximisent le potentiel de ventilation naturelle. Un urbanisme aérodynamique doit permettre de développer des champs de pressions en façade et toiture suffisants pour que les débits et les vitesses d'air internes conduisent à la décharge thermique et au confort thermique des occupants.

La méthodologie repose sur des simulations numériques et des essais en soufflerie atmosphérique.

