

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département d'Architecture

MEMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : Architecture et développement durable

Option : Architecture Bioclimatique

L'apport de la cage d'escalier dans la ventilation naturelle - Simulation thermo-aéraulique d'un habitat collectif en Algérie -

Présenté par : Ait Kaci Zouhir

Devant Le jury composé de :

Dr. Dahli Mohammed	Maître de conférences "A"	UMMTO	Président
Pr. Azzag Ewa	Professeur	EPAU	Examinatrice
Dr. Djebri Boualem	Maître de conférences "A"	EPAU	Examineur
Dr. Chenak Abdelkrim	Chargé de recherche	CDER	Examineur
Dr. Boussoualim Aïcha	Maître de conférences "A"	EPAU	Rapporteur

2014

Remerciements

J'aimerais tout d'abord remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ma formation tout au long de mon cursus universitaire, et plus particulièrement tous mes enseignants du département d'architecture de Tizi-Ouzou.

Je tiens à rendre un immense hommage à celui qui été plus qu'un enseignant pour moi feu Mr Aïs, qui m'as appris à aimer l'architecture, que dieu ait son âme

Je souhaite aussi remercier toutes les personnes qui ont veillé à la création de la post -graduation dans le département d'architecture de Tizi-Ouzou, et qui nous ont permis d'accéder à ce niveau d'études.

Je remercie également mon encadreur Mme Boussoualim pour ses conseils précieux, et ces encouragements bienveillants qui m'ont beaucoup aidé à accomplir ce travail, mais aussi pour la confiance et le soutien qu'elle m'a accordé ainsi que pour sa patience et sa générosité.

J'aimerais aussi remercier les membres du jury pour m'avoir fait l'honneur d'examiner et d'évaluer ce travail, et pour avoir accepté d'apporter leurs précieuses remarques et leurs orientations qui seront déterminantes dans la suite de ma formation.

Enfin, un grand merci à ma famille pour leur aide et leur soutien infailible. Mon immense gratitude et mon admiration pour mes parents qui sont ma plus grande source d'inspiration, sans eux je n'aurais pas pu arriver là où je suis maintenant. Je remercie spécialement ma chère épouse Laïtmas qui m'a encouragé sans relâche tout au long de ce travail.

Résumé

La ventilation naturelle a été et restera toujours un enjeu majeur dans le bâtiment, du fait de sa fonction primordiale qui est d'assurer le renouvellement d'air et le rafraîchissement des espaces intérieurs. À cet égard, l'homme a eu recours, à travers l'histoire, à une multitude de dispositifs passifs pour ventiler son habitation, parmi les plus connus : les capteurs à vent, le moucharabieh, le patio... Aujourd'hui encore, plusieurs travaux de recherche ont montré que la ventilation naturelle est l'un des paramètres les plus déterminants dans le confort thermique à l'intérieur d'un bâtiment.

Face à la problématique de surconsommation et de gaspillage d'énergie, en l'occurrence dans le bâtiment, et à la demande croissante de logements neufs en Algérie, la recherche de nouvelles solutions passives et durables capables d'améliorer et de contrôler la ventilation naturelle dans l'habitat collectif, dans le but d'assurer le confort thermique des habitants est une priorité pour ne pas dire une nécessité. C'est dans cette optique que nous avons inscrit notre travail de recherche dont la finalité principale est d'apporter une modeste contribution à la recherche autour de cette problématique si riche qui est celle de la ventilation naturelle.

L'Algérie, à l'instar de beaucoup d'autres pays à travers le monde, accuse un retard énorme en matière d'efficacité énergétique dans le bâtiment, pour répondre aux besoins de confort thermique le recours aux moyens mécaniques de climatisation et de chauffage est malheureusement devenu systématique. Dans le but de contrebalancer cette tendance, nous avons élaboré l'hypothèse suivante : conçue d'une manière étudiée et bien réfléchie, la cage d'escalier peut contribuer considérablement à l'amélioration de la ventilation naturelle des logements dans l'habitat collectif en Algérie.

Afin de vérifier notre hypothèse, des simulations thermo-aérauliques ont été faites selon différents scénarios. Ceux-ci sont basés, sur la typologie des deux bâtiments qui ont servi de modèle (gabarits, nombre de logements par palier), la configuration spatiale de la cage d'escalier ainsi que sa relation avec les logements et les différents contextes climatiques en Algérie (les données climatiques utilisées sont celles d'Alger et de Biskra). L'objectif principal de ces simulations est d'évaluer, dans différentes situations, le comportement thermo-aéraulique de la cage d'escalier pour mettre en exergue son apport dans la ventilation naturelle et son impact sur le confort thermique des habitants à l'intérieur des logements dans l'habitat collectif en Algérie.

Mots clés : ventilation naturelle, cage d'escalier, habitat collectif, logements, confort thermique.

Abstract

The natural ventilation was and will always stay a major stake in the building, because of its essential function, which is to assure the renewal of air and the refreshment of the internal spaces. In this respect, the man used, through the history, to several passive devices to ventilate his house, among the most know: the wind catchers, the moucharabieh, the patio ... Today still, several researches works showed that the natural ventilation(breakdown) is one of the most determining parameters in the thermal comfort in the building.

In front of the problem of overconsumption and wasting of energy, in this particular case in the building, and in the increasing demand of new housing in Algeria, seeking new passive and sustainable solutions that improve and control natural ventilation in collective housing in order to ensure the comfort of residents is a priority if not a necessity. It is in this perspective that we recorded our research whose main purpose is to make a modest contribution to research around this problematic, which is so rich that, the natural ventilation

The Algeria, like many other countries around the world, has an enormous delay in energy efficiency in the building to meet the comfort needs of the use of mechanical means of heating and cooling is unfortunately became systematic. With the aim of counterbalancing this tendency, we developed the following hypothesis: designed in a manner considered and thoughtful, the stairwell can contribute significantly to improving the natural ventilation of dwellings in the collective housing in Algeria.

With the aim of verifying our hypothesis, a series of thermo-ventilation simulations were made under different scenarios, based on the typology of the two buildings that have served as models (templates, number of dwellings per landing), the spatial configuration of the stairwell and its relationship with housing, and different climatic contexts in Algeria (climate data used are those of Algiers and Biskra). The main objective of these simulations is to evaluate, in different situations, the thermo-ventilation behavior of the stairwell to highlight its contribution to natural ventilation and its impact on the thermal comfort of inhabitants within dwellings in collective housing in Algeria.

Keywords: natural ventilation, stairwell, collective housing, dwellings, thermal comfort

الملخص

كانت التهوية الطبيعية وستبقى دائما قضية رئيسية في العمارة، لأن وظيفتها الرئيسية تتمثل في ضمان تجديد الهواء وتبريد المساحات الداخلية. في هذا الصدد، لجأ الانسان، عبر التاريخ، الى استعمال العديد من التجهيزات السلبية لتهوية مسكنه، الأكثر شيوعا من بينها: ملاقف الرياح، الشبابتك والفناء. والى يومنا هذا لا زال العديد من البحوث تبين أن التهوية الطبيعية هي واحدة من العوامل الأكثر أهمية في الراحة الحرارية في المباني.

نظرا إلى مشكلة التبريد والاستهلاك المفرط للطاقة بالخصوص في المبنى، الى جانب الطلب المتزايد في السكنات الجديدة في الجزائر، أصبح البحث عن حلول جديدة ومستدامة قادرة على تحسين التهوية الطبيعية في السكن الجماعي والتحكم عليها من أجل تحسين الراحة الحرارية للسكان أولوية إن لم نقول ضرورة. وفي هذا السياق سجلنا هذا البحث الذي هدفه الرئيسي هو تقديم مساهمة متواضعة في البحوث حول هذه الإشكالية الغنية التي هي التهوية الطبيعية.

عرفت الجزائر، مثل العديد من البلدان الأخرى في العالم، تأخرا كبيرا من ناحية الفعالية الطاقوية في المباني، لضمان الراحة داخل المساكن، أصبح اللجوء الى الوسائل الميكانيكية للتدفئة والتبريد للأسف شائع. وضعنا الفرضية التالية لهدف معاكسة هذه الظاهرة: يمكن لقفص درج العمارة، إذا صمم بطريقة مدروسة وذكية، أن يساهم بشكل كبير في تحسين التهوية الطبيعية للشقق في السكن الجماعي.

من أجل اختبار فرضيتنا، تم إجراء سلسلة من المحاكاة بالكمبيوتر في إطار سيناريوهات مختلفة وتستند على أساس صنف العمارتين التين استعملت كنماذج (عدد الطوابق، عدد الشقق في الطابق)، شكل قفص درج العمارة وحسب مختلف السياقات المناخية في الجزائر (البيانات المناخية المستخدمة هي للجزائر وبسكرة). الهدف الرئيسي لهذه السلسلة من المحاكاة هو تقييم في حالات مختلفة سلوك الحراري والهوائي لقفص درج العمارة من أجل توضيح مساهمته في التهوية الطبيعية وأثرها على الراحة الحرارية داخل عمارات السكن الجماعي في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: التهوية الطبيعية، قفص درج العمارة، السكن الجماعي، الشقق، الراحة الحرارية

Sommaire

Remerciements	II
Résumé	III
Abstract	IV
المخلص	V
Chapitre introductif	1
Introduction	2
I. Problématique	3
II. Hypothèses	4
III. Méthodologie et structuration du mémoire	5
IV. Objectifs	6
Chapitre I	7
La ventilation naturelle dans la conception bioclimatique : bases théoriques.....	7
Introduction	8
I. Les moteurs de la ventilation naturelle	9
I.1. Principes de base.....	9
I.1.1. Principe de continuité.....	9

I.1.2. Théorème de Bernoulli	10
I.1.3. L'effet thermosiphon	11
I.2. Le tirage thermique	11
I.3. L'effet du vent	12
I.4. L'effet combiné : tirage thermique et effet du vent	12
II. La Relation entre le climat et la ventilation naturelle	13
II.1. Les Fonctions de la ventilation	13
II.1.1. La ventilation hygiénique.....	13
II.1.2. La ventilation du confort thermique	14
II.1.3. La ventilation de rafraîchissement	14
II.2. Facteurs microclimatiques dans une stratégie de ventilation naturelle	16
II.2.1. Données climatiques.....	16
II.2.2. Données microclimatiques	16
III. Effets du vent sur ventilation naturelle	17
III.1. La sensation de gêne et de confort	17
III.2. Les effets du vent à l'échelle urbaine.....	18
III.2.1. Vent, couche limite et rugosité.....	18
III.2.2. Effets liés à la topographie du terrain	20
III.2.3. Comportement du vent en présence d'un obstacle	20
III.3. Effets aérodynamiques liés aux formes architecturales	21
III.4. Effets liés à la végétation	22
IV. Comportement thermo-aéraulique à l'intérieur d'un édifice	23
IV.1. L'orientation par rapport au vent.....	23

IV.1.1. Angle d'incidence du vent	23
IV.1.2. Répartition des champs de pression	23
IV.2. Position et dimensions des ouvertures.....	24
IV.2.1. Position des ouvertures.....	24
IV.2.2. Dimensions des ouvertures	26
IV.3. Configuration des espaces intérieurs.....	27
IV.3.1. Influence des cloisons (obstacles intérieurs)	27
IV.3.2. Utilisation des déflecteurs.....	28
IV.3.3. Plan de pression neutre et effet de tirage thermique	29
Conclusion	32
 Chapitre II : La ventilation naturelle dans l'habitat collectif.....	 34
 V. Les enjeux de la ventilation naturelle.....	 35
V.1. Qualité de l'air : un enjeu sanitaire	35
V.1.1. Les principaux polluants	36
V.1.2. Les taux de renouvellement d'air	37
V.2. Un enjeu de confort thermique.....	41
V.2.1. Vitesse de l'air et confort thermique	41
V.2.2. Influence de la Vitesse de l'air sur la zone confort thermique.....	43
V.3. Enjeu énergétique : ventilation naturelle ou ventilation mécanique ?	44
V.3.1. Stratégie de ventilation naturelle.....	44
V.3.2. Efficacité énergétique d'une stratégie de ventilation naturelle	45
 VI. Systèmes de ventilation dans l'habitat collectif.....	 48
VI.1. La ventilation mécanique.....	48

VI.1.1. La VMC à simple extraction	48
VI.1.2. Ventilation à simple alimentation	50
VI.1.3. La ventilation mécanique double flux	50
VI.2. La ventilation naturelle.....	51
VI.2.1. La ventilation naturelle par ouverture des fenêtres	51
VI.2.2. La ventilation naturelle par conduits "effet cheminée"	55
VI.2.3. Combinaison des systèmes de ventilation naturelle.....	57
VI.3. La ventilation naturelle assistée (VNA).....	58
VI.3.1. Les composants de la ventilation naturelle assistée	58
VI.3.2. Les entrées d'air et les bouches d'extraction	59
VI.3.3. Les extracteurs.....	60
VI.3.4. Les avantages d'une ventilation naturelle assistée	61
VII. Approche architecturale de la ventilation naturelle	62
VII.1.1. Dispositifs de ventilation naturelle dans l'architecture traditionnelle	62
VII.1.1. Les capteurs à vent.....	63
VII.1.2. Moucharabieh	67
VII.1.3. Le Patio	68
VII.2. Exemples de stratégies de ventilation naturelle dans l'habitat collectif	69
VII.2.1. La tourelle à vent : 95 Logements collectifs du quartier Delzieux	69
VII.2.2. Ventilation naturelle avec récupération de chaleur : le quartier BedZed	73
VII.3. Critères de choix d'une stratégie de ventilation dans l'habitat collectif.....	75
VII.3.1. Critères esthétiques.....	75
VII.3.2. Critères d'usage	75
VII.3.3. Critères économiques.....	76
Conclusion	78

Chapitre III : La cage d'escalier dans les stratégies de ventilation naturelle.....	79
I. Approche architecturale d'un dispositif de ventilation naturelle	80
I.1. Grille de lecture architecturale d'un système de ventilation	80
I.2. Le bâtiment en tant que système	82
I.2.1. Analogie, bâtiment/système de ventilation	82
I.2.2. La cage d'escalier en tant que conduit vertical	83
II. Cage d'escalier intégrée dans des stratégies de ventilation naturelle	85
II.1. Cage d'escalier comme cheminée d'extraction : "Siège de Bang & Olufsen"	85
II.2. Cage d'escalier intégrée dans un dispositif de capteur à vent	87
II.3. Cage d'escalier "tour de ventilation naturelle" : Inland Revenue Centre Campus	89
II.4. Cage d'escalier dans une opération de rénovation : Rénovation de "Piet Bloms"	91
II.5. Cage d'escalier : combinée avec une façade végétale : " <i>Stacking Green</i> "	92
Conclusion	94
 Chapitre IV : Évaluation de l'apport de la cage d'escalier dans la ventilation naturelle d'un habitat collectif en Algérie par simulation thermo-aéraulique.....	 95
I. Introduction aux simulations numériques de bâtiments.....	96
I.1. Modèle et modélisation.....	96
I.2. Les types de modèles.....	97
I.2.1. Modèles monozones.....	97

I.2.2. Modèles multizones.....	98
I.2.3. Modèles zonaux.....	99
I.2.4. Modèles de codes de champ ou codes CFD	100
II. Les paramètres de la simulation.....	101
II.1. Logiciel de simulation choisi : ECOTECT ANALYSE 2011 et WINAIR4	102
II.2. Protocole de la simulation	105
II.3. Modèles de bâtiment choisis : critères de choix et présentation	107
II.4. Étapes de modélisation.....	111
II.4.1. Paramétrage du logiciel avant la modélisation	111
II.4.2. Importation des plans.....	112
II.4.3. Modélisation et visualisation du bâtiment.....	113
II.5. Processus de simulation.....	114
II.5.1. Configuration de la grille d'analyse CFD	114
II.5.2. Exportation vers WINAIR4	115
II.5.3. Chargement et visualisation des données CFD dans ECOTECT	116
III. Les deux Scénarios de simulation choisis.....	117
IV. Évaluation de l'apport de la cage d'escalier en tant que dispositif de rafraîchissement passif (1er scénario)	118
IV.1. Description des variantes du modèle de simulation	119
IV.1.1. Le bâtiment Témoin (Modèle 01/variante 01).....	119
IV.1.2. Le bâtiment avec la cage d'escalier intégrée dans un dispositif capteur à vent (Modèle 01/ variante 02).....	120
IV.1.3. Le bâtiment avec la cage d'escalier en capteur à vent jumelé avec un puits provençal (Modèle 01/ variante 03).....	121

V. Lecture et interprétation des résultats	122
V.1. Comparaison des résultats avant et après intégration d'un capteur à vent	122
V.1.1. Comparaison des profils de vitesse des flux d'air	122
V.1.2. Comparaison des profils de températures intérieures (annexe 07)	126
V.2. Comparaison des résultats avant et après intégration du puits provençal.....	128
VI. Évaluation de l'apport de la cage d'escalier comme cheminée d'extraction	
(scénario 02)	131
VI.1. Description des variantes du modèle de simulation	133
VI.1.1. Le bâtiment Témoin (Modèle 02/variante 01)	133
VI.1.2. La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de ventilation hygiénique en hiver (Modèle 02/variante 02)	133
VI.1.3. La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de rafraîchissement d'été par ventilation traversante (Modèle 02/variante 03).	134
VI.2. Lecture et interprétation des résultats	135
VI.2.1. La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de ventilation hygiénique en hiver (annexe 10)	135
VI.2.2. <i>La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de rafraîchissement d'été par ventilation traversante, cas d'une exposition mono-latérale.....</i>	<i>139</i>
VI.3. Synthèse	143
Conclusion générale	145
BIBLIOGRAPHIE.....	147
Annexes	156

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Principe de continuité (Chatelet, et al., 1994)	9
Figure 2 : Théorème de Bernoulli (Chatelet, et al., 1994)	10
Figure 3 : Effet thermosiphon (Chatelet, et al., 1994)	11
Figure 4 : Effet cheminée (Chatelet, et al., 1998)	11
Figure 5 : Effet du vent (Russel, et al., 2005).....	12
Figure 6: Effets combinés [russel, 2005]	12
Figure 7: les polluants de l'air intérieur dans une habitation. Source : www.energie.wallonie.be	13
Figure 8 : Puissance de refroidissement (en W/m ²) en fonction du taux de Renouvellement d'air et de la différence de température (Allard, 1998)	14
Figure 9: Echelle de Beaufort (Szucs, et al., 2007)	17
Figure 10: Rugosité et couche limite (Chatelet, et al., 1998)	18
Figure 11: Classes de rugosité (Gandemer, 1978-1979)	19
Figure 12: Influence de l'effet topographique sur les écoulements d'air (Sacré, et al., 1992)	20
Figure 13 : Ecoulement du vent au passage d'un obstacle parallélépipède (Gandemer, et al., 1981).....	20
Figure 14: Canalisation de l'écoulement d'air par l'agencement des arbres (Pacer, 1996)	22
Figure 15 : Utilisation de la végétation pour améliorer la ventilation naturelle (Allard, 1998)	22
Figure 16: Rafraîchissement de l'air par la végétation (Pacer, 1996)	22
Figure 17: Angle d'incidence du vent (Pacer, 1996).....	23
Figure 18: Répartirions des Champs de pression, en plan à gauche et en coupe à droite (Izard, 2006)...	24
Figure 19 : Influence du positionnement des ouvertures, Ventilation traversante (Pacer, 1996)	24
Figure 20: Influence du positionnement des ouvertures, Ventilation mono latérale (Pacer, 1996)	24
Figure 21: Influence du positionnement des ouvertures en coupe (Design Manual 11.02, 1986).....	25
Figure 22: Influence de la taille des ouvertures (Design Manual 11.02, 1986).....	26
Figure 23: Influence de la taille des ouvertures sur la vitesse d'air (Pacer, 1996)	26
Figure 24 : Influence de la répartition des cloisons (Design Manual 11.02, 1986)	27

Figure 25: Influence des déflecteurs sur les flux d'air (Pacer, 1996)	28
Figure 26: Plan de pression neutre Source : http://energie.wallonie.be	29
Figure 27: relation entre effet cheminée et PPN (Pacer, 1996)	30
Figure 28: Effet cheminée suivant l'organisation intérieure du bâtiment et PPN (ASHRAE, 2009).....	31
Figure 29: Influence de la section des ouvertures (Chatelet, et al., 1998)	33
Figure 30: La pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments résidentiel (AVEMS, 2010)	36
Figure 31: la ventilation naturelle d'un logement (AVEMS, 2010).....	37
Figure 32: Taux de renouvellement d'air (m ³ /h) en logement. Source : http://www.legifrance.gouv.fr/ 38	
Figure 33: Taux de renouvellement d'air (vol/h) en logement (ARENE, 2012).....	38
Figure 34: DTR C3.31 (Source : auteur)	39
Figure 35: Taux de renouvellement d'air (m ³ /h) en logement (CNERIB, 2006)	40
Figure 36: Zone de confort en fonction de la vitesse de l'air et de la température coefficient CLO (Szucs, et al., 2007)	42
Figure 37: Courbes d'iso-confort thermique pour trois vitesses d'air intérieures en fonction de la température d'air et de la température de surface (Allard, 1998)	43
Figure 38: point d'équilibre (AVEMS, 2010)	44
Figure 39 : Comparaison entre la consommation d'énergie (Baker, et al., 2000)	45
Figure 40 : Comparaison entre les coûts de construction (CIBSE, 2005)	46
Figure 41 : Comparaison entre les coûts énergétiques (CIBSE, 2005)	46
Figure 42 : Productivité en fonction du degré de control des usagers [CIBSE, 2005]	46
Figure 43 : Ventilation à simple extraction (Russel, et al., 2005)	48
Figure 44: VMC simple flux avec extraction collective (Lopez Diaz, 2012)	49
Figure 45 : VMC simple flux avec extraction par logements (RAGE, 2013).....	49
Figure 46 : VMC a simple alimentation (Handegord, 1983).....	50
Figure 47 : VMC double flux [ADEME, 2009].....	50
Figure 48: Ventilation traversante Le "3 fenêtre marseillais" Bâti ancien à Marseille (Izard, 2006)	51
Figure 49: Opération REX HQE à Nice (Izard, 2006)	53

Figure 50: Flux d'air à travers une fenêtre en mono-latérale (Allard, 1998)	53
Figure 51: Comparaison entre ventilation traversante et ventilation mono-latérale (CIBSE, 2005)	54
Figure 52: Types de ventilation naturelle par conduits verticaux [Tareb, 2004]	55
Figure 53: Ventilation par balayage partiel du logement (CSTB, 2003)	56
Figure 54: Ventilation par balayage général du logement (CSTB, 2003).....	56
Figure 55: Façade Sud du bâtiment du BRE. Source : www.energieplus-lesite.be	57
Figure 56: Combinaison des trois systèmes de ventilation naturelle, bâtiment du BRE (Mansouri, 2003).....	57
Figure 57: Stratégie de ventilation naturelle dans le bâtiment du BRE Source : http://www.energieplus-lesite.be	57
Figure 58: Composants d'une ventilation naturelle assistée. Source : http://www.astato.com	59
Figure 59: Entrées d'air et Bouches d'extraction (AVEMS, 2010)	59
Figure 60: Exemples d'extracteurs statiques (Aziez, 2006/2007)	60
Figure 61: Extracteur stato-mécanique (AVEMS, 2010).....	60
Figure 62: Comparaison entre ventilation naturelle assistée et ventilation naturelle (CSTB, 2003)	61
Figure 63: Malqaf, Egypte Source : ocw.mit.edu	62
Figure 64: Badgir, Iran	62
Figure 65: Moucharabieh, Egypte Source : ocw.mit.edu	62
Figure 66: Les formes de tours à vent au moyen orient Source : www.richard-tolouie.com	63
Figure 67: Vue sur la tour a vent Source : www.richard-tolouie.com	63
Figure 68: Effet attrape vent Source : http://www.richard-tolouie.com	64
Figure 69: Portes au pied de la cheminée Source : www.richard-tolouie.com	64
Figure 70 : Effet cheminée Source : www.richard-tolouie.com	64
Figure 71: Différents types de Badgir Source : www.richard-tolouie.com	65
Figure 72: Combinaison d'une rivière souterraine et d'une tour à vent (d'après Mehdi N. Bahadori,) (Izard, 2006).....	65
Figure 73: Circulation de l'air sous l'effet d'un vent dans un Malqaf d'après Hassan Fathy (Izard, 2006)	66
Figure 74: Coupe d'un Malqaf avec un procédé d'humidification pour un climat chaud et aride d'après Hasan Fathi (Izard, 1993).....	66

Figure 75: Fonctionnement d'un moucharabieh (Izard, 1979)	67
Figure 76: Fonctionnement jour/nuit d'un patio (Izard, 1979)	68
Figure 77: vue sur le quartier Delzieux Source : http://www.atelierphilippemadec.fr	69
Figure 78: Coupe sur l'entrée d'air auto réglable (ARENE, 2012)	70
Figure 79 : Bouche d'extraction (ARENE, 2012)	70
Figure 80: conduits d'extraction (ARENE, 2012)	70
Figure 81 : Vue sur une tourelle à vent Source : http://www.atelierphilippemadec.fr	71
Figure 82: Axonométrie de la Tourelle à vent Source : http://www.atelierphilippemadec.fr	71
Figure 83: Coupe partielle sur le système VNAC (ARENE, 2012).....	72
Figure 84: vue sur un bâtiment de BedZed Source : www.zedfactory.com/	73
Figure 85: Systèmes hybrides et durable développés dans les bâtiments BedZed (Twinn, 2003)	73
Figure 86: les tourelles à vent de BedZed. Source : www.flickr.com	74
Figure 87 : Principe de l'échangeur de chaleur. Source : www.zedfactory.com/	74
Figure 88: Fonctionnement du "Wind Cowl» Source : www.zedfactory.com/	74
Figure 89: Critères de choix d'un système de ventilation (AVEMS, 2010)	76
Figure 90: Grille d'analyse morphologique du système de ventilation (Mansouri, 2003).....	80
Figure 91: Stratégie de ventilation naturelle basée sur les espaces de transition Immeuble "Götz GmbH (Mansouri, 2003)	81
Figure 92: Analogie bâtiment - système de ventilation naturelle (source : Auteur).....	83
Figure 93: Bâtiment Bang & Olufsen. Source : http://www.khr.dk/	85
Figure 94: Principe de la ventilation naturelle assistée du Bâtiment Bang & Olufsen. (Fait par Birch & Krogboe A/S.) Source : http://theses.ulaval.ca Réadaptée par l'auteur	86
Figure 95: Caisson d'extraction, Ventilateur, Escalier. Source : www.ieemaster.civil.aau.dk	87
Figure 96: Plan du RDC et direction des flux d'air sur la section "AA» [(Altan, et al., 2012).....	88
Figure 97: Profil des flux d'air après intégration de la tour à vent (Altan, et al., 2012).....	88
Figure 98: Inland Revenue Centre Campus Source : www.hopkins.co.uk	89
Figure 99: Principe de la stratégie de ventilation naturelle d'Inland Revenue Centre. Source : http://gaia.lbl.gov/	90

Figure 100: schéma de ventilation Source : Architectural record, mai, 1995	90
Figure 101: tour de ventilation naturelle source : http://cmiserver.mit.edu	90
Figure 102: (A) vue extérieure, (B) Atrium, (C) plan de l'atrium. Source : www.personal-architecture.nl	91
Figure 103: Coupes schématiques sur l'atrium, transition verticale usagers, flux d'air, lumière naturelle Source : http://www.dezeen.com/ réadaptée par l'auteur.....	92
Figure 104: Cage d'escalier avec façade végétale Source : http://votrongnghia.com	92
Figure 105: Schémas de ventilation naturelle "Stacking Green" Source : http://www.dezeen.com	93
Figure 106: Model monozone (Woloszyn, 1999)	97
Figure 107: Model multizones (Trocmé, 2009)	98
Figure 108: Model zonal (Woloszyn, 1999).....	99
Figure 109: Codes de champ ou Codes CFD (Woloszyn, 1999).....	100
Figure 110 : Ecotect Analysis 2011 Source : http://usa.autodesk.com	102
Figure 111 : Modèle 01, bâtiment de R+4, deux logements par palier, RDC commercial (Source : auteur)	107
Figure 112 : Modèle 02, bâtiment de R+6, quatre logements par palier, RDC commercial (Source : auteur)	107
Figure 113: Exemples de logement OPGI Source : http://www.opgi.dz/	108
Figure 114 : Représentation graphique du modèle 01 (source : auteur).....	109
Figure 115: Représentation graphique du modèle 02 (source : auteur).....	110
Figure 116: Capture d'écran sur la fenêtre projet, ECOTECT (Source : auteur)	112
Figure 117: Capture d'écran d'ECOTECT après importation des plans (Source, Auteur).....	112
Figure 118: création de zones thermiques, ECOTECT (Source, Auteur).....	113
Figure 119: Capture écran sur la fenêtre de visualisation, ECOTECT (Source, Auteur)	114
Figure 120: Capture d'écran sur la Grille d'analyse d'ECOTECT (Source, Auteur).....	115
Figure 121: Fenêtre de calcul de WINAIR4 (Source : Auteur)	115
Figure 122 : Boîte de dialogue d'exportation vers WINAIR4 (Source : Auteur)	115
Figure 123: Visualisation des résultats de températures et de vitesses des flux d'air dans ECOTECT après chargement des données à partir de WINAIR4 (Source : auteur).....	116

Figure 124 : Données climatiques de Biskra (1996-2005) sous format <i>WEA</i> affichées sur <i>WEATHER TOOL</i> , <i>ECOTECT</i> (source : auteur)	118
Figure 125: Modèle 01/variante 01, le bâtiment témoin (Source : auteur)	119
Figure 126: Modèle 01/variante 02, bâtiment avec la cage d'escalier en capteur à vent (Source : auteur)	120
Figure 127: Modèle 01/ variante 03, Le bâtiment avec la cage d'escalier en capteur à vent jumelé avec un puits provençal (Source : auteur).....	121
Figure 128: Vue en plan de la vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante01 (Source : auteur).....	124
Figure 129: Vue en plan de la vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante02 (Source : auteur).....	124
Figure 130: Vitesses de l'air au niveau des portes d'entrée des logements (Source : auteur)	125
Figure 131: Vue en coupe du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle 01/Variante 02 (Source : auteur).....	125
Figure 132: Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante 02 (Source : Auteur)	125
Figure 133: Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle 01/Variante 02 (Source : auteur)	127
Figure 134: Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle 01/Variante 01 (Source : auteur)	127
Figure 135: Vue sur plan du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle 01/Variante03 (Source : auteur).....	129
Figure 136: Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle 01/Variante03 (Source : auteur)	129
Figure 137: Vue en coupe du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle 01/Variante03 (Source : auteur).....	130
Figure 138 : Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante 03 (Source : auteur)	130
Figure 139 : Données climatiques d'Alger (1996-2005) sous format <i>WEA</i> affichées sur <i>WEATHER TOOL</i> , <i>ECOTECT</i> (source : auteur).....	131
Figure 140: 3D <i>ECOTECT</i> du Modèle 02/variante 01, le bâtiment témoin (Source : auteur)	133
Figure 141: 3D <i>ECOTECT</i> du Modèle 02/variante 02, la cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une ventilation hygiénique en hiver (Source : auteur).....	134
Figure 142: Répartition des pressions sous l'effet du tirage thermique par rapport au PPN. (IBGE, 2010)	137
Figure 143: Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, Modèle 02/variante 02 (Source : auteur)	138

Figure 144: Vue en façade du profil de vitesse des flux d'air, Modèle 02/variante 02 (Source : auteur)	138
Figure 145: schématisation du principe de la ventilation naturelle traversant basée sur la cage d'escalier (Source : auteur).....	139
Figure 146: Vue en plan profil de vitesse et directions des flux d'air, modèle 02/variante 01 (Source : Auteur)	141
Figure 147 : Vue en plan profil de vitesse et directions des flux d'air, modèle 02/variante 03 (Source : Auteur)	141
Figure 148: Vue en plan du profil de températures intérieures, modèle 02/variante 01 (Source : auteur)	142
Figure 149: Vue en plan du profil de températures intérieures, modèle 02/variante 03 (Source : auteur)	142
 Tableau 1 : Différents scénarios climatiques avec la ventilation naturelle appropriée. Source : auteur, élaboré sur la base du livre de Givoni (Givoni, 1978), [Fonctions est exigences de la ventilation, p.272].....	15
Schéma 01 : Processus du choix d'une stratégie de ventilation naturelle (Source : auteur).....	16
Tableau 02 : Les effets types de vents en architecture (Chatelet, et al., 1998) (adaptée : auteur).....	21
Tableau 03 : Tableau des scénarios et du protocole de simulation (source : auteur).....	117

Chapitre introductif

Introduction

La ventilation naturelle a été et restera toujours un des enjeux majeurs en architecture, car elle joue un rôle déterminant dans le confort de l'homme à l'intérieur des édifices en influençant la température et la qualité de l'air intérieur (renouvellement d'air et rafraîchissement), comme le souligne Givoni : « *Les conditions de ventilation à l'intérieur d'un bâtiment sont parmi les principaux facteurs déterminants de l'hygiène de l'homme, de son confort et de son bien-être* ». B. Givoni (Givoni, 1978) , p. 275.

À cet égard, l'homme a de tout temps essayé de résoudre la problématique de la ventilation naturelle à travers l'histoire, ainsi différents procédés passifs ont vu le jour de par le monde dont les plus connus : le capteur à vent et ses variantes (Badgir en Iran, le Malqaf en Egypte), le patio et le moucharabieh, très fréquents dans l'architecture musulmane. Ce sont là des exemples de solutions passives et durables, basées sur des phénomènes naturels (tirage thermique, vent...), qui témoignent de l'ingéniosité de l'architecture vernaculaire, et recèlent une multitude d'enseignements pour les architectes d'aujourd'hui de par leur adaptation et leur intégration subtile aux différents contextes climatiques.

Plusieurs travaux de recherche ont démontré qu'une stratégie de ventilation naturelle bien étudiée peut améliorer considérablement l'efficacité énergétique d'un bâtiment. À cet effet, de plus en plus d'architectes intègrent la question de la ventilation naturelle dès les premières phases de conception du projet, proposant ainsi une panoplie de solutions passives qui conditionnent parfois même la forme des bâtiments.

En Algérie, dans un contexte où la surconsommation et le gaspillage d'énergie dans le bâtiment demeurent problématiques et la demande de logements neufs est en augmentation considérable (près de deux millions de logements ont été lancés entre 2004 et 2011 à travers le territoire national)¹, la recherche de nouveaux procédés et de solutions passives capables de renforcer la ventilation naturelle dans l'habitat collectif devient une priorité pour ne pas dire une exigence.

¹ Selon des chiffres relevés sur le site officiel du ministère de l'habitat et de l'urbanisme. (<http://www.mhuv.gov.dz/>)

Ajouter à cela, l'Algérie, à l'instar de beaucoup d'autres pays, accuse un retard énorme en matière d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment², en l'occurrence dans l'habitat collectif, cela est dû en grande partie à l'absence d'étude bioclimatique durant le processus de conception (simulation thermo-aéraulique, calcul de bilans thermiques et énergétiques...).

Par conséquent, afin de pallier les défauts de conception (isolation inefficace, ventilation déficiente...) qui engendre des logements d'un confort thermique médiocre, les habitants sont obligés d'utiliser en surrégime des dispositifs conventionnels de climatisation et de chauffage, ce qui accentue la surconsommation énergétique. Dans le but de contrebalancer cette tendance, nous avons l'intention, à travers ce travail de recherche, d'explorer une nouvelle voie vers des solutions passives de ventilation naturelle dans l'habitat collectif en Algérie.

I. Problématique

Un premier constat sur la production architecturale en matière d'habitat collectif de ces dernières années en Algérie a révélé une certaine standardisation des formes et des traitements architecturaux à travers le territoire national, malgré les importantes différences géographiques et climatiques qui existent entre les différentes régions du pays. C'est dû en partie à l'absence d'études bioclimatiques (thermiques, aérauliques, aérodynamiques...) au cours du processus de conception, seuls les impératifs économiques et quantitatifs sont pris en compte, par conséquent l'agencement des espaces habitables (séjour, chambre, cuisine...) et des espaces de transition (sas d'entrée, cage d'escalier, hall...) ne se fait pas dans le souci d'améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment.

C'est dans l'intention d'explorer de nouvelles stratégies de ventilation naturelle dans l'habitat collectif en Algérie, que nous nous sommes intéressés aux espaces de transition et plus particulièrement à la cage d'escalier, un espace récurrent dans l'habitat collectif de par sa fonction

² En Algérie, le secteur du bâtiment est le plus énergivore. Sa consommation représente plus de 42% de la consommation finale. Un chiffre avancé par le ministère de l'énergie et des mines et repris dans l'article "Isolation thermique des bâtiments" publié dans le portail algérien des énergies renouvelables **CDER**. (<http://www.cder.dz/>)

primordiale de transition verticale mais souvent considérée comme secondaire dans la conception architecturale des bâtiments résidentiels.

Notre approche consiste à reconsidérer cet espace, au-delà de sa fonction initiale, en tant qu'élément important dans le comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment de par sa configuration spatiale. Car il peut constituer un élément de contrôle et de diffusion verticale des flux d'air, renforçant ainsi la ventilation naturelle des logements en se basant essentiellement sur deux mécanismes naturels à savoir : le tirage thermique et la pression du vent.

Cette réflexion nous a conduits à poser les questions suivantes :

- ***La cage d'escalier peut-elle avoir un rôle, au-delà de sa fonction initiale de circulation verticale, dans la ventilation naturelle d'un habitat collectif en Algérie ?***
- ***Intégrée dans des stratégies de ventilation naturelle relatives au contexte climatique Algérien, la cage d'escalier peut-elle contribuer au rafraîchissement passif et à l'amélioration de la qualité de l'air à l'intérieur des logements ?***

II. Hypothèses

Ce travail de recherche s'est basé sur les hypothèses suivantes :

- Intégrée dans une conception adaptée aux différents contextes climatiques et géographiques de notre pays, la cage d'escalier peut constituer une solution bioclimatique non négligeable dans l'amélioration de la ventilation naturelle de l'habitat collectif en Algérie, et cela dans le but d'assurer le confort thermique des habitants et de contribuer à l'efficacité énergétique dans le bâtiment.
- La cage d'escalier peut constituer le composant principal d'un dispositif de rafraîchissement passif, visant à améliorer le confort thermique à l'intérieur des logements dans les périodes de surchauffe, notamment dans un climat semi-aride comme celui de Biskra.

- Dans d'un climat méditerranéen comme celui d'Alger, la problématique de la ventilation naturelle des logements ayant une seule façade (mono-exposition), peut-être résolue par une stratégie de ventilation naturelle basée sur la cage d'escalier. Celle-ci vise, d'une part, à augmenter les débits de renouvellement d'air en hiver, et d'autre part, à améliorer le rafraîchissement passif et réduire l'humidité à l'intérieur des logements en été,

III. Méthodologie et structuration du mémoire

Ce travail de recherche a été scindé en quatre chapitres complémentaires :

- Le premier chapitre est dédié à la compréhension des mécanismes naturels thermo-aérauliques qui favorisent la ventilation naturelle dans un édifice, dans le but d'appréhender les différentes relations qui existent, d'une part, entre la forme architecturale et les effets aérodynamiques qu'elle génère, et d'autre part, entre l'organisation des espaces intérieurs et les écoulements d'air dans un bâtiment.
- Ensuite, le deuxième chapitre consiste en une partie théorique qui traite de la ventilation naturelle dans l'habitat collectif à travers une analyse du fonctionnement des différents dispositifs passifs à la fois dans l'architecture vernaculaire et contemporaine.
- L'objectif du troisième chapitre est de dresser un état des lieux autour de l'intégration de la cage d'escalier dans les stratégies de ventilation naturelle, pour cela des exemples de bâtiments références, où la cage d'escalier joue un rôle primordial dans leur ventilation, ont été analysés afin d'en déceler les concepts et les solutions bioclimatiques utilisés.
- Ces trois chapitres constituent une première partie théorique qui a servi à l'élaboration du quatrième chapitre, où à travers une série de simulations thermo-aérauliques³ nous avons essayé d'évaluer l'apport que peut avoir la cage d'escalier dans la ventilation naturelle.

Le recours à la simulation, qui est désormais un outil incontournable de la conception bioclimatique, a été motivé par les possibilités qu'offre l'association d'Ecotect Analysis 2011 avec

³ Il existe une panoplie de logiciels de simulation, dont les plus connus : **Fluent**, **Ecotect**, **Trnsys**... Dans le cadre de ce travail de recherche nous avons eu recours pour les simulations thermo-aérauliques à **Ecotect Analysis 2011** associé avec **WinAir 4**.

WinAir 4 en matière de recherche de solutions passives de ventilation naturelle, ce qui nous a permis de vérifier nos hypothèses. Ces simulations ont été exécutées suivant différents scénarios basés, sur les paramètres suivants :

- La typologie des deux bâtiments qui ont servi de modèle (gabarits, nombre de logements par palier).
- La configuration spatiale de la cage d'escalier ainsi que sa relation avec les logements.
- Les deux contextes climatiques choisis pour les simulations sur la base de nos hypothèses à savoir : le climat méditerranéen d'Alger et le climat semi-aride de Biskra.

IV. Objectifs

L'objectif principal du quatrième chapitre est d'évaluer, dans différentes situations, le comportement thermo-aéraulique de la cage d'escalier pour mettre en exergue son apport dans la ventilation naturelle et son impact sur le confort thermique des habitants à l'intérieur des logements dans l'habitat collectif en Algérie.

Celui-ci s'inscrit dans les principaux objectifs de ce travail de recherche à savoir :

- Aboutir à des orientations qui permettront d'intégrer la cage d'escalier dans différentes stratégies de ventilation naturelle.
- Démontrer que la cage d'escalier peut être conçue comme élément principal d'un dispositif passif qui vise à améliorer la ventilation naturelle des logements.
- Contribuer à une nouvelle approche qui appréhende la cage d'escalier non plus comme un élément secondaire qui se résume à sa fonction initiale de circulation verticale, mais comme un espace déterminant dans la ventilation naturelle de l'habitat collectif en Algérie.

Chapitre I

La ventilation naturelle dans la conception bioclimatique : bases théoriques

Ce premier chapitre est dédié à la compréhension des mécanismes naturels thermo-aérauliques qui favorisent la ventilation naturelle dans un édifice, dans le but d’appréhender les différentes relations qui existent, d’une part, entre la forme architecturale et les effets aérodynamiques qu’elle génère, et d’autre part, entre l’organisation des espaces intérieurs et les écoulements d’air dans un bâtiment.

Introduction

La ventilation naturelle est l'un des défis les plus complexes de la conception bioclimatique des édifices, car elle est tributaire de plusieurs paramètres variables dans l'espace et le temps (la vitesse et la température de l'air, l'humidité relative, l'ensoleillement...).

L'enjeu majeur pour nous, architectes, réside dans la bonne compréhension de ces paramètres dynamiques afin de pouvoir plus ou moins adapter nos choix architecturaux au comportement thermo-aéraulique du bâtiment et de son environnement, dont la finalité principale est d'assurer le confort des usagers tout en optimisant les gains énergétiques.

A travers l'histoire, les sociétés traditionnelles ont toujours composé harmonieusement avec la nature. De ce fait l'habitat vernaculaire, de par le monde, recèle une multitude d'enseignements en termes de ventilation naturelle, ainsi, le patio, l'atrium, la tour à vent, sont des exemples parmi d'autre, basés sur les principes les plus simples du déplacement de l'air, qui peuvent constituer une source d'inspiration pour les architectes d'aujourd'hui.

La prise de conscience sur la nécessité de réduire la consommation énergétique dans le bâtiment et l'évolution des exigences de confort avec le développement technologique ont engendré de nouvelles tendances parfois systématiques dans la conception des bâtiments : ainsi la sur-isolation thermique et la sur-étanchéification des parois extérieures jumelées à l'utilisation des systèmes de chauffage central et l'absence d'une ventilation adéquate ont favorisé la multiplication de foyers de condensation et de moisissure à l'intérieur des habitations.

Par conséquent, c'est le confort et la santé des habitants tant recherchés qui se retrouvent menacés. C'est dans cette optique qu'une nouvelle réflexion est plus que nécessaire pour nous architectes afin d'aboutir à un compromis entre des systèmes actifs et des solutions passives et durables.

I. Les moteurs de la ventilation naturelle

Une ventilation est dite naturelle si l'écoulement d'air se fait sans l'intervention de dispositifs mécaniques (ventilateur, extracteur...), car elle se repose exclusivement sur deux phénomènes naturels qui induisent systématiquement un mouvement d'air à savoir : **le vent** (force éolienne) et **le tirage thermique** (effet thermosiphon).

De ce fait, pour élaborer une stratégie de ventilation naturelle efficace, un architecte doit inévitablement avoir des connaissances de base en mécanique des fluides afin de comprendre le fonctionnement de ces deux moteurs naturels.

À cet égard, nous allons d'abord nous intéresser à trois principes de bases de l'écoulement de l'air à l'intérieur d'un bâtiment afin de mieux comprendre ensuite la nature des phénomènes qui sont à l'origine des deux moteurs naturels de l'air dans la ventilation naturelle à savoir : le tirage thermique et l'effet du vent.

I.1. Principes de base

Nous allons nous arrêter sur les trois principes de base de la mécanique des fluides suivants : le principe de continuité, le théorème de Bernoulli et l'effet thermosiphon. Dans le but de pouvoir par la suite de comprendre les différents phénomènes de l'écoulement d'air en architecture.

I.1.1. Principe de continuité

Dans l'étude des écoulements d'air en architecture, la variation de la masse volumique de l'air est négligeable ainsi l'air est considéré comme un fluide incompressible (masse volumique ρ constante) (Chatelet, et al., 1994)

Ce qui implique que quand :

un écoulement d'air se déplace sous forme d'un tube de courant constitué d'un ensemble de filets de fluide, ce dernier se conserve suivant le **principe de continuité**, qui

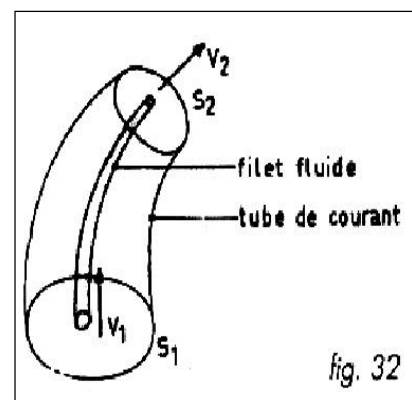


Figure 1 : Principe de continuité
(Chatelet, et al., 1994)

s'exprime par le maintien du débit volumique Dv constant tel que, si V est la vitesse et S est la section du tube du courant:

$$Dv = V1.S1 = V2.S2 = V.S = Cst \text{ (Chatelet, et al., 1994)}$$

I.1.2. Théorème de Bernoulli

Selon le théorème de Bernoulli, l'énergie se conserve dans un fluide en mouvement, ce qui a donné l'équation finale suivante (écoulement de l'air sans frottement) (Chatelet, et al., 1994).

$$\rho \cdot (V^2 / 2) + p + \rho \cdot g \cdot z = Cst$$

- ρ : masse volumique en kg/m³,
- V : vitesse de l'air en m/s
- g : gravité terrestre, 9,81 m/s²
- z : hauteur en mètre
- p : pression en pascal

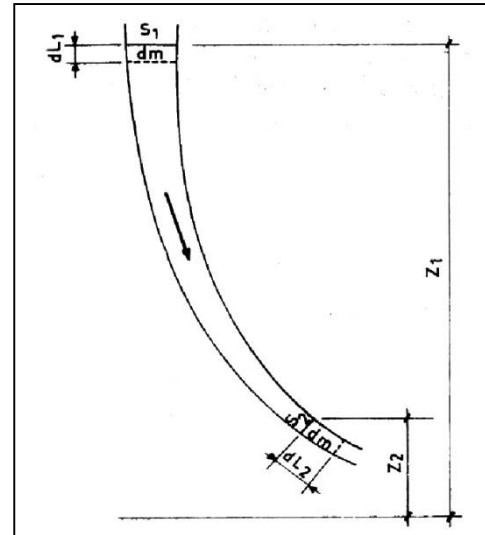


Figure 2 : Théorème de Bernoulli
(Chatelet, et al., 1994)

On retrouve dans l'ordre des termes : l'énergie cinétique, l'énergie de pression et l'énergie potentielle. La somme des trois est une constante que l'on nomme **la charge d'un fluide**.

Dans le cas où on considère qu'il y a frottement, alors :

$$\rho \cdot (V_1^2 / 2) + p_1 + \rho \cdot g \cdot z_1 = \rho \cdot (V_2^2 / 2) + p_2 + \rho \cdot g \cdot z_2 + J \text{ (Chatelet, et al., 1994)}$$

J étant la perte de charge.

On retrouve deux sortes de pertes de charges : les pertes de charges linéiques (peu fréquente dans le bâtiment) et les pertes de charges singulières (ouverture en chicane, rétrécissement des ouvertures, moucharabieh...) (Chatelet, et al., 1994).

I.1.3. L'effet thermosiphon

Un effet thermosiphon se produit (c'est-à-dire un écoulement), dans un circuit présentant des différences de hauteurs, quand **un écart de température** se produit changeant la **masse volumique du fluide**. Autrement dit, quand dans un circuit de fluide, de la chaleur est fournie à un niveau plus bas et qu'elle est ensuite retirée à un niveau plus haut, un thermosiphon aura lieu (Chatelet, et al., 1994), ce qui induit un mouvement du fluide à l'intérieur du circuit.

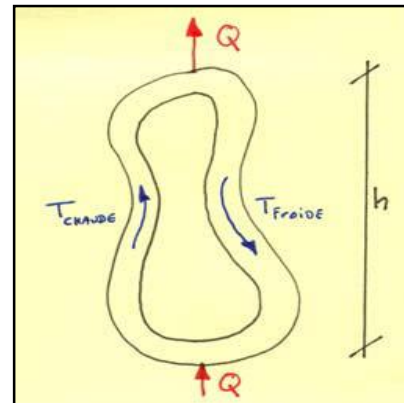


Figure 3 : Effet thermosiphon
(Chatelet, et al., 1994)

I.2. Le tirage thermique

Appelé aussi l'"effet cheminée", ce phénomène est une conséquence directe de l'effet thermosiphon qui engendre un écoulement d'air par différence de température entre deux zones d'un volume d'air, entraînant ainsi une ventilation ascendante.

Pour qu'un "**effet cheminée**" se produise, la température extérieure doit être inférieure à la température intérieure générant ainsi une dépression (engendrée par la différence de masse volumique) qui induit un mouvement d'air. Par conséquent, si on prévoit des ouvertures en partie basse pour introduire de l'air extérieur dans un espace, et des ouvertures en partie haute pour laisser l'air s'échapper, il se produit un renouvellement d'air par effet de cheminée. Le débit d'air induit est proportionnel à la taille des ouvertures, à la racine carrée de la hauteur de la cheminée et de la différence de température de l'air entre les points bas et hauts.

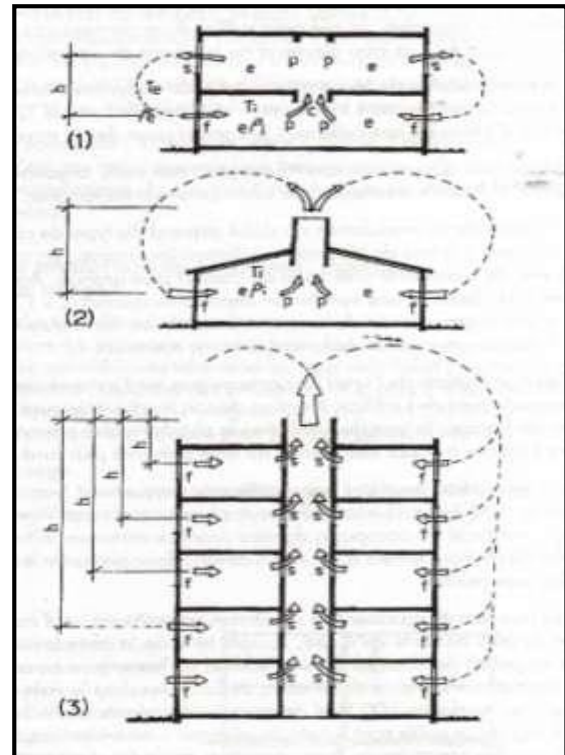


Figure 4 : Effet cheminée
(Chatelet, et al., 1998)

I.3. L'effet du vent

Moteur principal de la **ventilation transversale** (ou traversante), Le vent induit une différence de pression entre la façade exposée (en surpression) et celle qui est à l'abri (en dépression), ce qui engendre un écoulement d'air de la zone en surpression vers la zone en dépression.

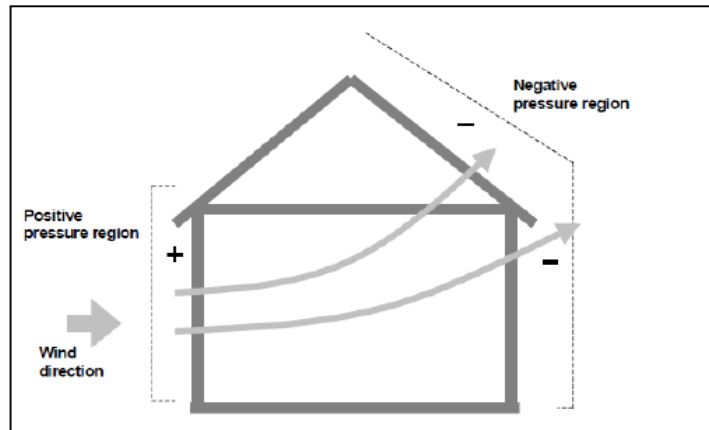


Figure 5 : Effet du vent (Russel, et al., 2005)

I.4. L'effet combiné : tirage thermique et effet du vent

Le mouvement d'air à l'intérieur d'un bâtiment est souvent le résultat du tirage thermique combiné à l'effet du vent, avec plus ou moins une certaine prédominance de l'un sur l'autre. L'action du vent est plus importante pour les bâtiments de faible hauteur.

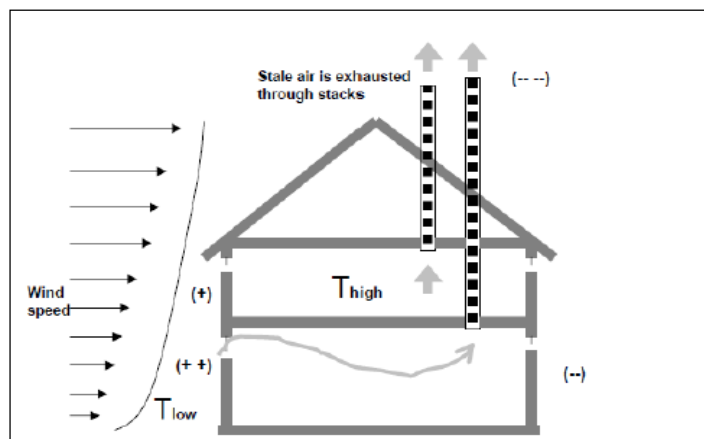


Figure 6: Effets combinés [russel, 2005]

Ainsi, à partir d'une certaine vitesse, le vent devient dominant par rapport à l'effet de tirage thermique. Le mouvement d'air provoqué par ces deux "moteurs naturels" est parfois insuffisant, c'est pour cela qu'il faut bien dimensionner les différents composants du système de ventilation naturelle de telle sorte à atteindre les débits d'air nécessaires à la santé des occupants et à la pérennité du bâti.

II. La Relation entre le climat et la ventilation naturelle

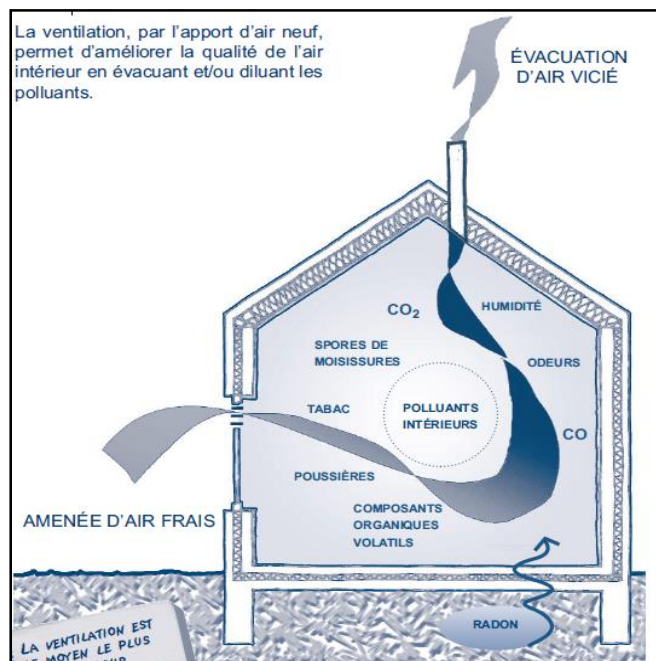
Le choix d'une stratégie de ventilation naturelle est intimement lié aux contextes climatiques de l'édifice, celui-ci détermine quels sont les objectifs recherchés. Ainsi nous pouvons inscrire un système de ventilation naturelle, selon ses fonctions (Givoni, 1978), dans trois principales stratégies : hygiénique, de confort thermique et de rafraîchissement.

II.1. Les Fonctions de la ventilation

Les objectifs de la ventilation dans le bâtiment varient suivant les climats, l'usage des espaces et le contexte environnant de l'édifice. Ainsi selon Givoni, nous pouvons résumer ces objectifs en trois fonctions principales (Givoni, 1978):

II.1.1. La ventilation hygiénique

Elle est indispensable sous toutes les conditions climatiques, car elle vise à maintenir la qualité de l'air dans le bâtiment à un niveau minimum par un renouvellement régulier de l'air intérieur vicié par un air neuf, dans le but d'éviter l'excès du taux de dioxyde de carbone, de polluants et d'odeurs désagréables, et d'assurer la quantité d'oxygène nécessaire pour la respiration. Elle est quantifiée par **le taux de renouvellement d'air** dans un espace donné.



La Figure 7 illustre les éléments polluants les plus répandus à l'intérieur d'une habitation.

Figure 7: les polluants de l'air intérieur dans une habitation.
Source : www.energie.wallonie.be

II.1.2. La ventilation du confort thermique

Elle contribue au confort thermique en augmentant les pertes de chaleur du corps par convection naturelle, en évitant l'inconfort dû à la moiteur de la peau. Elle est en fonction de la température et de l'humidité relative de l'air à l'intérieur du bâtiment, et définie principalement en termes de "**vitesse de l'air**" plutôt qu'en termes de "**renouvellement d'air**".

II.1.3. La ventilation de rafraîchissement

Ce que Givoni nomme "le refroidissement de la structure du bâtiment" (Givoni, 1978). Lorsque la température à l'intérieur d'un bâtiment est supérieure à celle de l'extérieur, l'air pénétrant de l'extérieur se mélange avec l'air intérieur, ce qui permet de le rafraîchir par échanges de chaleur basés principalement sur la convection. Le degré de rafraîchissement est en fonction du gradient de température intérieur-extérieur. Dans ce cas, c'est **la température de l'air** qui est importante, car l'air extérieur doit être plus frais que celui de l'intérieur.

La **Figure 8** montre que la puissance de refroidissement est proportionnelle, d'une part, à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment (ΔT), et d'autre part, au taux de renouvellement d'air (Allard, 1998). Ainsi dans le cas d'une stratégie de rafraîchissement passif, le volume d'air à introduire à l'intérieur des espaces ne dépend pas seulement de la qualité de l'air mais aussi de la puissance de refroidissement recherchée.

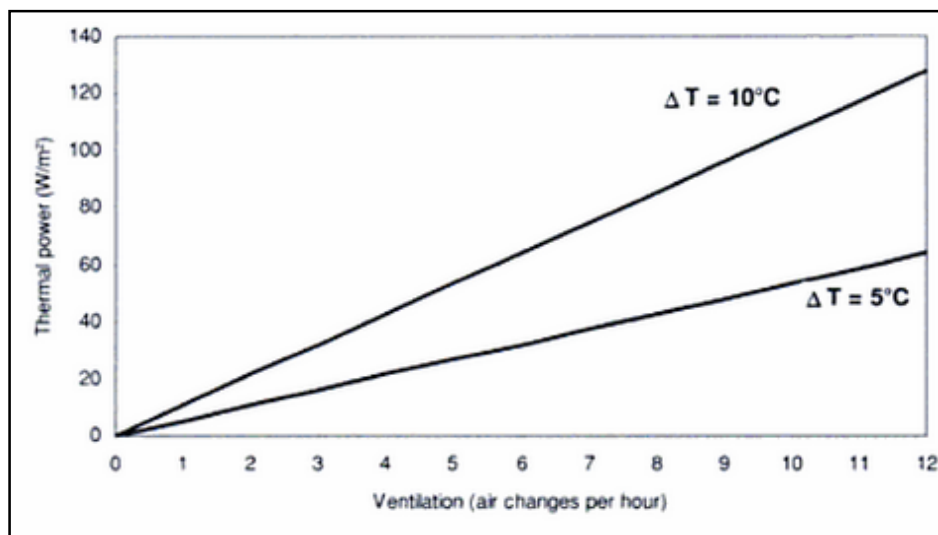


Figure 8 : Puissance de refroidissement (en W/m²) en fonction du taux de Renouvellement d'air et de la différence de température (Allard, 1998)

Afin d'illustrer la différence entre ces trois fonctions, nous exposons le tableau suivant des différents scénarios climatiques et les fonctions de la ventilation recherchées :

Scénarios climatiques	Paramètres d'inconfort	Comportement des usagers	Ventilation recherchée	Indicateurs
Climat sec et froid	• T extérieure très basse • Humidité absolue ambiante très faible	• Tendance à réduire l'entrée de l'air extérieur froid • Diminution considérable de l'humidité relative intérieure (provoque l'irritation)	• Hygiénique : réduire la concentration des polluants dans l'air intérieur, le recours au tirage thermique peut s'avérer efficace. <i>(L'humidification est parfois souhaitable)</i>	-Taux de renouvellement d'air (m³/h)
Climat à hiver humide et peu froid	• Isolation thermique déficiente (cas du logement social) • Humidité absolue ambiante importante	• Le recours excessif au chauffage rudimentaire. • Tendance à réduire la ventilation par les occupants. • Problème majeur la condensation (risque sanitaire)	• Hygiénique : Ventilation aspirante (tirage thermique) dans les sources de vapeurs d'eau (salle de bains, cuisine, salle d'eau...)	-Taux de renouvellement d'air (m³/h)
Climat chaud et sec	• T extérieure très élevée la journée • T extérieure rafraîchissante la nuit • Humidité absolue ambiante très faible	• Tendance à réduire au minimum la ventilation pendant la journée • Recherche de la ventilation nocturne	• Hygiénique : évacue la concentration des polluants cumulés durant la journée • De rafraîchissement : dissipe la chaleur emmagasinée durant la journée (l'usage des capteurs à vents est recommandé)	-Température de l'air (°C)
Climat chaud et humide	• T extérieure très élevée • Humidité absolue ambiante très élevée	• Tendance à rechercher le mouvement d'air	• du confort thermique par évaporation : assure un mouvement d'air près du corps qui accélère l'évaporation de la sueur et induit une sensation de confort. (la ventilation traversante est très recherchée)	-Vitesse de l'air (m/s)

Tableau 1 : Différents scénarios climatiques avec la ventilation naturelle appropriée. Source : auteur, élaboré sur la base du livre de Givoni (Givoni, 1978), [Fonctions et exigences de la ventilation, p.272]

II.2. Facteurs microclimatiques dans une stratégie de ventilation naturelle

Dans le but d'optimiser la ventilation naturelle dans un édifice, l'architecte doit repérer et intégrer, dès les premiers stades de conception, toutes les contraintes liées au contexte de son intervention inhérentes au déplacement de l'air. Ainsi nous pouvons schématiser la démarche à suivre à travers le schéma ci-dessous :

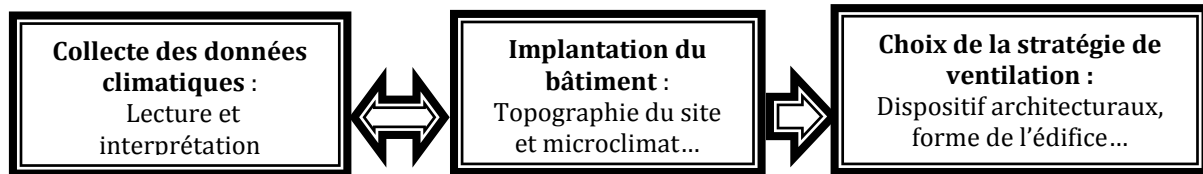


Schéma 01 : Processus du choix d'une stratégie de ventilation naturelle (Source : auteur)

De ce fait, la compréhension de certains phénomènes physiques de base et l'analyse de l'ensemble des paramètres dynamiques relatifs à la fois au bâtiment et à son environnement sont cruciales pour l'optimisation des stratégies de ventilation naturelle. Selon (Mansouri, 2003) toutes ces données peuvent être regroupées comme suit :

II.2.1. Données climatiques

Ce sont les premières données à analyser, avant le début du processus de conception, elles sont récupérées au niveau des stations météorologiques locales. Leur rôle est déterminant dans le choix des dispositifs de ventilation naturelle à projeter par la suite (voir tableau 1), ces données nous renseignent sur le régime journalier des phénomènes suivants : la vitesse et la direction des vents, la température de l'air, l'Humidité de l'air, le taux d'ensoleillement.

II.2.2. Données microclimatiques

Après avoir analysé les données climatiques, il est nécessaire de passer à l'étude de paramètres liés au site d'intervention à une échelle plus réduite. Une étape très importante pour prévoir le comportement aérodynamique et thermique de l'environnement immédiat et surtout afin d'anticiper les aléas liés à la nature du site relatifs à : la rugosité du site (ville, campagne, mer...) ; présence d'obstacle et de masques (relief, bâtiments...) ; l'albédo moyen des surfaces (nature des surfaces...) ; la concentration des polluants ; l'émission de chaleur anthropique. Dans le but d'améliorer l'efficacité d'une ventilation naturelle, le concepteur doit étudier minutieusement les spécificités microclimatiques du site d'intervention afin d'anticiper leurs influences sur les données climatiques régionales et de pouvoir ainsi en tirer profit.

III. Effets du vent sur ventilation naturelle

Le vent⁴, qui est un moteur important de la ventilation naturelle, est souvent influencé par les spécificités microclimatiques du site, ce qui induit parfois un changement d'intensité et/ou de direction. Un dispositif de ventilation naturelle conçu sans prendre en compte ces spécificités peut s'avérer défaillant après réalisation. À cet égard, nous allons voir quels sont les effets du vent les plus observés à l'échelle urbaine et architecturale.

III.1. La sensation de gêne et de confort

L'évaluation des effets du vent sur le confort se base essentiellement sur l'échelle de BEAUFORT qui associe à chaque plage de vitesse du vent une série de phénomènes visibles sur l'environnement naturel et construit ainsi que sur les habitants.

La limite de confort dépend à la fois de la vitesse du vent et de la température de l'air ambiant, on parle alors de confort aérothermique. Le CSTB propose la vitesse de **3.6m/s** comme limite de gêne mécanique, à ne pas confondre avec la limite de sécurité qui est de l'ordre de **15m/s** (renversement d'un piéton (Szucs, et al., 2007)).

Selon la température de l'espace et l'activité qu'on y pratique la vitesse d'air est recherchée ou pas, soit pour accélérer le rafraîchissement en été ou éviter la sensation de froid en hiver.

Force	Z = 2 m	Caractéristiques du vent
2	1,5 - 3	Les visages ressentent la sensation du vent. Les feuilles bruissent.
3	3 - 4,5	Les feuilles et les petits rameaux sont en mouvement permanent. Le vent déploie pleinement les drapeaux. Les cheveux sont dérangés. Les vêtements amples battent au vent.
4	4,5 - 7	La poussière et les papiers se soulèvent. Les branches s'agitent. Les cheveux sont décoiffés.
5	7 - 9	Les petits arbres avec des feuilles oscillent. La marche est légèrement perturbée.
6	9 - 11	Les grosses branches se mettent en mouvement. Le vent siffle dans les fils téléphoniques. Les parapluies sont utilisés avec peine. La marche devient très instable.
7	11 - 14	Les arbres sont totalement en mouvement. On éprouve de grosses difficultés à marcher contre le vent.
8	14 - 17	Les branches d'arbres se cassent. D'une façon générale, progression pédestre très difficile et dangereuse.
9	17 - 20	Risque d'être violemment projeté à terre sous l'effet des bourrasques.

Figure 9: Echelle de Beaufort (Szucs, et al., 2007)

⁴ Le vent est un déplacement d'air, essentiellement horizontal, d'une zone haute pression (masse d'air froid) vers une zone de basse pression (masse d'air chaud), la différence de température entre les masses d'air résulte de l'action du soleil. Le régime des vents en un lieu est représenté par une rose des vents, qui exprime leur direction et leurs intensités. La pression et la direction du vent se mesurent par un Anémomètre (Liébard, et al., 2005).

III.2. Les effets du vent à l'échelle urbaine

Au-delà de la rose des vents, fournie par la station météorologique, qui nous informe sur la direction et la vitesse des vents, le comportement de ces derniers change en fonction de la nature du site, ainsi les effets du vent en milieu urbain sont différents de ceux en rase campagne, et sont intimement liés à la densité et la hauteur du bâti ainsi qu'à la topographie du lieu.

III.2.1. Vent, couche limite et rugosité

Le vent présente une vitesse instantanée très variable, avec des variations de vitesse que sont les turbulences, autour d'une vitesse moyenne qui évolue en fonction de l'altitude et de la nature et des aspérités du terrain qui constitue des rugosités variables.

La Figure 10 montre qu'au-delà d'une certaine hauteur Z_g au-dessus du sol, nommée **couche limite**, la vitesse moyenne du vent (160 km/h) reste constante (Chatelet, et al., 1998).

Proportionnellement à la rugosité du site, qui est représentée par le coefficient (α), la hauteur Z_g de la couche limite augmente, ainsi que son impact sur la vitesse du vent, celle-ci décroît plus avec une rugosité plus importante.

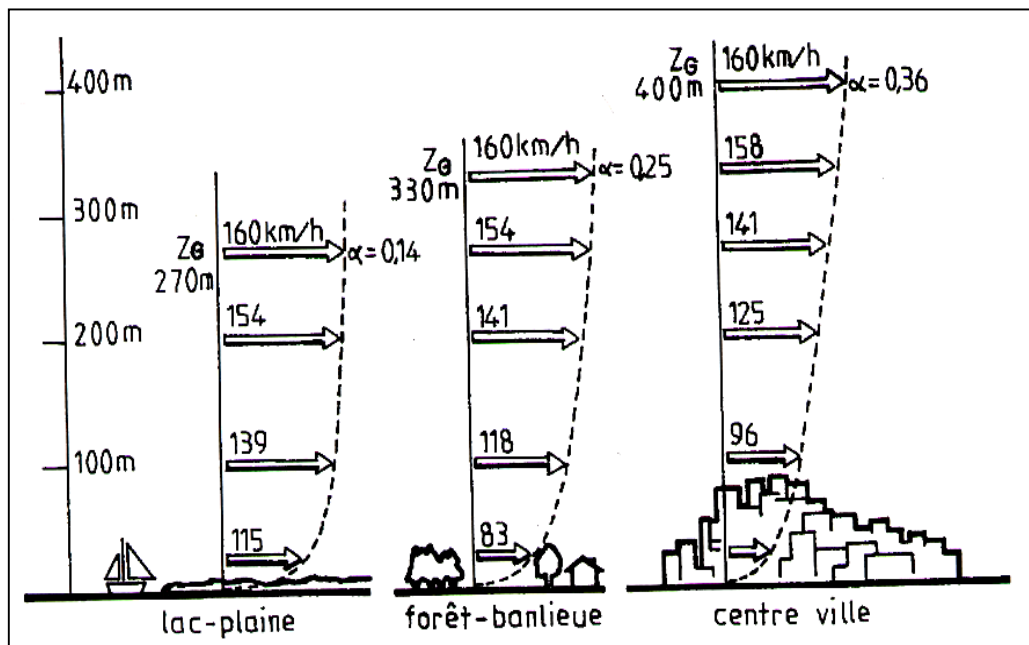


Figure 10: Rugosité et couche limite (Chatelet, et al., 1998)

Pour quantifier le phénomène du vent, sa vitesse et sa force, on utilise une vitesse moyenne de référence, qui est prise à 10m au-dessus du sol en site plat et à faible rugosité (campagne, aéroport, surface de la mer...). Elle correspond généralement à celle mesurée par la station météo et elle varie suivant la rugosité du site.

Dans la *Figure 11* (Gandemer, 1978-1979)⁵, le Z_0 est le paramètre de rugosité qui varie de quelques millimètres pour un vent venant de la mer à quelques mètres pour un vent de zone urbaine. Le coefficient K est en fonction de la rugosité. Ainsi, des classes de rugosité ont été définies suivant les différents sites, proportionnellement à l'importance de leurs effets sur la vitesse du vent.

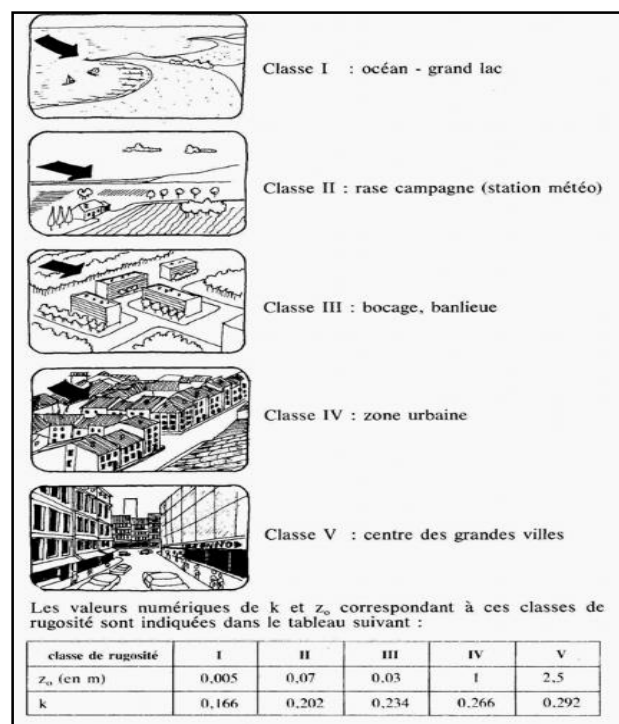


Figure 11: Classes de rugosité (Gandemer, 1978-1979)

A cet effet, les données fournies par la station météorologique ne constituent qu'une première quantification du phénomène vent, des mesures in situ à l'échelle urbaine et architecturale doivent être effectuées pour tenir compte des paramètres microclimatiques, dans le but de se protéger de ces effets négatifs sur le confort ou/et de tirer profit de la force éolienne dans la ventilation naturelle des édifices.

⁵ Référence citée dans la thèse de Mansouri Y. (Mansouri, 2003)

III.2.2. Effets liés à la topographie du terrain

La topographie du terrain modifie le comportement du vent en vitesse et en direction, la bonne maîtrise de la morphologie du terrain et de son rapport avec l'emplacement du bâtiment est primordiale. Les effets les plus répandus sont illustrés dans la **Figure 12**:

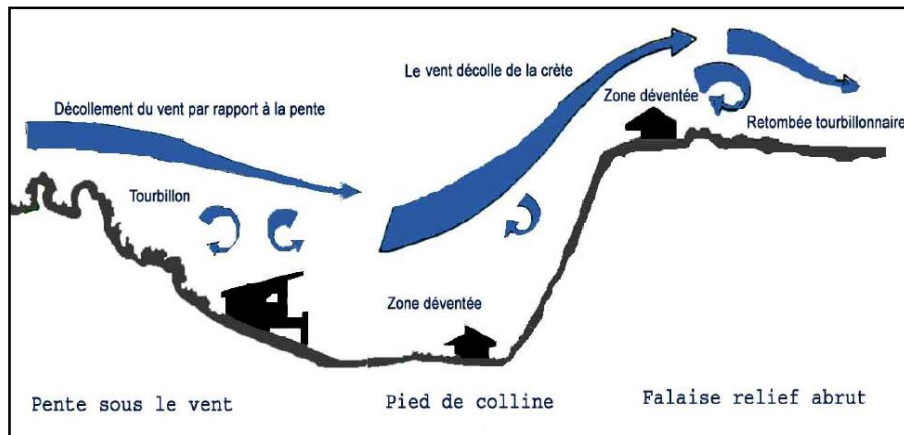


Figure 12: Influence de l'effet topographique sur les écoulements d'air (Sacré, et al., 1992)

III.2.3. Comportement du vent en présence d'un obstacle

La présence d'un obstacle (bâtiment, arbre,...) devant un écoulement d'air modifie son comportement, car le contournement de cet obstacle induit une série de phénomènes aérodynamiques qui peuvent être positifs ou négatifs dans le cas d'un bâtiment. Quand le vent rencontre sur sa direction un bâtiment, une zone de suppression se forme sur la façade exposée, celle-ci croît avec la hauteur, entraînant ainsi un rouleau tourbillonnaire au pied des bâtiments, les filets d'air contraint de contourner l'obstacle, engendrent une zone de dépression par effet de sillage et de décollement.

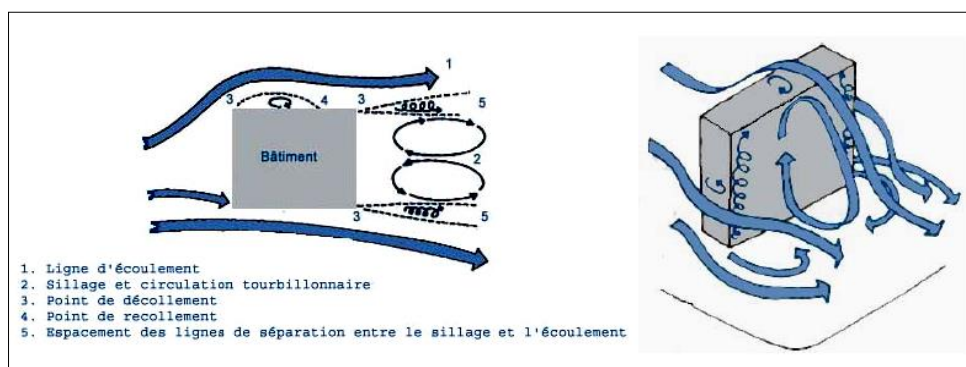


Figure 13 : Ecoulement du vent au passage d'un obstacle parallélépipède (Gandemer, et al., 1981)

III.3. Effets aérodynamiques liés aux formes architecturales

En milieu bâti, la forme d'un édifice ou de la combinaison de plusieurs édifices peuvent induire des situations aérodynamiques spécifiques au comportement du vent. Le tableau suivant illustre par des figures (Chatelet, et al., 1998) les effets les plus observés en architecture :

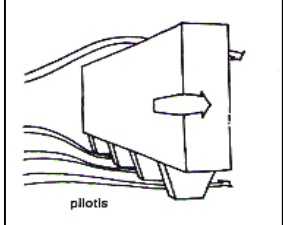
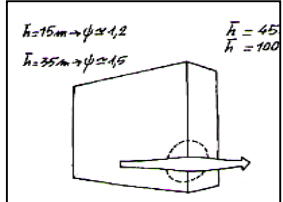
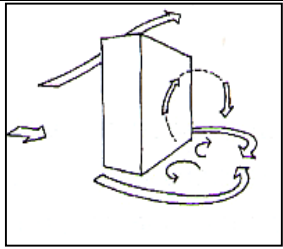
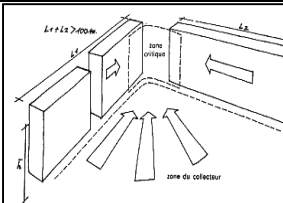
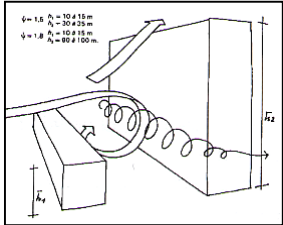
FIGURES	DEFINITIONS
	Effet de trous sous immeuble -Phénomène d'écoulement dans les trous ou passages sous immeubles (pilotis) qui relie l'avant du bâtiment en surpression et son arrière en dépression. -L'effet est ressenti quand la hauteur du bâtiment dépasse 15m
	Effet de coin -Phénomène d'écoulement aux angles des constructions qui mettent en relation la zone de surpression en amont et la zone de dépression latérale du bâtiment.
	Effet de sillage -La circulation fluide tourbillonnaire en aval des formes. -L'importance du sillage est en fonction du maître couple exposé au vent incident.
	Effet de Venturi -Phénomène de collecteur formé par des constructions dessinant un angle ouvert au vent. -La zone critique pour le confort se situe à l'étranglement.
	Effet du rouleau tourbillonnaire au pied des immeubles -Provoqué par l'écoulement de l'air qui descend au pied de la face au vent, et conditionné par le gradient vertical de vitesse moyenne du vent. -Pour que l'effet soit considérable, la hauteur du bâtiment doit être supérieur 15 m.²

Tableau 02 : Les effets types de vents en architecture (Chatelet, et al., 1998) (adaptée : auteur)

III.4. Effets liés à la végétation

La taille et le type de la végétation ainsi que sa disposition permettent de contrôler et de diriger les flux d'air en créant des zones de surpression et de dépression dans le but de dévier ou au contraire de canaliser le vent afin de renforcer la ventilation naturelle. La végétation (haies et arbres à feuillage persistant ou caduques...) peut être utilisée, pour freiner les vents dominants en hiver et modifier leur profil d'écoulement pour canaliser les brises en été.

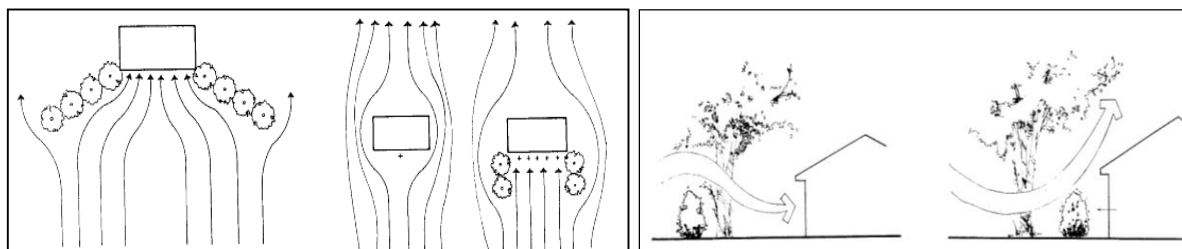


Figure 14: Canalisation de l'écoulement d'air par l'agencement des arbres (Pacer, 1996)

Les haies végétales peuvent jouer le rôle de déflecteurs, car positionnées à côté des ouvertures orientées parallèlement à la direction des vents, elles créent des zones de surpression qui permettent de rediriger les flux d'air à l'intérieur de l'édifice. Cependant, une végétation mal positionnée peut générer des effets désagréables.

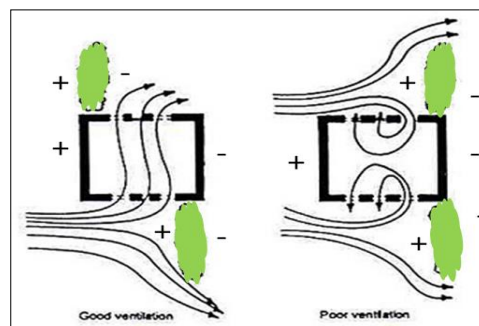


Figure 15 : Utilisation de la végétation pour améliorer la ventilation naturelle (Allard, 1998)

Un sol végétal libre d'obstacles et ombré par des arbres rafraîchit les brises estivales par évapotranspiration des plantes avant de pénétrer le bâtiment.

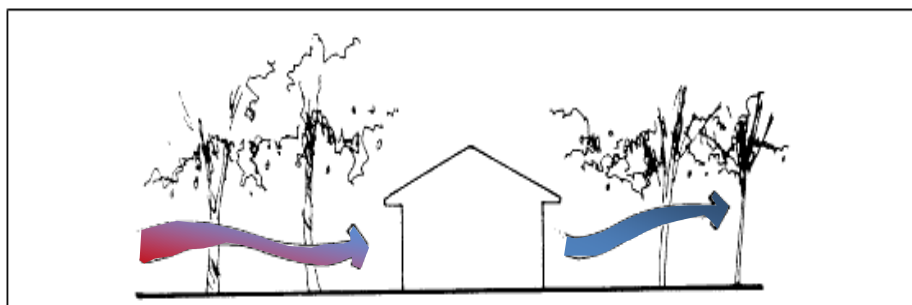


Figure 16: Rafraîchissement de l'air par la végétation (Pacer, 1996)

IV. Comportement thermo-aéraulique à l'intérieur d'un édifice

L'écoulement d'air à l'intérieur d'un édifice dépend principalement de : l'orientation de l'édifice par rapport aux vents dominants, la position et la dimension des ouvertures, la présence d'obstacles (cloison, mobilier...) et la géométrie de l'espace intérieur. Une bonne configuration de tous ces paramètres peut contribuer à optimiser la ventilation des espaces intérieurs.

IV.1. L'orientation par rapport au vent

IV.1.1. Angle d'incidence du vent

Le positionnement d'un édifice par rapport au vent dominant est déterminant dans la ventilation des espaces intérieurs, ainsi l'architecte doit choisir l'orientation des façades et des ouvertures de telle sorte à répondre aux exigences de ventilation tout en évitant les situations d'inconfort local. L'orientation de la façade au vent ne devrait pas s'écarter de la direction du vent favorable de plus de 45° . Sa pression reste néanmoins sensible jusqu'à un angle de 30° (Figure 17).

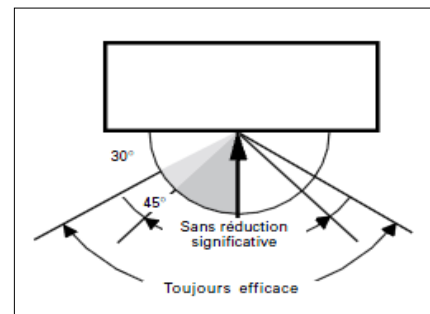


Figure 17: Angle d'incidence du vent (Pacer, 1996)

Cependant, parfois cette orientation peut s'avérer impossible (favoriser l'ensoleillement, une seule façade...), l'utilisation bien étudiée de déflecteurs permet de rediriger les flux d'air pour améliorer la ventilation naturelle des espaces intérieurs.

IV.1.2. Répartition des champs de pression

Un édifice est comme immergé dans un fluide qui est l'air. Quand cet air s'écoule au voisinage d'un bâtiment, il engendre des « champs de pression » répartie inégalement sur les différentes parois (façades, toiture, terrasse...). Le repérage de ces champs de pression, pouvant être positifs ou négatifs, permet de bien positionner les ouvertures (entrées et sorties de l'air).

En coupe, on voit bien que le côté face au vent est en surpression et l'autre est en dépression. La toiture est partagée en deux lorsqu'il y a deux pans : dans le vent, en surpression, sauf à proximité du faîte et sous le vent en dépression.

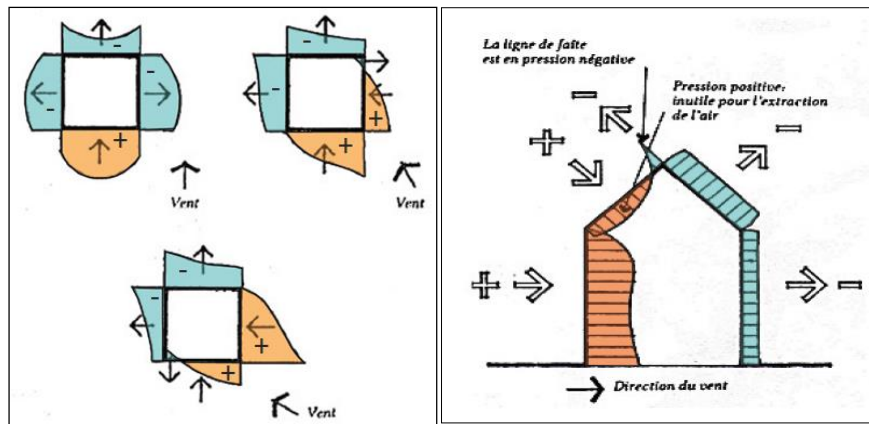


Figure 18: Répartition des Champs de pression, en plan à gauche et en coupe à droite (Izard, 2006)

IV.2. Position et dimensions des ouvertures

IV.2.1. Position des ouvertures

La ventilation d'un espace intérieur nécessite la mise en relation d'un champ de pression positif (côté face au vent en surpression) avec un autre négatif (côté protégé du vent en dépression) par un positionnement approprié des ouvertures de manière à créer naturellement un écoulement d'air (ventilation traversante) à l'intérieur de cet espace.

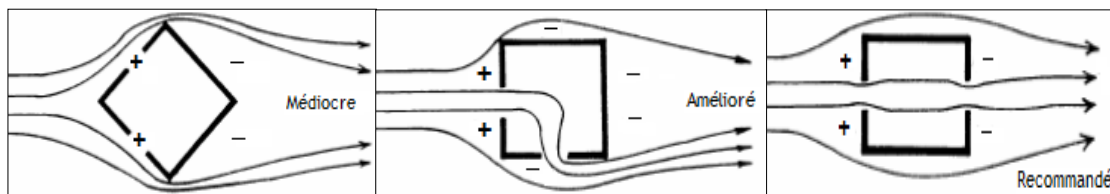


Figure 19 : Influence du positionnement des ouvertures, Ventilation traversante (Pacer, 1996)

Dans les cas d'une façade à simple exposition, il faut créer une différence de pression, soit par une disposition asymétrique des ouvertures, soit par une orientation oblique des parois par rapport à la direction du vent.

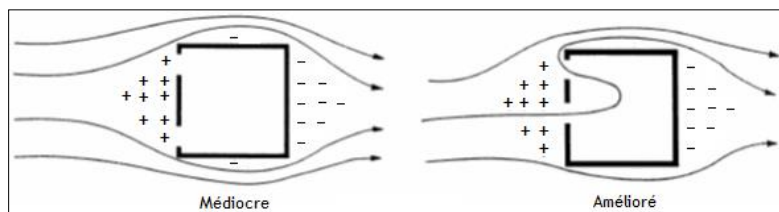


Figure 20: Influence du positionnement des ouvertures, Ventilation mono latérale (Pacer, 1996)

Bien entendu, une ventilation traversante (ouvertures sur les deux faces opposées ou adjacentes) est nettement plus efficace qu'une ventilation à simple exposition (ouvertures sur une seule façade), en termes de débit et de taux renouvellement d'air.

La différence de hauteur entre les ouvertures est très importante, car il faut les positionner de telle sorte à créer un décalage en hauteur entre les entrées d'air (partie basse) et les sorties d'air (partie haute) pour induire une ventilation ascendante via l'effet thermosiphon.

La vitesse et le débit d'air diffèrent selon les niveaux, la vitesse du vent étant plus importante en hauteur, l'écoulement d'air est plus efficace à l'intérieur des niveaux supérieurs.

La hauteur des ouvertures doit être ajustée selon l'usage de l'espace (bureau, salle de sport, classe...), et éviter tout un inconfort thermique ou mécanique local (envolement des feuilles sur un bureau, zone humide...). La présence d'obstacles (cloison, mobilier...) influence l'écoulement d'air en créant des zones de dépression et de surpression à l'intérieur de l'espace.

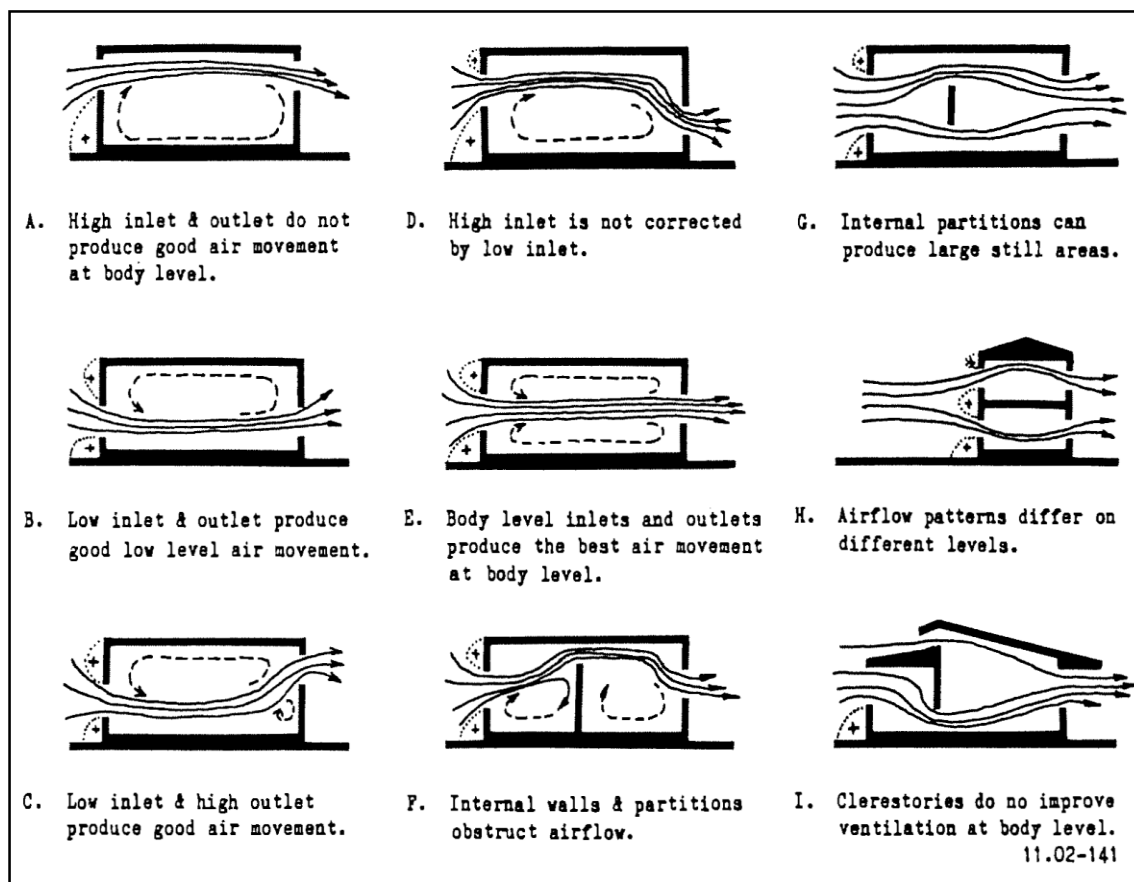


Figure 21: Influence du positionnement des ouvertures en coupe (Design Manual 11.02, 1986)

IV.2.2. Dimensions des ouvertures

Il est admis couramment que les entrées et les sorties d'air doivent avoir la même taille pour optimiser le renouvellement d'air, mais l'expérience montre que dans le cas d'ouvertures identiques, la perte de charge maximale a lieu au niveau de l'ouverture de sortie (élargissements brusques, ouverture sur l'extérieur).

En conséquence, il est recommandé, quand cela a un sens, des ouvertures de plus grandes dimensions en sortie (Chatelet, et al., 1998).

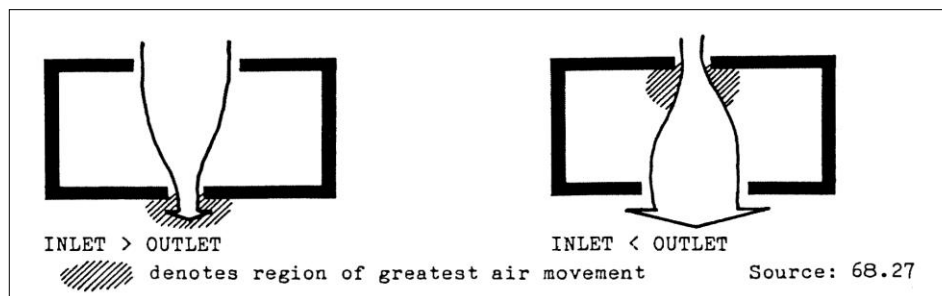


Figure 22: Influence de la taille des ouvertures (Design Manual 11.02, 1986)

Ainsi, suivant le principe de conservation de la masse, la réduction de la section d'une ouverture engendre une accélération de l'écoulement d'air en aval, à cet égard, il faut opter pour des entrées d'air de petites dimensions lorsqu'on recherche la vitesse de l'air pour le rafraîchissement d'été.

Dans la **figure 23** le pourcentage représente la vitesse de l'air.

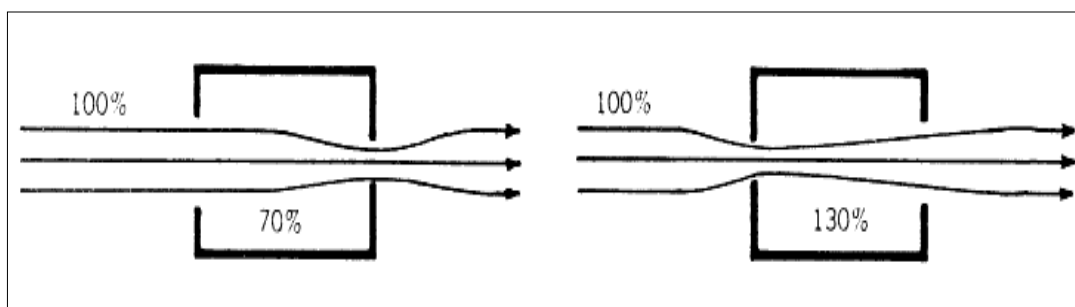


Figure 23: Influence de la taille des ouvertures sur la vitesse d'air (Pacer, 1996)

IV.3. Configuration des espaces intérieurs

La répartition des espaces intérieurs (cloisonnement) et le type de relations (portes, couloir, cage d'escalier...) qui existent entre les différents volumes d'air qui constitue l'intérieur du bâtiment sont deux paramètres très déterminants dans le comportement thermo-aéraulique de celui-ci. La position des cloisons et du mobilier par rapport aux ouvertures doit être étudiée de telle sorte à éviter d'entraver la circulation de l'air à l'intérieur des espaces.

IV.3.1. Influence des cloisons (obstacles intérieurs)

Les cloisons intérieures (et parfois le mobilier) constituent des obstacles intérieurs pour l'écoulement d'air, car elles réduisent sa vitesse (pertes de charge) et modifient la distribution des flux (contournement de l'obstacle et décollement) dans les cas où l'usage de l'espace le permet le plan « libre » offre la situation la plus optimale.

Dans le cas où une cloison perpendiculaire à l'écoulement d'air serait inévitable, il est recommandé de la rapprocher de la sortie d'air pour limiter la zone non ventilée, d'un autre côté la présence d'une cloison peut contribuer à mieux répartir le flux d'air ; mais cela nécessite une étude précise pour bien la positionner.

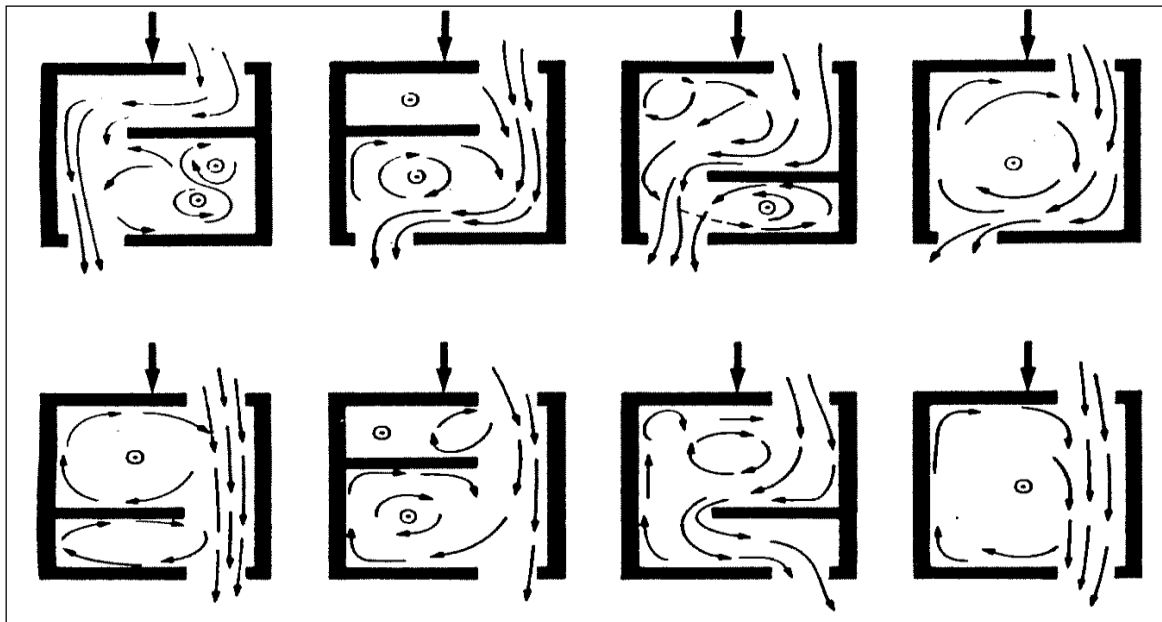


Figure 24 : Influence de la répartition des cloisons (Design Manual 11.02, 1986)

IV.3.2. Utilisation des déflecteurs

Les déflecteurs servent à accroître les zones de surpression en amont, afin d'augmenter la vitesse et le débit d'air entrant. Ainsi, un déflecteur vertical positionné subtilement à côté d'une ouverture face au vent augmente la zone de suppression, et par conséquent le débit et la vitesse d'air entrant par cette ouverture, une solution qui peut s'avérer efficace pour les locaux profonds. Une avancée peut faire office de déflecteur horizontal, et détourner ainsi la trajectoire du flux vers le haut.

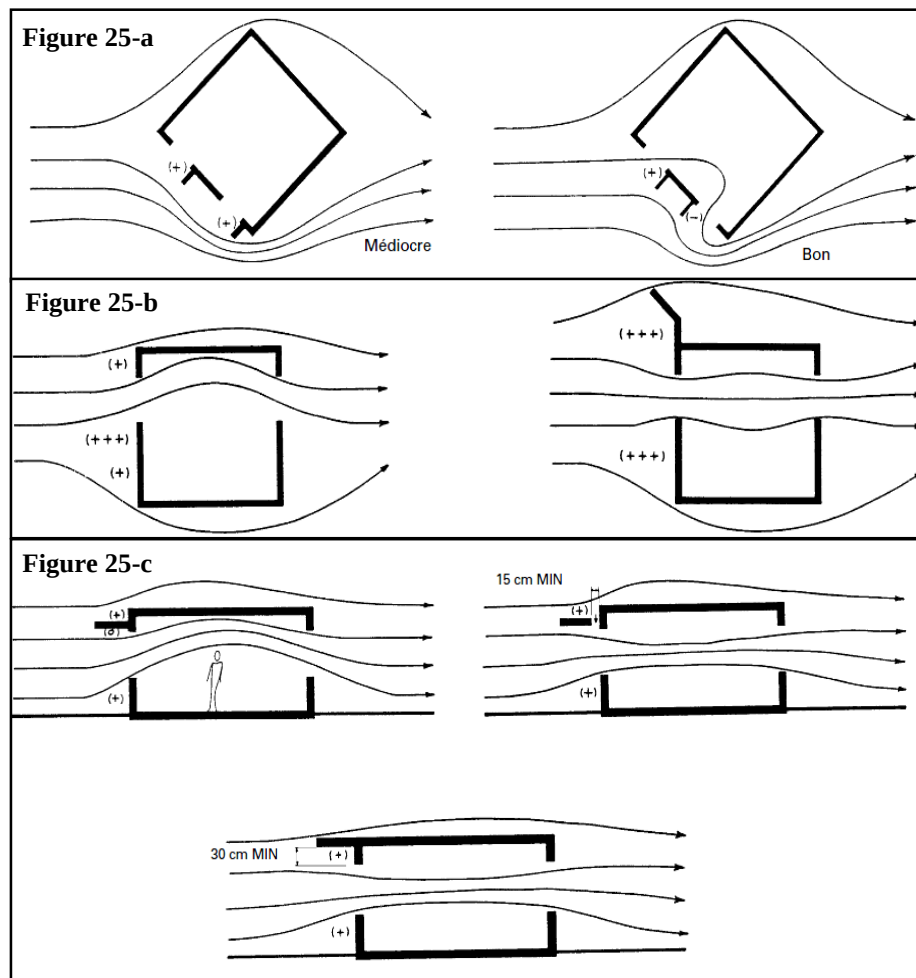


Figure 25: Influence des déflecteurs sur les flux d'air (Pacer, 1996)

- La figure 25-a montre qu'un positionnement réfléchi de déflecteurs verticaux (avancées verticales) peut engendrer des zones de surpression et de dépression de telle sorte à renforcer considérablement l'écoulement d'air à travers des ouvertures qui se trouve sur la même façade (ventilation mono latérale).

- Dans la figure 25-b, on voit bien que le décalage d'une ouverture engendre un déséquilibre dans la zone de suppression ce qui peut diriger une grande partie de l'écoulement dans un seul côté. L'ajout d'un déflecteur permet de recentrer le flux d'air ; et par conséquent d'augmenter la ventilation.

- La présence d'un déflecteur horizontal plein (une avancée au-dessus d'une ouverture) dévie l'écoulement d'air vers le haut à l'intérieur de l'espace. Une fente ou un décalage redirige le flux vers le centre et le maintien horizontal (figure 25-c).

Ainsi, nous avons vu que l'emplacement et le dimensionnement des ouvertures ainsi que le positionnement des cloisons et des déflecteurs sont des paramètres cruciaux dans la ventilation naturelle d'un bâtiment, configurés d'une manière étudiée, ils peuvent être des solutions passives pour nous architectes, afin de contrôler et de rediriger les flux d'air pour un balayage optimal de l'espace.

IV.3.3. Plan de pression neutre et effet de tirage thermique

Lorsque le vent est très faible, la répartition des flux d'air (entrants et sortants) et de la pression de l'air à l'intérieur d'un bâtiment dépend essentiellement de la hauteur du "plan de pression neutre" (PPN), un paramètre primordial pour la compréhension de l'effet cheminée.

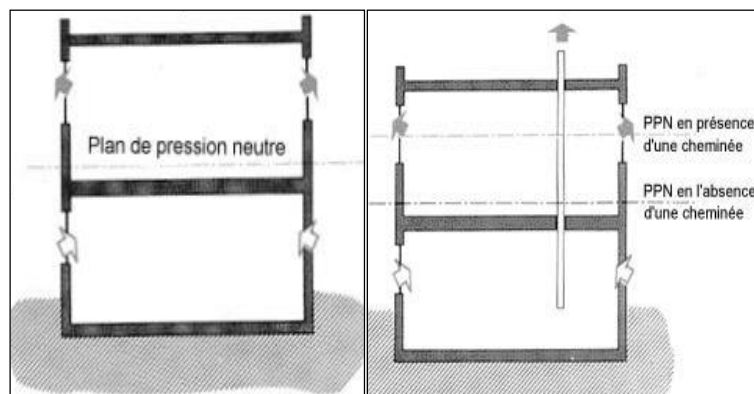


Figure 26: Plan de pression neutre Source : <http://energie.wallonie.be>

Le plan de pression neutre d'un bâtiment correspond à la hauteur à laquelle la pression à l'intérieur est égale à celle de l'extérieur du bâtiment, sous un vent très faible. Au-dessous du PPN, l'écart de pression fait pénétrer l'air dans le bâtiment (**dépression**) ; au-dessus, il l'expulse au dehors (**surpression**) [Source : <http://energie.wallonie.be>].

Autrement-dit, plus l'emplacement du PPN est haut, plus la partie de l'enveloppe où s'exercent les pressions causant les extractions d'air sont réduites. L'évacuation d'air par une cheminée peut combler l'écart qui existe entre les infiltrations et les extractions d'air se faisant par les autres ouvertures de l'enveloppe du bâtiment.

Relation entre le PPN et l'effet cheminée

La différence totale de pression agissant sur un bâtiment est tributaire de l'effet cheminée, qui dépend exclusivement de la hauteur du bâtiment et de l'écart entre les températures intérieures et extérieures ; ainsi, plus le plan de pression neutre n'est haut plus la zone succion due à l'effet cheminée est importante et plus il est bas plus la zone d'extraction est importante.

Si la surface globale des ouvertures en partie haute est plus importante (sortie d'air) que celle en partie basse (entrée d'air), le PPN se déplace systématiquement vers le haut (**Figure 27**).

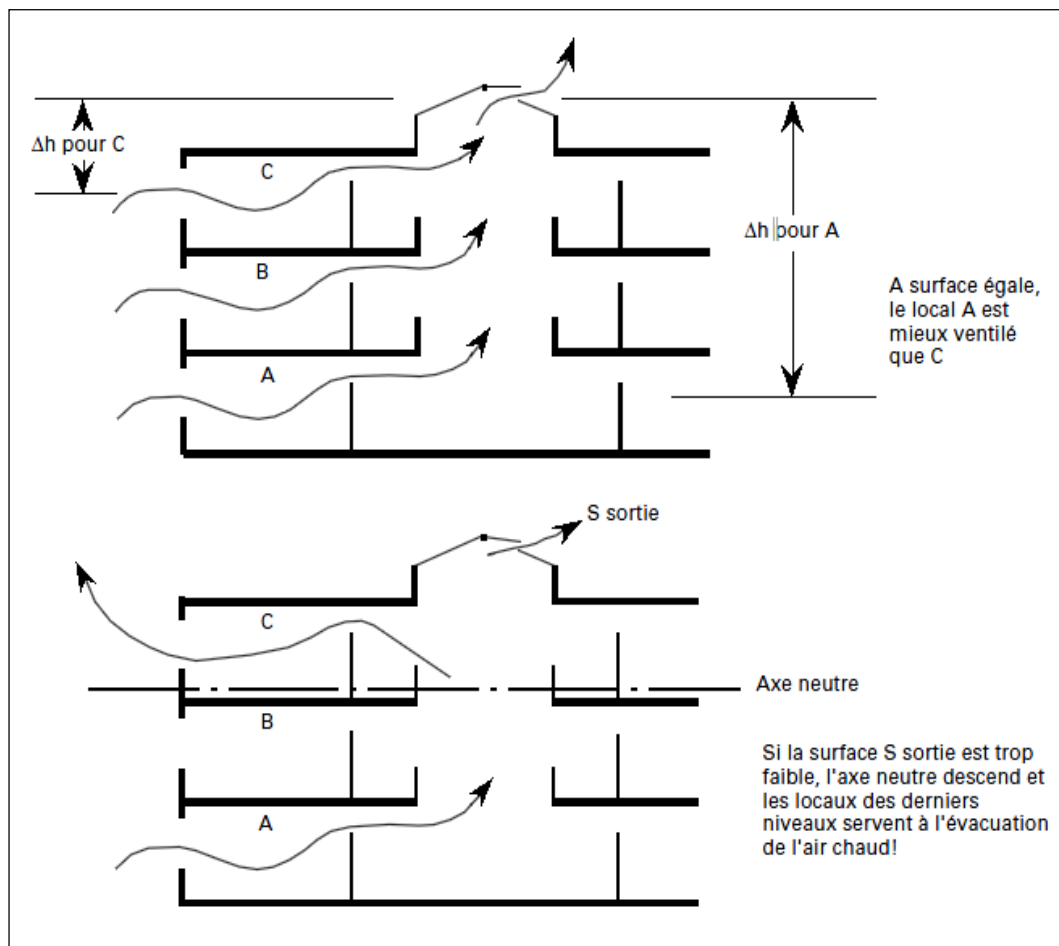


Figure 27: relation entre effet cheminée et PPN (Pacer, 1996)

En fonction de la hauteur du bâtiment, de sa relation avec l'air extérieur et de la présence d'un atrium ou d'une cage d'escalier ouverte sur les différents niveaux, le profil de l'écoulement d'air ainsi que sa direction changent selon la position du plan de pression neutre.

Dans notre travail de recherche, nous portons un intérêt particulier sur la cage d'escalier, et la **Figure 28** montre bien que celle-ci peut influencer la répartition verticale des pressions à l'intérieur d'un bâtiment, du fait de sa configuration spatiale qui permet de relier les volumes d'air des différents étages, ce qui a un impact direct sur la position du PPN, et par conséquent sur la direction et la position des flux d'air. Le Plan de pression neutre est un paramètre très important dans l'élaboration d'une stratégie de ventilation naturelle.

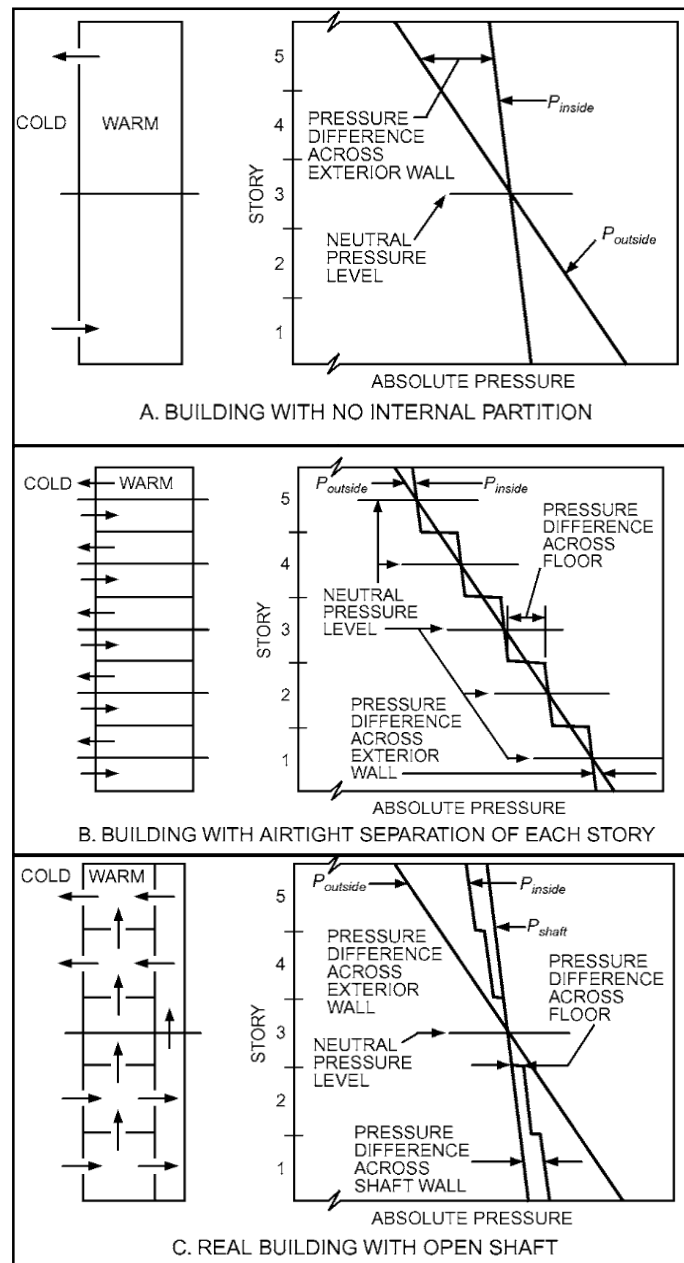


Figure 28: Effet cheminée suivant l'organisation intérieure du bâtiment et PPN (ASHRAE, 2009)

Conclusion

Dans cette partie, nous avons résumé les principaux phénomènes naturels qui permettent à l'air de se déplacer autour et à l'intérieur du bâtiment. Ce qui nous a permis de constater que le mouvement de l'air dans les espaces intérieurs est tributaire d'une multitude de paramètres qui se chevauchent et s'interfèrent dans l'environnement intérieur et extérieur du bâtiment.

Nous pouvons synthétiser ces paramètres suivant leur nature en trois groupes :

- **Le contexte microclimatique** : qui regroupe tous les paramètres liés à l'environnement physique du bâtiment (vents, topographie, végétation...).
- **Les effets aérodynamiques** : intimement liés à la morphologie du terrain (topographie), la forme du bâtiment et sa position par rapport aux autres éléments environnants (plan de masse, organisation des bâtiments...).
- **Les effets aérauliques** : englobent tous les paramètres relatifs à l'architecture intérieure de l'édifice (organisation et nature des interrelations entre les espaces intérieurs, topologie du bâtiment...).

La compréhension et l'analyse de ses paramètres sont primordiales pour bien élaborer une stratégie de ventilation naturelle efficace. De ce fait, l'architecte doit comprendre les différentes interactions qui existent entre un bâtiment et l'air qui l'entoure avant d'entamer la conception de son projet.

A travers cette partie, nous avons tiré quelques enseignements, pour nous architectes, afin d'optimiser une stratégie de ventilation naturelle à savoir :

- Appréhender les phénomènes aérodynamiques générés par la forme du bâtiment et son environnement.
- Connaître le sens de l'écoulement d'air à l'intérieur de l'édifice (la direction du vent dominant peut-être un premier indicateur).

- Comprendre la répartition des champs de pression autour et à l'intérieur de l'édifice (plan de pression neutre).
- Répartir les ouvertures de manière à avoir, si cela est possible, une section totale de sorties d'air plus importante que celle des entrées, afin d'augmenter les débits et la vitesse d'air entrant.
- Éviter les ouvertures en "fente" ainsi que les nombreuses petites ouvertures (claustras, persiennes...) et opter beaucoup plus pour des sections plus ou moins "carrées" ; dans le cas où on cherche à minimiser les pertes de charge (théorème de Bernoulli).

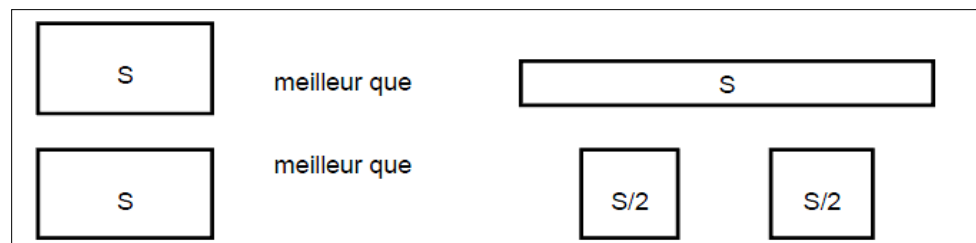


Figure 29: Influence de la section des ouvertures (Chatelet, et al., 1998)

- Établir de vastes circulations intérieures (espaces de transition) comme les **cages d'escalier** et les paliers de distribution, utiles en particulier à la **ventilation thermosiphon**⁶ (Chatelet, et al., 1998), p. 98.
- Opter, lorsqu'ils sont prévus, pour des gaines, canaux et cheminées de grandes sections de forme "carrée" ou "circulaire", car ça permet d'augmenter la zone de dépression et d'avoir plus de débits d'air entrant (renouvellement d'air optimal).

⁶ Cette recommandation s'inscrit dans l'objet de notre recherche à savoir l'intérêt que nous portons sur la cage d'escalier n tant qu'espace de transition pouvant jouer un rôle important dans la ventilation naturelle des édifices.

Chapitre II : **La ventilation naturelle dans l'habitat collectif**

Après avoir exposé dans le chapitre I, les différents mécanismes naturels thermo-aérauliques qui favorisent la ventilation naturelle dans un édifice d'une manière générale, nous allons nous pencher, dans ce chapitre, sur les dispositifs de ventilation naturelle dans le cas spécifique de l'habitat collectif.

Dans un premier temps, nous avons résumé les principaux enjeux de la ventilation naturelle ainsi que les différents systèmes de ventilation existants et leurs composants. Ensuite une analyse du fonctionnement de quelques dispositifs de ventilation naturelle dans l'architecture traditionnelle est effectuée, dans le but d'en tirer des enseignements. Puis nous présentons des exemples de systèmes de ventilation naturelle appliqués à des bâtiments d'habitation collectifs de référence.

V. Les enjeux de la ventilation naturelle

L'optimisation d'une stratégie de ventilation dans un bâtiment implique la résolution d'une problématique à plusieurs paramètres, dont les enjeux s'opposent parfois dans la pratique. Le volume, le débit et la vitesse de l'air à extraire ou/et à introduire sont tributaires de trois enjeux principaux : sanitaire, confort thermique, et efficacité énergétique. Le défi des concepteurs en l'occurrence les architectes est de concilier entre ces trois objectifs.

V.1. Qualité de l'air : un enjeu sanitaire

La garantie d'une qualité d'air à l'intérieur des espaces habitables est indéniablement l'objectif prioritaire d'un système de ventilation, car un logement est le siège de diverses sources de polluants dont font partie les habitants eux-mêmes. À cet effet, l'air intérieur doit être renouvelé constamment afin d'évacuer ces polluants tout en réduisant au minimum leurs sources. Depuis quelques années plusieurs études sont menées autour de la question de la qualité de l'air à l'intérieur des habitations, et le lien qui existe entre la prolifération de certaines maladies respiratoires et l'exposition à des polluants. A l'instar de l'enquête menée par Zock et collaborateurs, qui met en évidence, selon les auteurs, une association homogène dans plusieurs pays entre l'exposition aux moisissures, l'asthme et l'hyperréactivité bronchique chez les adultes. (Zock, et al., 2002)⁷. L'organisation mondiale de la santé a publié plusieurs statistiques⁸ qui illustrent l'importance de la qualité de l'air intérieur, ainsi selon cette organisation :

- Près de 50 % des décès par pneumonie chez les enfants de moins de 5 ans sont dus aux particules en suspension inhalées à cause de la pollution de l'air à l'intérieur des habitations.
- Près de 2 millions de personnes meurent prématurément de maladies dues à la pollution de l'air à l'intérieur des habitations provenant des combustibles ménagers solides.

⁷ L' "Enquête européenne sur la santé respiratoire : caractéristiques des logements, exposition aux moisissures et asthme ", menée par Zock et collaborateurs, consiste en une étude d'envergure basée sur un échantillon représentatif de jeunes adultes provenant de plusieurs pays européens et non-européens.

⁸ Ces chiffres sont publiés dans l' "Aide-mémoire n° 292 ", septembre 2011, sur le site officiel de l'organisation OMS (<http://www.who.int/fr/>).

V.1.1. Les principaux polluants

L'intérieur des logements est le siège d'une multitude de polluants de sources et de natures divers, et sous l'effet de certains polluants (les oxydes d'azote, certains composés organiques volatils, le monoxyde et le dioxyde de carbone) l'air intérieur peut s'avérer plus pollué que celui de l'extérieur, constituant ainsi l'origine de certaines maladies respiratoires.

Selon leur nature, les polluants à l'intérieur d'une habitation peuvent être **chimiques** (les composés organiques volatils (solvants...), le monoxyde et le dioxyde de carbone...), **microbiologiques** (bactérie, moisissure, acariens, agents allergènes...) et **Polluants physiques** (vapeur d'eau, particules fines, fibres synthétiques, Radon)⁹.

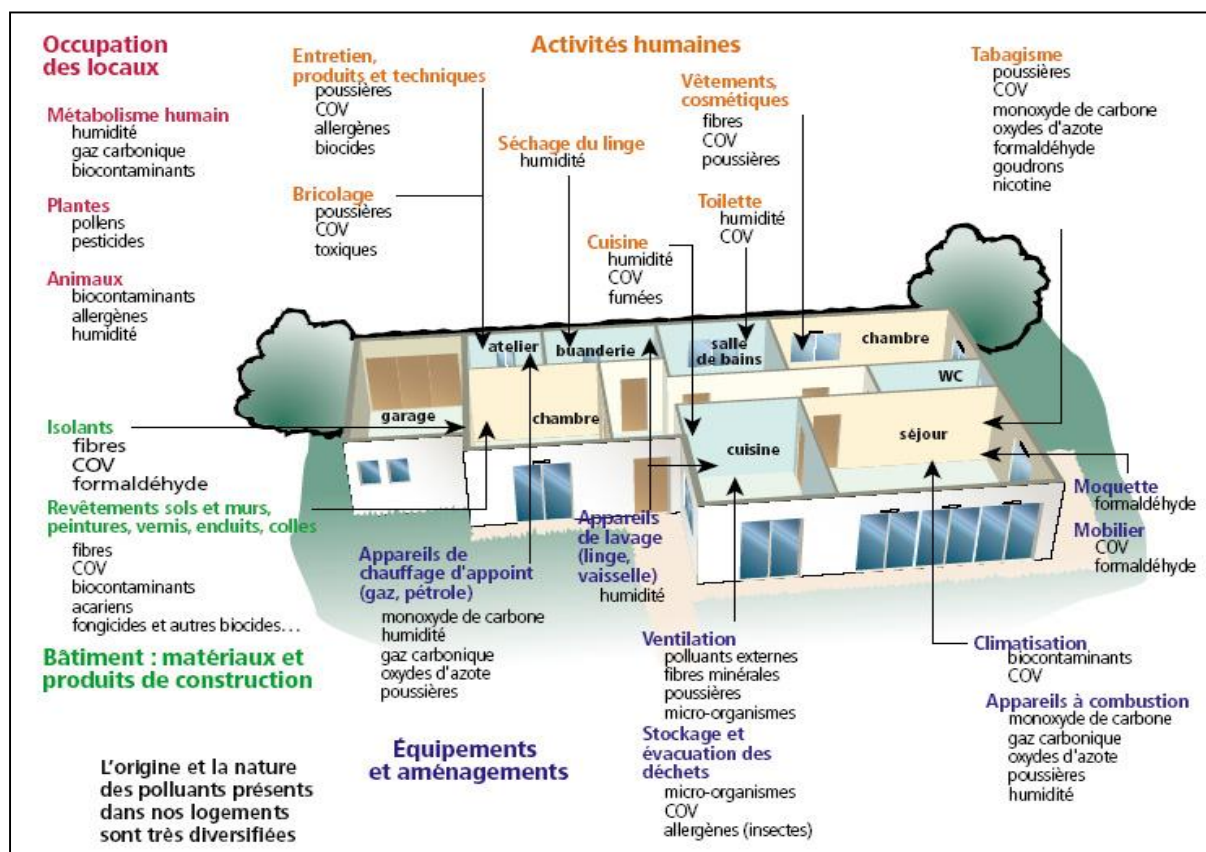


Figure 30: La pollution de l'air à l'intérieur des bâtiments résidentiel (AVEMS, 2010)

⁹ D'après les statistiques de l'OMS, plus d'un million de personnes par an meurent de broncho-pneumopathie chronique obstructive (BPCO) apparaissant à la suite de l'exposition la pollution de l'air à l'intérieur des habitations. (<http://www.who.int/fr/>).

V.1.2. Les taux de renouvellement d'air

Il existe plusieurs références dans le monde en termes de normes relatives à la ventilation des logements, et plus particulièrement aux taux de renouvellement d'air (extraction et admission), qui est la priorité principale des textes de loi qui régissent la ventilation des édifices de par le monde. Mais ces dernières années, avec les enjeux de l'efficacité énergétique et de la durabilité, de nouveaux paramètres sont pris en considération. Ainsi, chaque pays adapte ces normes à son contexte (économique, politique...). Nous allons survoler succinctement quelques lois qui constituent des références en la matière.

-la réglementation française

La réglementation française a connu plusieurs évolutions à travers le temps depuis l'arrêté de 1964¹⁰, mais l'arrêté du 24 mars 1982¹¹ reste toutefois la référence en termes de ventilation dans les logements en France et introduit la notion de débit d'extraction selon le nombre de pièces, dont l'article 01 stipule que :

- L'aération des logements doit pouvoir être générale et permanente au moins pendant la période où la température extérieure oblige à maintenir les fenêtres fermées.
- La circulation de l'air doit pouvoir se faire principalement par entrée d'air dans les pièces principales et sortie dans les pièces de service.
- L'air doit pouvoir circuler librement des pièces principales vers les pièces de service : le système de ventilation doit respecter le principe du balayage de l'air.

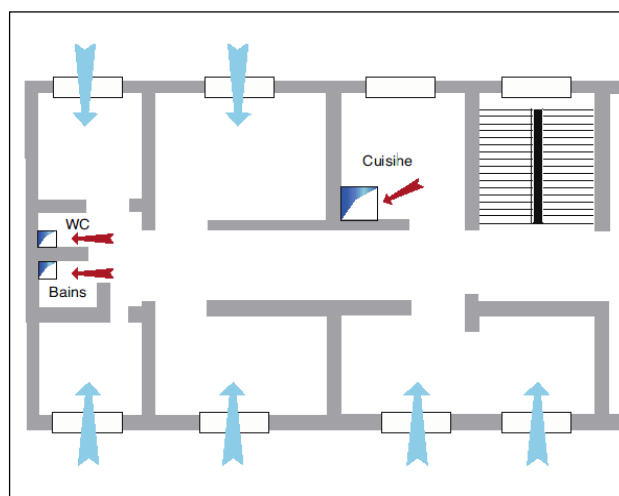


Figure 31: la ventilation naturelle d'un logement (AVEMS, 2010)

¹⁰ Arrêté du 22 octobre 1969 - La ventilation devient générale et permanente avec circulation des pièces principales vers les pièces de services. (<http://www.legifrance.gouv.fr/>)

¹¹ Arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements modifié par Arrêté du 28 octobre 1983 qui intègre le dispositif mécanique de ventilation. (<http://www.legifrance.gouv.fr/>)

Suivant le chapitre 1, Art 03 les débits à extraire dans chaque pièce de service doivent pouvoir atteindre, simultanément ou non, les valeurs données dans le tableau ci-après en fonction du nombre de pièces principales du logement :

DEBITS EXTRAITS EXPRIMES en m ³ /h					
Nombre de pièces principales du logement	Cuisine	Salle de bains ou de douches commune ou non avec cabinets d'aisances	Autre salle d'eau	Cabinet d'aisance	
				Unique	Multiple
1	75	15	15	15	15
2	90	15	15	15	15
3	105	30	15	15	15
4	120	30	15	30	15
5 et plus	135	30	15	30	15

Figure 32: Taux de renouvellement d'air (m³/h) en logement. Source : <http://www.legifrance.gouv.fr/>

-Contexte international

La réglementation en vigueur en France fortement marquée par la préoccupation d'économie d'énergie a conduit à des débits de renouvellement d'air bien inférieurs à ceux qui sont fixés dans d'autres pays comparables. Par ailleurs, ces exigences sont traditionnellement fondées sur la seule occupation des locaux et les pollutions liées à cette occupation.

L'évolution de l'ASHRAE (62.2 P) est significative quant à la prise en compte renforcée des pollutions liées au bâti. En logement, elle préconise, en effet, un double calcul du taux de renouvellement (n).

$$n \text{ (m}^3\text{/h)} = 27 \times \text{nombre de personnes} + 0,36 \times \text{surface du logement (ARENE, 2012)}$$

Sur cette base, on constate que le taux de renouvellement d'air est plus grand pour les grands logements que pour les petits.

France		GB		USA		Belgique	
RSDT 78		CIBSE		ASHRAE		NBN D50 001	
T1	T5	T1	T5	T1	T5	T1	T5
0,55	0,45	1	0,5	0,45	0,8	1,4	0,9

Figure 33: Taux de renouvellement d'air (vol/h) en logement (ARENE, 2012)

-Contexte algérien

En Algérie, la seule référence normative en matière de ventilation naturelle dans les logements est le document technique réglementaire **DTR C3.31** intitulé " **la ventilation naturelle dans les locaux à usage d'habitation** ". Il s'inscrit dans la mise en application de la **loi 99-09** du 28 juillet, relative à la maîtrise d'énergie dans le secteur du bâtiment concrétisée par la promulgation le 24 avril 2000 d'un décret exécutif **n°2000-90** portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs.

Ce **DTR** s'inscrit dans une série de trois DTR¹² qui ont été élaborés par le Centre National de la Recherche de l'Industrie du Bâtiment (**CNERIB**) dans le but d'offrir aux professionnels du bâtiment, notamment les architectes, des guides pour approcher les objectifs de l'efficacité énergétiques dans le bâtiment en Algérie.

Le **DTR C3.31** n'est destiné qu'aux constructions à usage d'habitation et a pour objet :

- Fournir les principes généraux à adopter lors de la conception des installations de ventilation naturelle.
- Fixer les méthodes de calcul permettant le dimensionnement de ces installations.
- Son contenu ne concerne pas les conduits de fumée d'évacuation des produits de combustion des appareils à gaz ainsi que les systèmes de désenfumages.

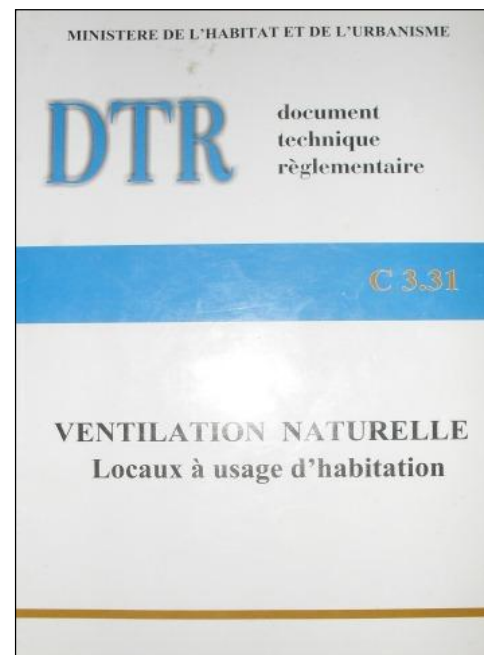


Figure 34: DTR C3.31 (Source : auteur)

¹² En plus du **DTR 3.31** Le **CNERIB** a élaboré deux autres DTR : -Le **DTR C 3-2** qui établit les règles de calcul des déperditions calorifiques d'hiver pour les bâtiments à usage d'habitation. -Le **DTR C 3-4** relatifs aux règles de calcul des apports calorifiques d'été pour les bâtiments à usage d'habitation. Dans les 3 DTR, il existe des normes liées d'une manière directe ou indirecte avec la ventilation naturelle dans les logements.

À l'image de l'arrêté du 24 mars 1982 en France, le **DTR C3.31** fixe les débits d'air à extraire de chaque espace de services suivant le nombre des pièces, et nous relevons une similitude entre les chiffres donnés par les deux textes réglementaires. L'influence du modèle français dans le calcul des débits est très apparente dans le DTR C3.31, et cela malgré la présence de spécificités climatiques propre à l'Algérie telles que celles du climat semi-aride.

Débits extraits exprimés en m ³ /h				
Nombre de pièces principales du logement	Cuisine	Salle de bains ou de douches commune ou non avec cabinets d'aisances	Autre salle d'eau	Cabinet
				Unique
1	75	15	15	15
2	90	15	15	15
3	105	30	15	15
4	120	30	15	30
5 et plus	135	30	15	30

Figure 35: Taux de renouvellement d'air (m³/h) en logement (CNERIB, 2006)

Dans les caractéristiques générales du système de ventilation énoncées dans ce DTR, il est recommandé que :

- La ventilation doit pouvoir être permanente au moins pendant la période où la température extérieure oblige à maintenir les ouvrants fermés.
- Elle doit être :
 1. Générale, le même air doit pouvoir servir à ventiler successivement plusieurs pièces contiguës, ou séparées seulement par des circulations¹³.
 2. Réduites en cas de nécessité (non-occupation des pièces par exemple).

¹³ Dans cette première caractéristique relevée du DTR 3.31, nous appréhendons le mot circulation par tous les espaces de transitions qu'ils soient horizontaux (couloire, vestibules...) ou verticaux (cage d'escalier, atrium...) que nous allons développer un peu plus loin dans ce chapitre.

V.2. Un enjeu de confort thermique

Le confort est un paramètre qui ne peut pas être quantifié directement, mais peut être apprécié à travers des indicateurs liés aux caractéristiques physiques de l'air ambiant dans une pièce d'habitation, et ce en fixant des seuils qui assurent un certain confort physiologique de l'homme.

Ainsi, le confort thermique dépend principalement de la combinaison de plusieurs paramètres dynamiques : de l'humidité relative, de la qualité de l'air, de la vitesse et de la température de l'air ambiant et de la température de surfaces internes des parois.

V.2.1. Vitesse de l'air et confort thermique

L'expérience a montré que le mouvement de l'air, que ce soit un vent naturel ou généré par un ventilateur, a un impact direct sur le taux de refroidissement, celui-ci est proportionnel à la vitesse de l'air, car elle accélère les échanges de chaleur par convection et augmente l'évaporation à la surface de la peau.

Dans différentes conditions, chaque plage de vitesses de l'air correspond à une réaction subjective de la part de l'homme (Szokolay, et al., 1997) :

- **0,25 m/s** inaperçu ;
- **0,25-0,50** agréable ;
- **0,50 à 1,00** circulation d'air ressentie ;
- **1,00 à 1,50** courants d'air ;
- **1,50** courant d'air désagréable.

Toutefois, ces réactions dépendent de la température de l'air ainsi que du niveau d'activité (taux du métabolisme **MET**) et de l'habillement (coefficient **CLO**).

La **figure 36** illustre la position de la zone de confort en fonction de la vitesse de l'air, de la température ambiante et du coefficient **CLO** avec un niveau d'activité fixé à **MET= 80 W/m²** (Szucs, et al., 2007)¹⁴.

Ainsi, on remarque qu'à une température avoisinante les **29°C** et avec un **CLO** de l'ordre de **0.1**, une vitesse de l'air de **3m/s** peut s'avérer agréable, car elle accélère le rafraîchissement ce qui compense l'inconfort lié à cette température quand la vitesse de l'air est faible (**> 1m/s**).

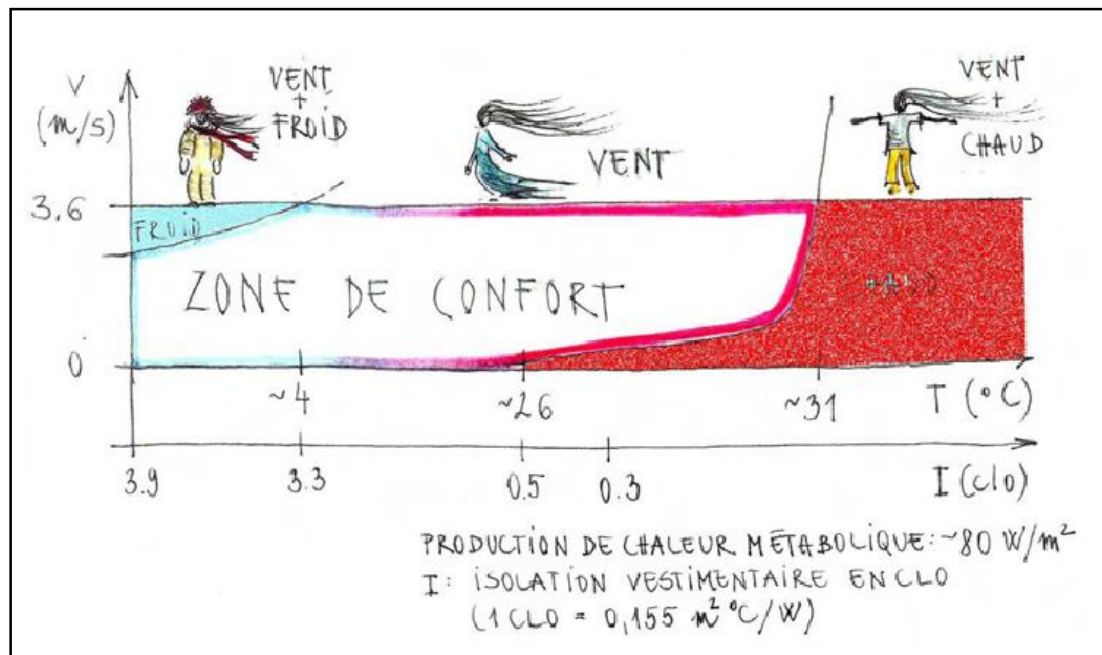


Figure 36: Zone de confort en fonction de la vitesse de l'air et de la température coefficient CLO (Szucs, et al., 2007)

Cependant, hormis l'inconfort thermique, il faut prendre en considération les gênes mécaniques qui sont liées au type d'activité, ainsi une vitesse de l'air qui dépasse les 1,5m/s peut soulever des feuilles dans des espaces de bureaux, par conséquent la notion du confort aérothermique est complexe, et implique divers paramètres variables.

¹⁴ Ce diagramme est extrait du cahier 3605 du CSTB relative à la conception des stades, réalisé par AGOTA SZUCS et SOFIE MOREAU.

V.2.2. Influence de la Vitesse de l'air sur la zone confort thermique

Aucun mouvement d'air minimum n'est nécessaire pour assurer le confort thermique lorsque les températures se situent dans la zone de confort. La température opératoire peut, par contre, être augmentée jusqu'à 3 °C au-dessus de la zone de confort si la vitesse de l'air est accrue au-dessus de 0,2 m/s, cette dernière ne devrait pas excéder 0,8 m/s. Il est préférable que la vitesse et la direction de l'air soient contrôlées par l'occupant (Allard, 1998).

La *figure 36* montre que plus la vitesse de l'air est importante, plus la limite supérieure de la courbe d'iso-confort augmente vers des températures plus importantes, autrement dit, elle aide l'occupant à accepter un couplage Température d'air /Températures de surfaces plus élevé.

Plus la vitesse d'air augmente, plus les températures supportées augmentent. Il faut cependant observer que ce phénomène s'interrompt à 32°C pour la température d'air et à 30°C pour les températures de surfaces. Au-delà de ces températures, le soufflage d'air a d'abord un effet neutre puis aggrave la sensation d'inconfort (« **effet de sèche-cheveux** ») (Izard, 2006).

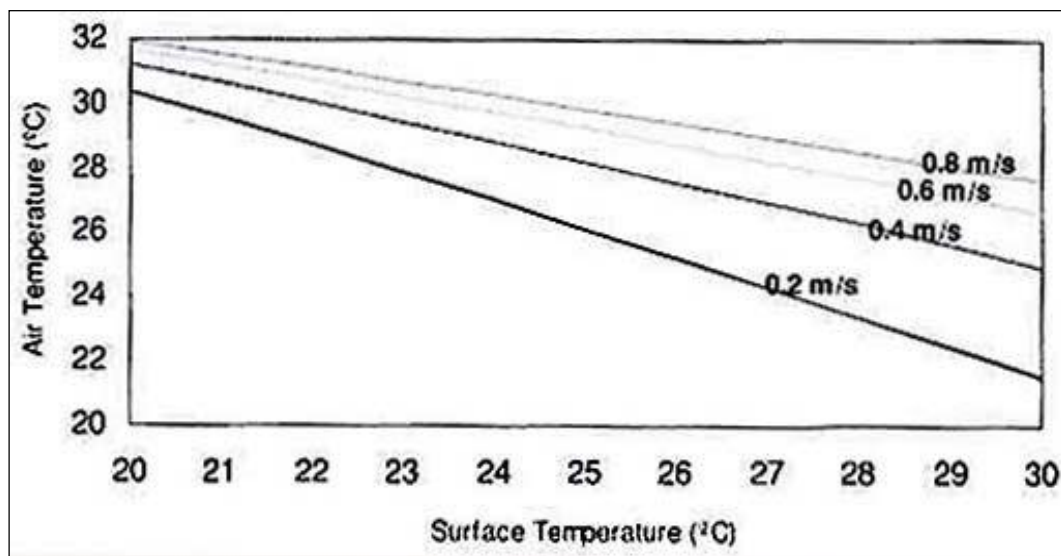


Figure 37: Courbes d'iso-confort thermique pour trois vitesses d'air intérieures en fonction de la température d'air et de la température de surface (Allard, 1998)

V.3. Enjeu énergétique : ventilation naturelle ou ventilation mécanique ?

La maîtrise de l'énergie est un enjeu majeur de la ventilation. Pour y répondre, il faut limiter au maximum les déperditions énergétiques tout en assurant le confort des habitants, et ce sans oublier de garantir la qualité de l'air intérieur. La ventilation représente 20 % à 50 % des déperditions énergétiques de nos bâtiments (AVEMS, 2010), et ce ratio croît avec l'augmentation de l'isolation thermique. Il est donc important d'adapter, au mieux, la ventilation afin d'avoir un équilibre entre la qualité d'air intérieur et les déperditions énergétiques.

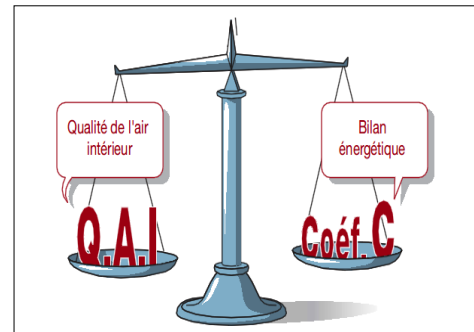


Figure 38: point d'équilibre (AVEMS, 2010)

V.3.1. Stratégie de ventilation naturelle

La ventilation naturelle est en train de devenir une stratégie de conception de plus en plus recherchée, car elle permet de faire des économies considérables sur les coûts d'études, de construction et d'exploitation d'un bâtiment, tout en offrant plus de libertés aux occupants dans la maîtrise des ambiances intérieures (par le contrôle des fenêtres). Une stratégie de ventilation naturelle, qui se veut efficace, doit être réfléchie dès les premiers stades de conception par une équipe pluridisciplinaire afin de concilier entre les trois principaux enjeux de la ventilation à savoir :

- **Santé** : maintenir la qualité de l'air à l'intérieur des espaces en assurant un taux de renouvellement d'air suffisants durant toutes les saisons.
- **Confort** : contribuer au confort des habitants (thermique, olfactif,...).
- **Efficacité énergétique** : minimiser les déperditions thermiques tout en assurant une ventilation efficace.

V.3.2. Efficacité énergétique d'une stratégie de ventilation naturelle

Plusieurs études (Baker, et al., 2000) attestent, en l'occurrence aux États-Unis (où la consommation énergétique dans le bâtiment représente environ 40% de la consommation totale), qu'un bâtiment avec des systèmes de ventilation naturelle consomme beaucoup moins d'énergie qu'un bâtiment totalement ventilé mécaniquement (*Figure 39*)¹⁵. Cette économie d'énergie est due, en grande partie, au fait que la ventilation naturelle ne nécessite pas le recours à des appareils énergivores pour déplacer l'air, qui sont remplacés par les forces de la nature.

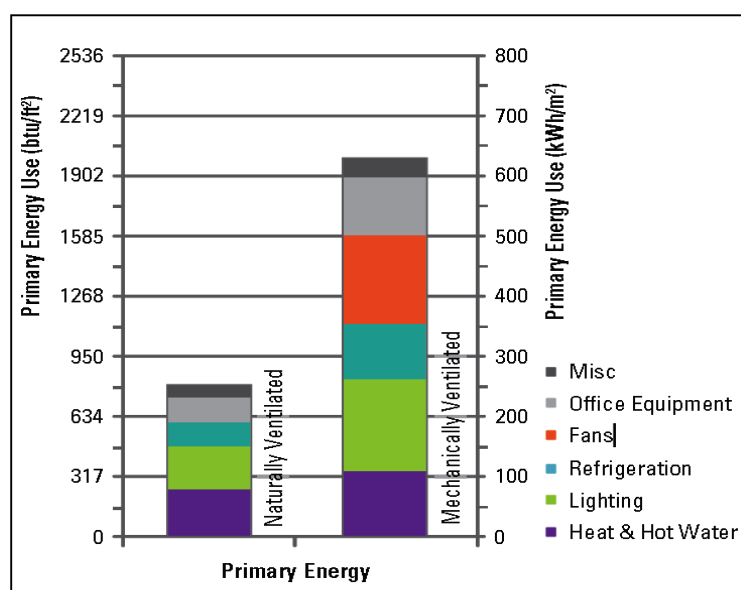


Figure 39 : Comparaison entre la consommation d'énergie (Baker, et al., 2000)

-Réduction du coût global de construction et d'exploitation du bâtiment

Un bâtiment qui fonctionne avec une ventilation naturelle est beaucoup moins cher que s'il est ventilé mécaniquement (*Figure 40*). Des économies significatives sont faites d'une part, sur le coût de l'étude, de la fourniture et de l'installation du système de ventilation mécanique (étude aéraulique, mise en œuvre...) et d'autre part, sur les coûts de son entretien qui nécessite un personnel qualifié en raison sa complexité. Toutes ces économies permettent de compenser largement les coûts supplémentaires dans l'amélioration de l'étanchéité de l'enveloppe (calfeutrage des fenêtres, isolation des parois et des toitures...).

¹⁵ Baker et Steemers ont évalué l'énergie consommée par des bâtiments de bureaux et ont constaté que ceux climatisés et ventilés mécaniquement consomment environ deux fois plus que ceux ventilés naturellement.

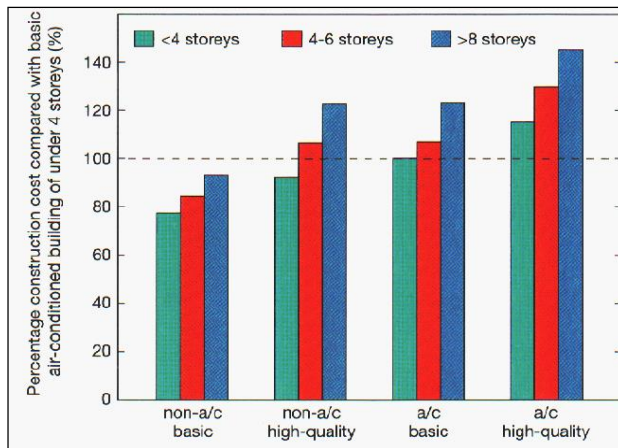


Figure 40 : Comparaison entre les coûts de construction (CIBSE, 2005)

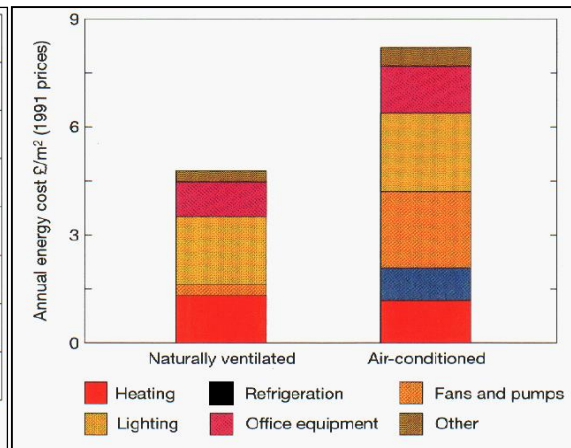


Figure 41 : Comparaison entre les coûts énergétiques (CIBSE, 2005)

-Confort adaptatif et comportement des occupants

La ventilation naturelle est appropriée au modèle de confort adaptatif, les occupants deviennent de plus en plus tolérants à la fluctuation des températures, ce qui élargit la zone de confort, permettant ainsi de réduire le coût énergétique des appareils de climatisation et de chauffage. Ajouter à cela, des études ont démontré que le contrôle individuel de l'environnement intérieur d'un espace de travail (accroître le taux de ventilation locale par l'ouverture d'une fenêtre, l'usage des stores...) augmente la productivité de ses usagers (Figure 42).

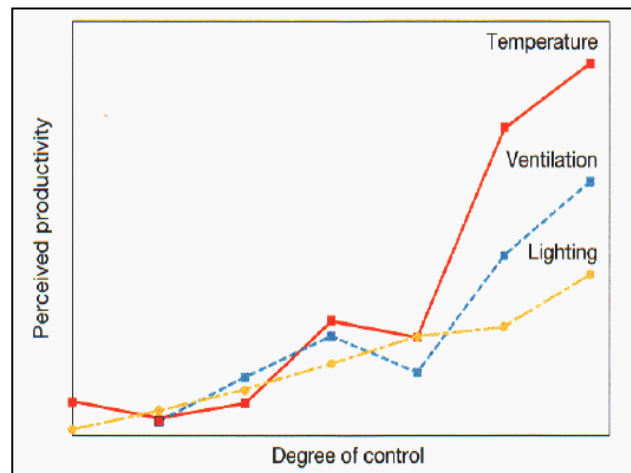


Figure 42 : Productivité en fonction du degré de control des usagers [CIBSE, 2005]

Le confort adaptatif est un modèle de confort thermique récent qui permet de déterminer les températures de confort dans un environnement où il y a des variations de température car les modèles classiques de confort thermique sont inadaptés pour décrire les situations transitoires. L'utilisation de modèles intégrant le confort adaptatif permet de réaliser des économies dans le chauffage ou la climatisation des bâtiments.

Ainsi, des recherches ont démontré que les occupants vivant en permanence dans des espaces conditionnés exigent d'avantage un bas niveau de consigne de température et une grande homogénéité à l'inverse les gens vivant dans des bâtiments naturellement ventilés pouvant contrôler leur environnement s'accoutume à une relative variabilité.

- Réduction de l'impact environnemental

Comparée à la VMC (Ventilation mécanique Contrôlée), la ventilation naturelle réduit considérablement l'impact environnemental du bâtiment, et ce en diminuant la consommation énergétique (notamment électrique) ce qui permet d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre, une contribution à la sauvegarde de la planète (réchauffement planétaire).

Ces bâtiments conçus d'une manière à tirer profit du climat afin d'assurer une ventilation naturelle optimale sont un bon investissement à long terme, tant sur le côté financier que sur le côté environnemental, et avec l'évolution des législations qui régissent la construction, ce type de conception sera un jour inévitable.

Dans le cas de l'Algérie, nous accusons un retard conséquent sur le plan de l'écoconstruction et de l'efficacité énergétique, toutefois. Cependant de nouvelles initiatives commencent à voir le jour à l'instar du programme de 600 logements à Haute Performance Energétique (**HPE**), baptisé "Eco-Bât" lancé par l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (**APRUE**) (Sami-Mécheri, et al., 2012), qui ouvre la porte à de nouveaux horizons pour le bâtiment en Algérie.

VI. Systèmes de ventilation dans l'habitat collectif

Nous avons vu que la ventilation des espaces d'habitation est plus que nécessaire, le choix du système de ventilation est très important et demande une étude minutieuse en amont du projet, car il existe une panoplie de possibilités pour planifier une stratégie de ventilation, et c'est aux concepteurs de trouver la solution la plus efficace en tenant compte des enjeux cités auparavant. Suivant le degré d'intervention d'appareils mécaniques dans la diffusion et le contrôle des flux d'air, on distingue trois principaux types de système de ventilation : ventilation naturelle, ventilation mécanique contrôlée, ventilation hybride.

VI.1. La ventilation mécanique

La ventilation mécanique consiste à recourir à des systèmes mécaniques pour apporter et/ou extraire des flux d'air de manière forcée ce qui nécessite une consommation d'énergie (principalement électrique).

VI.1.1. La VMC à simple extraction

Dans ce type de VMC, l'air frais entre de l'extérieur par les fenêtres et les ouvertures, traverse d'abord les pièces de séjour et les chambres, pour être ensuite évacué au niveau des pièces de service (cuisine, salle de bains, WC...) par des bouches d'extraction (elles peuvent être fixes, autoréglables, hygroréglables¹⁶), celles-ci sont connectées à des conduits qui sont reliés à un **caisson d'extraction** comportant un dispositif mécanique (*Figure 43*).

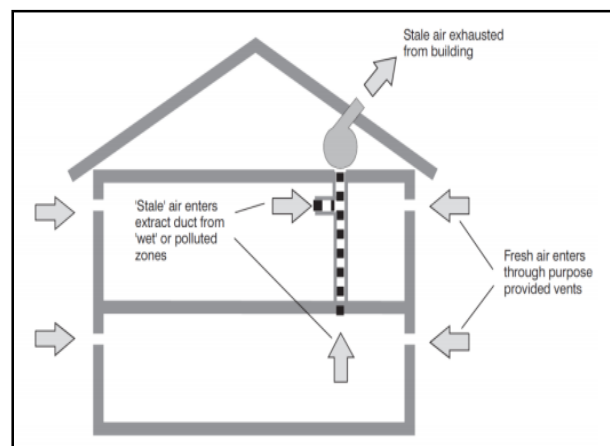


Figure 43 : Ventilation à simple extraction
(Russel, et al., 2005)

¹⁶ L'extraction autoréglable permet de garder les débits d'air extraits constants indépendamment des conditions extérieures, par contre l'extraction hygroréglable ajuste ces derniers suivant l'humidité de l'air intérieure, ce qui permet de réguler les taux d'humidité d'une manière plus économique.

Les bouches d'extraction placées dans les espaces de service, qui constituent la source principale d'humidité dans le logement, génèrent une dépression dans ces espaces ce qui permet de contrôler le sens des flux d'air à l'intérieur du logement durant toute l'année, et d'éviter le refoulement de l'air vicié vers les autres pièces.

Ainsi, ce système permet d'assurer une indépendance du débit de renouvellement d'air par rapport aux conditions extérieures (dépressurisation).

Dans les immeubles d'habitation collectifs, le dispositif d'extraction peut être placé directement à la source (dans chaque espace de service), ou central ; Comme il peut être par logement (*Figure 45*) ou collectif (*Figure 44*).

La VMC simple flux par extraction constitue le système de base de la réglementation en matière de ventilation des logements en France, par contre en Algérie l'extraction se fait d'une manière naturelle par des conduits verticaux. Car l'intégration d'une VMC à simple flux dans l'habitat collectif augmente le coût du logement, le recours à l'extraction naturelle permet de le maintenir accessible.

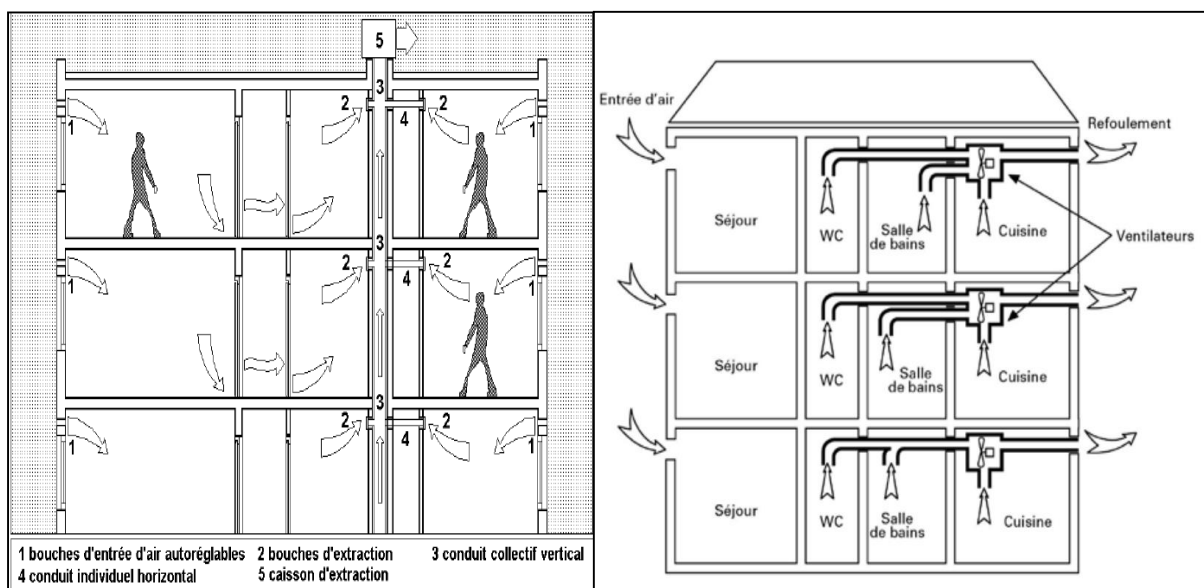


Figure 44: VMC simple flux avec extraction collective (Lopez Diaz, 2012)

Figure 45 : VMC simple flux avec extraction par logements (RAGE, 2013)

VI.1.2. Ventilation à simple alimentation

Dans le cas du système à simple alimentation, c'est l'entrée d'air qui se fait par un ventilateur de soufflage qui introduit localement de l'air extérieur dans l'habitation, ce qui génère une pression positive, ce qui favorise l'exfiltration d'air par les fentes et les ouvertures de l'enveloppe du bâtiment. Ce type de système convient bien dans les cas où il y a des polluants dans les murs extérieurs. Le maintien de la maison en surpression empêche l'infiltration dans les locaux habités de gaz ou de polluants provenant de l'enveloppe (Handegord, 1983).

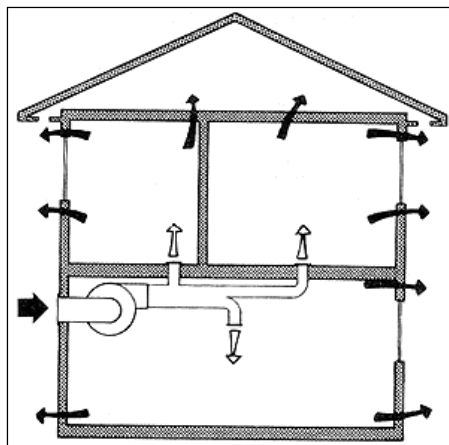


Figure 46 : VMC à simple alimentation (Handegord, 1983)

VI.1.3. La ventilation mécanique double flux

Ce système permet de limiter les déprédations de chaleur dues à la ventilation, car il récupère la chaleur de l'air vicié extrait de la maison et l'utilise pour réchauffer l'air neuf filtré venant de l'extérieur. Un ventilateur pulse cet air neuf préchauffé dans les pièces principales par le biais de bouches d'insufflation. Cet équipement est plus coûteux qu'une VMC simple-flux, mais il permet des économies de chauffage importantes en récupérant jusqu'à 70% (90% dans les systèmes haute performance disponibles sur le marché en France) de l'énergie contenue dans l'air vicié extrait et en profitant de la chaleur dégagée par la cuisson ou la toilette (ADEME, 2009).

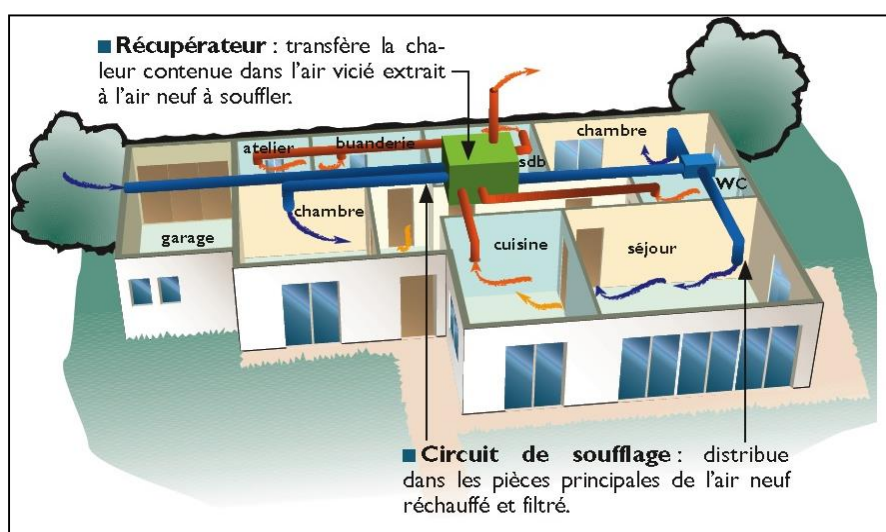


Figure 47 : VMC double flux [ADEME, 2009]

VI.2. La ventilation naturelle

Basée sur les moteurs naturels du déplacement d'air (différence de pression due au vent ou/et au tirage thermique, voir chapitre I), la ventilation naturelle induit une circulation d'air à l'intérieur du bâtiment sans l'intervention d'aucun dispositif mécanique. Celle-ci peut se faire à travers les ouvertures (fenêtres, portes, impostes...), les espaces de transition (hall, dégagement, cage d'escalier, atrium...), et des conduits verticaux¹⁷ (conduit shunt, individuel). Dans la littérature, il existe différentes stratégies de ventilation naturelle qui se basent sur un ou plusieurs éléments du bâtiment (façades, atrium, cheminée solaire...etc.), afin de générer et de contrôler les flux d'air nécessaires, pour assurer le confort et la qualité de l'air intérieur.

VI.2.1. La ventilation naturelle par ouverture des fenêtres

La possibilité de contrôler les ouvertures par l'occupant, et la facilité d'utilisation sont les avantages de ce mode de ventilation, mais dans ce cas, on ne peut pas contrôler les débits d'air renouvelé ainsi que la qualité d'air. A cet égard, il a été interdit par la réglementation française, à partir de 1969, dans les logements neufs. Selon la position des fenêtres et les possibilités d'ouverture et, ce système peut engendrer deux types de ventilation à savoir la ventilation traversante et la ventilation mono-latérale.

- La ventilation naturelle traversante

Ce type de ventilation fonctionne quand les ouvertures sont disposées sur des façades opposées, une du côté en surpression et l'autre du côté opposé, ce qui induit par la force du vent un mouvement d'air traversant entre les deux ouvertures assurant ainsi un balayage efficace de l'habitation, ce qui assure des débits et des vitesses d'air importantes.

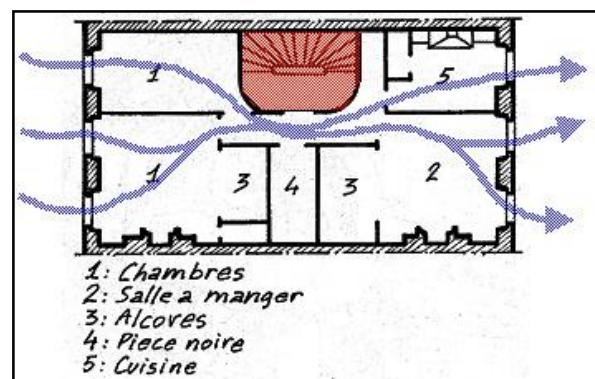


Figure 48: Ventilation traversante Le "3 fenêtre marseillais" Bâti ancien à Marseille (Izard, 2006)

¹⁷ Dans notre approche de la cage d'escalier est considérée comme un élément important dans une stratégie de ventilation naturelle, fonctionnant comme une sorte de conduit vertical qui peut diffuser les flux d'air dans un bâtiment. Ce point est développé dans le chapitre suivant.

Dans le cas des zones climatiques humides, ce mode de ventilation est plus que recommandé, car il permet un renouvellement d'air important, et surtout il génère des courants d'air qui permettent d'améliorer le rafraîchissement en été.

Cependant, ce type de ventilation est plus facile à intégrer dans les habitations individuelles du fait des possibilités d'exposition qu'offre ce type d'habitat (quatre façades ou au moins deux en cas de construction "en bande"). Par contre, dans les immeubles collectifs, c'est moins évident, car mettre en contact deux ouvertures opposées n'est pas toujours possible (Izard, 2006), parmi les cas les plus courants quand :

- L'ouverture n'est possible que sur une façade en raison de la réglementation relative au voisinage de propriétaires et suivant le plan d'occupation du sol (POS)¹⁸.
- Des logements peu profonds de petites surfaces (généralement de type F1, F2) qui ne permette pas d'ouvrir sur deux façades opposées.
- Dans les bâtiments, qui se développent en quatre logements par palier, ce qui réduit les possibilités d'ouvertures même dans le cas de deux façades opposées¹⁹

Parmi les solutions apportées dans ces cas, le recours à des coursives pour augmenter les possibilités d'ouvertures. Cette solution est décrite par J.L Izard (Izard, 2006) comme une tendance lourde de l'éco-architecture en matière de bâtiments pour habitations collectives, qui consiste à desservir les logements par des coursives extérieures.

Cette solution a des vertus de diverses natures : sociologiques en rendant les accès plus individuels si la coursive est décollée ; thermiques d'hiver par dissociation structurelle avec le bâtiment, thermique d'été en rendant possible la ventilation transversale.

¹⁸ La règle de la moitié de la hauteur ($H/2$) à partir de la limite de la propriété voisine qui doit être respectée dans le cas d'une ouverture de type fenêtre ou porte fenêtre, ainsi que le recul qui varie suivant la hiérarchie de la voie, ce sont là des exemples de la réglementation qui réduisent la possibilité d'ouverture.

¹⁹ Les bâtiments d'habitation collectif qui se développent en 4 logements par palier deviennent de plus en plus répandus en Algérie ces dernières années, surtout chez les promoteurs immobiliers privés qui cherchent souvent à rentabiliser le terrain au détriment du confort des habitants.

La **Figure 49** illustre une des premières opérations **HQE** (Haute Qualité Environnementale) (1995) : elle visait le confort d'été et avait pointé l'importance de la ventilation transversale dans le climat de Nice. La solution retenue est la desserte par coursière extérieure décollée au droit des T2, leur permettant l'ouverture d'une deuxième façade.²⁰

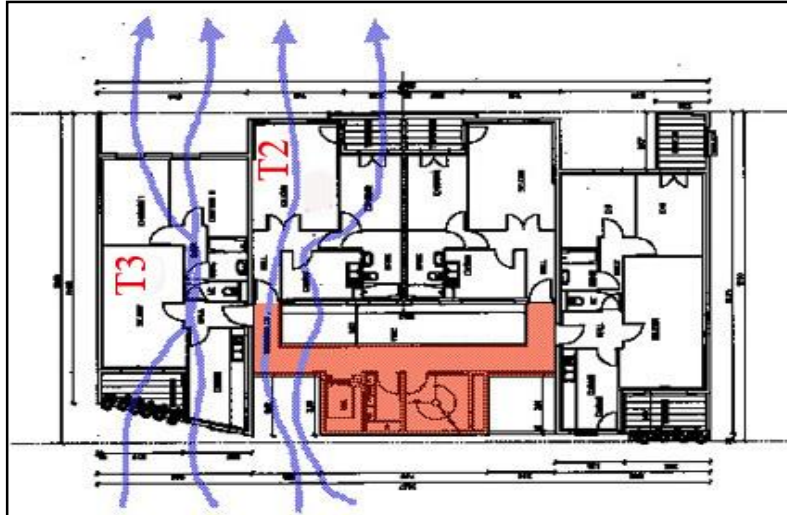


Figure 49: Opération REX HQE à Nice (Izard, 2006)

-Ventilation mono-latérale

Dans le cas où une ventilation traversante ne serait plus possible, le renouvellement d'air se fera à partir d'une seule façade. Dans ce cas, le mouvement d'air est provoqué par la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur engendrée par la différence de température et/ou la force du vent.

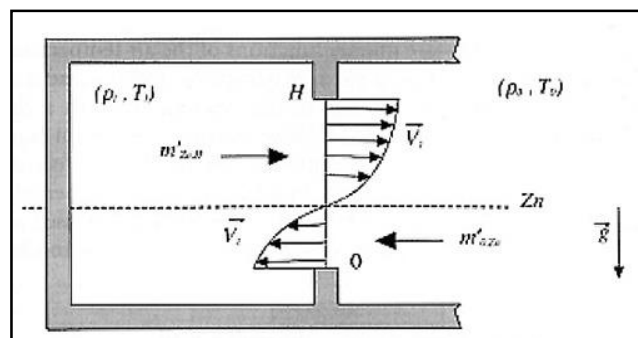


Figure 50: Flux d'air à travers une fenêtre en mono-latérale (Allard, 1998)

²⁰ Dans le dernier chapitre, une solution, qui consiste à connecter le volume d'air de la cage d'escalier avec celui des logements, a été explorée pour renforcer la ventilation naturelle mono-latérale

Le CIBSE²¹ montre, dans son manuel (CIBSE, 2005), que la ventilation traversante reste efficace jusqu'à une profondeur (**W**) qui ne doit pas dépasser cinq fois la hauteur (**H**) sous plafond de l'espace ventilé, par contre la ventilation mono-latérale est limitée à deux fois la hauteur (Figure 51). Ce qui fait que ce système de ventilation n'est pas très efficace en termes de confort thermique, mais peut être suffisant pour renouveler l'air d'une pièce (Izard, 2006).

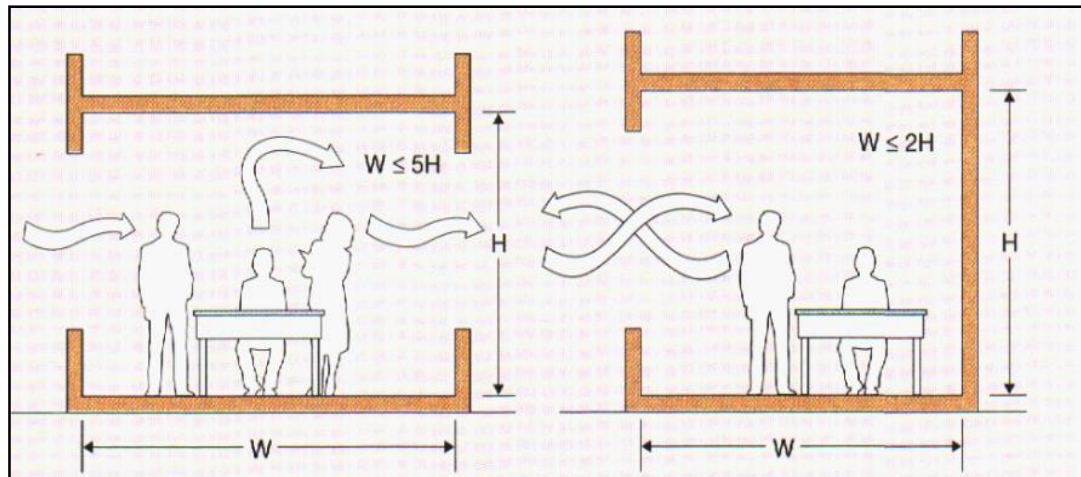


Figure 51: Comparaison entre ventilation traversante et ventilation mono-latérale (CIBSE, 2005)

Mais la ventilation par ouverture de fenêtre, qui est la plus répandue dans l'habitat collectif en Algérie, dépend exclusivement du comportement souvent aléatoire des occupants, qui est tributaire en grande partie de la sensation de gêne thermique au détriment parfois même de la qualité d'air.

À titre d'exemple la fermeture des fenêtres l'hiver pour éviter les déperditions thermiques (l'entrée du froid) au détriment de la qualité d'air (augmentation des taux de CO₂ et autres polluants). Le recours à une ventilation naturelle assistée (détecteur avertisseurs, sondes, capteurs...) peut s'avérer plus qu'utile, d'autant plus qu'en Algérie la protection civile recense de plus en plus d'accidents domestiques dus à l'asphyxie par gaz carbonique²².

²¹ The Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE) est une association internationale basée à Londres, constituée de professionnels et de chercheurs dans et l'ingénierie du bâtiment. Elle est consultée par le gouvernement sur les questions relatives à la construction, à l'ingénierie et à la durabilité.

²² Selon les chiffres recueillis dans le site officiel de la protection civile Algérienne (www.protectioncivile.dz), 335.088 accidents domestiques ont été enregistrés dans la période du 1er janvier au 30 septembre 2013 à l'échelle nationale, avec 143 personnes mortes par asphyxie dont 53 par la propagation de gaz carbonique.

VI.2.2. La ventilation naturelle par conduits "effet cheminée"

Dans ce cas de figure, cette ventilation repose essentiellement sur l'effet de tirage thermique qui peut être assisté par le vent si la sortie d'air se situe dans la zone de pression négative (le contraire engendre l'effet du refoulement).

La pression motrice est proportionnelle à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieure, à la différence de hauteur entre l'entrée et la sortie d'air.

Le système de ventilation naturelle par conduit est l'un des dispositifs les plus répandus dans l'habitat collectif, et consiste à prévoir pour chaque pièce de service (cuisine, salle de bains et cabinet d'aisances) une bouche d'extraction raccordée à un conduit d'évacuation vertical et pour chaque pièce principale (chambres et séjour) une entrée d'air neuf (qui peut être auto-réglable ou hygro-réglable).

Les conduits verticaux d'extraction peuvent être collectifs (ils sont appelés «**conduit shunt**»)
ou individuels et les bouches d'extraction peuvent être à sections constantes, autoréglables ou hygroréglables.

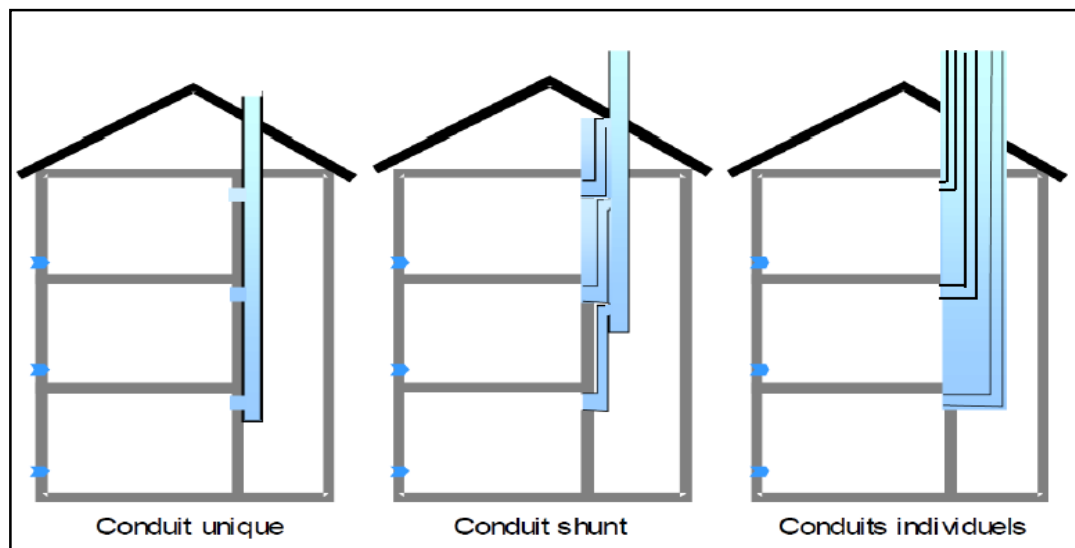


Figure 52: Types de ventilation naturelle par conduits verticaux [Tareb, 2004]

La ventilation naturelle basée sur les conduits verticaux est un des modes de ventilation des logements, appelé la ventilation par balayage général ou partiel du logement (CSTB, 2003).

-Ventilation par balayage général ou partiel du logement

Le balayage général est plus recommandé car il permet un transfert de l'air des pièces les moins polluées vers les pièces les plus polluées. L'air neuf pénètre par des entrées d'air, intégrées dans les fenêtres ou dans la maçonnerie, transite dans le logement à travers le hall via des ouvertures placées sur les portes. Cet air devenu vicié est extrait dans les pièces de service par des bouches d'extraction, puis rejeté vers l'extérieur au moyen de conduits collectifs ou individuels (Figure 54).

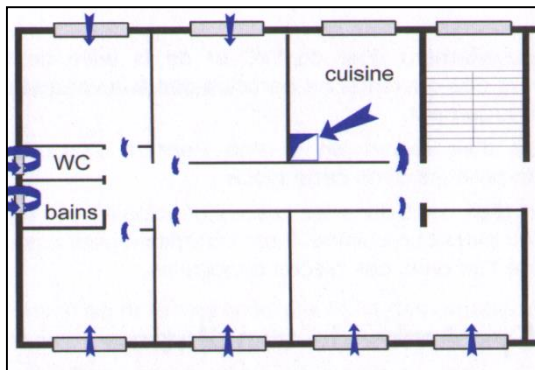


Figure 53: Ventilation par balayage partiel du logement (CSTB, 2003)

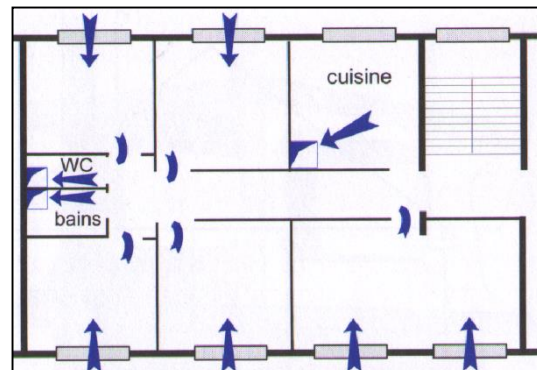


Figure 54: Ventilation par balayage général du logement (CSTB, 2003)

Même principe pour le balayage partiel sauf que le circuit d'air n'est pas réellement maîtrisé, par exemple, des entrées d'air situées dans les pièces principales, un seul conduit d'extraction en cuisine, et les sanitaires ventilés séparément par des ouvrants (Figure 53).

La plus grande partie de l'habitat collectif en Algérie se base principalement sur une ventilation naturelle par balayage partiel, autrement dit le cheminement d'air n'est pas étudié, et les débits d'air à extraire sont rarement calculés. Toute fois le **DTR C 3.31**, cité auparavant, est le seul document réglementaire en Algérie qui fournit les détails nécessaires pour le dimensionnement des conduits verticaux et les débits d'air à extraire dans l'habitat collectif.

Mais dans la réalité du terrain, la ventilation hygiénique est reléguée au second plan, l'importance du rôle des ouvertures, de leur position, ainsi que de leur dimensionnement est ignorée par la majeure partie des acteurs de la construction. Alors que plusieurs études, de par le monde, ont démontré concrètement la relation entre certaines maladies respiratoires et le fait de vivre dans des logements mal ventilés (Zock, et al., 2002).

VI.2.3. Combinaison des systèmes de ventilation naturelle

Le système de ventilation par conduit permet de surmonter certains problèmes liés à la ventilation mono-latérale et d'améliorer parfois les stratégies de ventilation traversantes en permettant d'équilibrer les débits d'air dans les différentes pièces d'un bâtiment (TAREB, 2004). L'exemple du bâtiment environnemental du BRE (Building Research Establishment) qui se situe à Watford au nord de Londres illustre d'une manière concrète l'efficacité d'une stratégie de ventilation naturelle innovante, qui combine subtilement les différents modes naturels du mouvement d'air.



Figure 55: Façade Sud du bâtiment du BRE. Source : www.energieplus-lesite.be

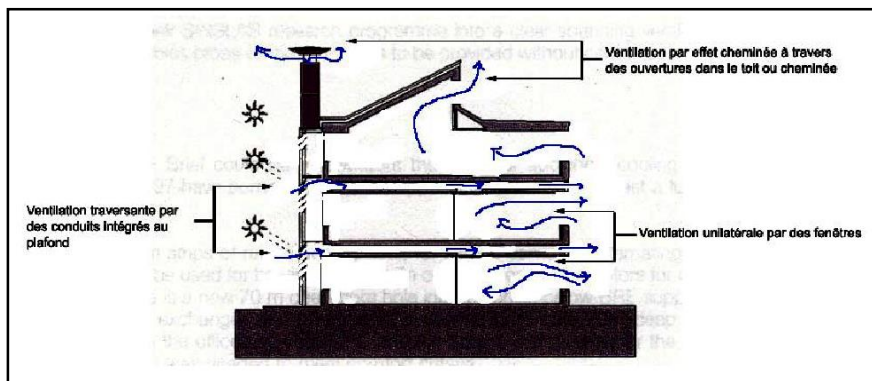


Figure 56: Combinaison des trois systèmes de ventilation naturelle, bâtiment du BRE (Mansouri, 2003)

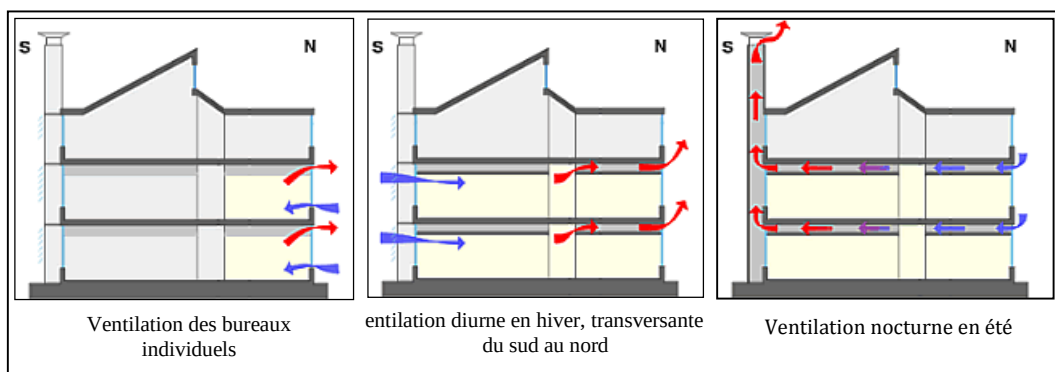


Figure 57: Stratégie de ventilation naturelle dans le bâtiment du BRE Source : <http://www.energieplus-lesite.be>

Ce bâtiment est l'un des références majeures en matière de stratégie de ventilation naturelle et démontre les possibilités qu'offrent les moteurs naturels de l'écoulement d'air, lorsqu'ils sont intégrés et combinés d'une façon ingénieuse et bien étudiée.

VI.3. La ventilation naturelle assistée (VNA)

Ce système fait partie de la famille des ventilations hybrides dont le principe est basé sur un système de ventilation naturelle combiné avec un ou plusieurs ventilateurs à basse pression ($dP \leq 50 \text{ Pa}$). Ces ventilateurs permettent d'augmenter la différence de pression pour renforcer, soit l'extraction, soit l'insufflation. Cette assistance mécanique permet d'assurer les débits d'air adéquats quand les forces du tirage thermique et du vent ne sont pas suffisantes ou durant des périodes où une ventilation intensive est nécessaire (Koffi, 2009).

VI.3.1. Les composants de la ventilation naturelle assistée

Le fonctionnement de ce système de ventilation hybride peut être asservi aux conditions intérieures ou/et extérieures, grâce à des composants automatiques qui permettent d'adapter le débit de ventilation selon certains paramètres d'ambiance intérieure comme : l'occupation de l'espace, l'hygrométrie, concentration de polluants, température intérieure... D'autres dispositifs d'extraction sont conçus pour assister les moteurs naturels de ventilation. Cette stratégie de ventilation permet par conséquent de réduire significativement les déperditions thermiques dues à la ventilation, assure une certaine adaptabilité au taux d'occupation des logements (CSTB, 2003). La performance de ce système repose sur le bon fonctionnement des composants suivants et qui sont illustrés dans la **figure 58** :

- 1) **Les entrées d'air** : Ouvertures en contact avec l'air extérieur peuvent être intégrées dans la menuiserie des fenêtres ou en maçonnerie.
- 2) **Transfert d'air** : Ouvertures placées en général en bas des portes intérieures, permettent le transit de l'air à l'intérieur du logement.
- 3) **Bouches d'extraction** : connectées aux conduits de ventilation et assurent l'extraction de l'air vicié.
- 4) **Conduit** : peut-être individuel ou Shunt.
- 5) **Extracteurs** : situés aux débouchés des conduits de ventilation, renforcent et régulent le tirage naturel.

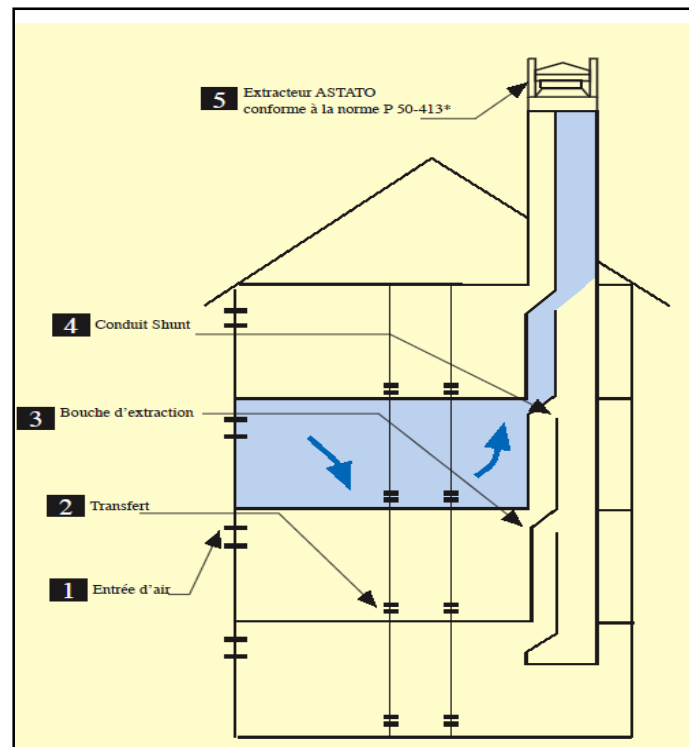


Figure 58: Composants d'une ventilation naturelle assistée. Source : <http://www.astato.com>

VI.3.2. Les entrées d'air et les bouche d'extraction

Elles peuvent être : **Fixes** : la section de passage de l'air est constante ; **Autoréglables** : la section de passage varie automatiquement en fonction de la différence de pression, pour maintenir un débit en m^3/h constant ; **Hygroréglables** : la section de passage se modifie automatiquement afin de faire varier le débit (en m^3/h) en fonction de l'humidité de l'air de la pièce desservie, et présente ainsi l'avantage de répartir le débit d'air neuf en fonction de l'occupation des pièces principales.

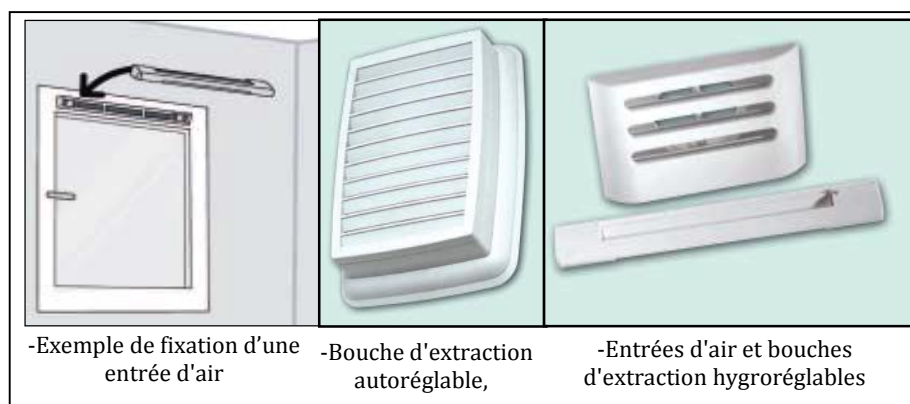


Figure 59: Entrées d'air et Bouches d'extraction (AVEMS, 2010)

VI.3.3. Les extracteurs

Les débouchés des conduits d'extraction sur toiture peuvent, au-delà de leur fonction de couronnement et de protection contre la pénétration des pluies et des volatiles, avoir un rôle de moteur qui assiste l'extraction naturelle de l'air, cette assistance peut être mécanique pilotée par un système de contrôle intelligent, qui associe automatiquement le mode naturel et le mode assistance mécanique, en fonction des conditions météorologiques. Ce système optimise ainsi la consommation électrique (AVEMS, 2010). L'extracteur peut être statique, stato-mécanique, sous forme de ventilateur d'extraction basse pression ou d'extraction assistée par induction.

L'extracteur statique est un dispositif placé sur le toit en tête des conduits et ne nécessite aucune mécanique pour assurer son fonctionnement. Il permet de renforcer le tirage thermique en créant une dépression en fonction de la vitesse du vent (effet Venturi), ainsi que d'éviter le phénomène d'inversion du sens d'écoulement dans les conduits, ce qui entraînerait un refoulement de l'air vicié ou des produits de combustion dans les logements.



Figure 60: Exemples d'extracteurs statiques (Aziez, 2006/2007)

Les extracteurs stato-mécaniques sont munis d'un dispositif mécanisé utilisant une source d'énergie autre que celle du vent, pour augmenter les débits d'air extraits (à l'arrêt, il fonctionne comme un extracteur statique).

Ce dispositif d'assistance mécanique se déclenche quand les conditions du tirage naturel ne sont plus réunies (température extérieure élevée) ou en fonction des besoins. Il peut ainsi être programmé en fonction de l'heure (automate par horloge) ou/et de la température extérieure (automate par thermostat).



Figure 61: Extracteur stato-mécanique (AVEMS, 2010)

VI.3.4. Les avantages d'une ventilation naturelle assistée

Des études ont démontré que les ventilations naturelles assistées (ventilation hybride) sont plus efficaces que la simple ventilation naturelle et plus économique que les ventilations mécaniques contrôlées.

Selon Astato (AVEMS, 2010), le système Navair permet une économie de 38 % sur la consommation d'une consommation mécanique. Grâce à un mécanisme de modulation gérée par un automate qui a pour données d'entrée la vitesse du vent via un anémomètre et la température extérieure via une sonde de température, les flux d'air naturels sont contrôlés et ajustés en fonction des conditions météorologiques afin d'extraire les débits désirés. Lorsque les conditions de tirage naturel sont suffisantes, l'assistance est nulle et le système correspond à une ventilation naturelle classique. Ce système permet de minimiser la consommation d'énergie sans réduire les débits d'extraction (AVEMS, 2010).

La **Figure 62** illustre les différents aspects positifs et les réserves notées à la fois pour une ventilation naturelle non assistée et assistée. On remarque que la VNA permet de remédier aux aléas du tirage thermique et d'adapter les débits selon les besoins avec des dispositifs d'asservissement faciles à mettre en œuvre²³ (CSTB, 2003).

A - Ventilation naturelle		B - Ventilation naturelle assistée	
Aspects positifs	Réserves	Aspects positifs	Réserves
- pas de bruit d'équipement - pas d'auxiliaire - compatibilité avec les appareils à combustion - maintenance limitée - possibilité d'asservissement mécanique	- aléas du tirage naturel - pas d'adaptation du débit aux besoins - organisation des logements - aération parasite - orifices de transfert entre pièces - débouchés en toiture	- systèmes simples - asservissements faciles - intermittence - compatibilité avec les appareils à combustion	- maintenance - organisation des logements - aération parasite - orifices de transfert entre pièces - débouchés en toiture

Figure 62: Comparaison entre ventilation naturelle assistée et ventilation naturelle (CSTB, 2003)

²³ La ventilation naturelle assistée est facile à mettre en œuvre avec un coût financier et énergétique très inférieur à celui d'une VMC, ce qui fait d'elle un bon compromis entre ventilation naturelle et VMC. A cet égard, nous pouvons la considérer comme une solution concrète à la fois pour les logements neufs et dans le cadre d'éventuelles réhabilitations énergétiques de l'habitat collectif en Algérie. Car elle maintient le coût du logement accessible.

VII. Approche architecturale de la ventilation naturelle

Dans cette section, nous abordons la ventilation naturelle d'un point de vue architectural, autrement dit nous allons étudier le rapport entre la forme architecturale et l'écoulement d'air à l'intérieur des bâtiments. Cela s'inscrit dans notre objectif qui se base sur l'impact que peut avoir un choix architectural sur l'efficacité d'une stratégie de ventilation dans l'habitat collectif en Algérie, en l'occurrence les espaces de transitions (Cage d'escalier, hall...)

VII.1.1. Dispositifs de ventilation naturelle dans l'architecture traditionnelle

L'histoire de l'architecture a montré que l'homme, à travers les âges, a toujours cherché à aérer son habitat, de ce fait les solutions apportées en termes de ventilation naturelle sont multiples et ne manque pas d'ingéniosité, notamment dans les pays chauds du Moyen-Orient orient et d'Afrique du Nord où les systèmes de renouvellement d'air sont souvent associés au rafraîchissement des espaces intérieurs. Ces dispositifs ancestraux recèlent des enseignements importants qui peuvent consolider nos connaissances sur le mouvement d'air et sa relation avec les conditions climatiques, tels des laboratoires à grandeur nature où l'expérience du génie des sociétés a abouti à des solutions adaptées au contexte, d'autant plus qu'à l'époque où les appareils de climatisation n'existaient pas, on n'avait que le choix de s'harmoniser avec la nature. De ce fait, une multitude d'exemples sont parvenus jusqu'à aujourd'hui, et se déclinent en diverses expressions architecturales suscitant un intérêt grandissant autour de leur fonctionnement. De la maison à cours intérieur de l'architecture méditerranéenne (**patio**, **atrium**), passant par le **Moucharabiehs** jusqu'aux **Tours à vents (Badgir, Melqaf)**, les dispositifs de ventilation naturelle ont toujours été présents dans l'architecture traditionnelle.



Figure 63: Malqaf, Egypte
Source : ocw.mit.edu



Figure 64: Badgir, Iran
Source : www.richard-tolouie.com



Figure 65: Moucharabieh, Egypte
Source : ocw.mit.edu

III.1.1. Les capteurs à vent

On les retrouve sous diverses formes dans différentes Architectures traditionnelles notamment dans le Moyen-Orient orient, du **Badgir** d'Iran passant par le **Malqaf** égyptien jusqu'au **Bargil émirati**, les capteurs à vents sont une référence en matière de systèmes de ventilation naturelle dans l'architecture traditionnelle à travers le monde.

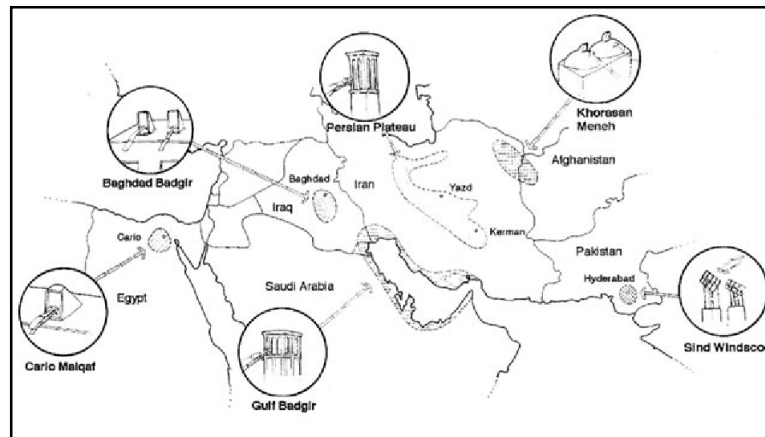


Figure 66: Les formes de tours à vent au moyen orient Source : www.richard-tolouie.com

-Badgir Iranien

Le **Badgir**²⁴ de l'architecture persane a suscité notre intérêt dans le cadre de notre travail de recherche, du fait de son principe de fonctionnement. Une étude approfondie menée sur ce dispositif de ventilation naturelle a été effectuée par deux architectes français **Hervé Richard** et **Shiva Tolouie**²⁵, mettant en exergue les deux effets principaux induits par ce système, un liés à la force du vent et l'autre à la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur qui varient durant la journée à savoir : **Effet capteur à vent** et **Effet cheminée**.

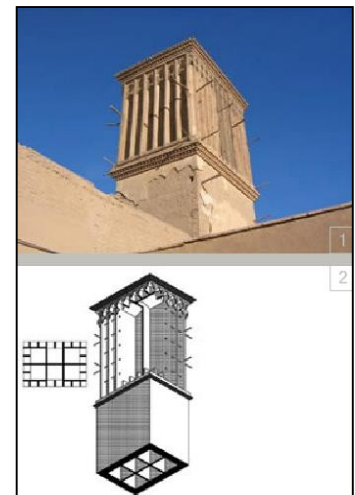


Figure 67: Vue sur la tour à vent Source : www.richard-tolouie.com

²⁴ Les « badgir » (mot persan signifiant littéralement attrape-vents) sont une déclinaison iranienne des tours de ventilation présente dans de nombreuses régions sèches et arides du moyen orient.

²⁵ Les architectes Richard et Tolouie ont pu étudier dans le détail, grâce à une bourse de la fondation EDF, les caractéristiques typologiques des badgir, à partir des exemples rencontrés dans la ville historique de Yazd en Iran

Effet capteur à vent

les vents les plus rapides et moins chargés de sables, captés en hauteur par les ouvertures de la tour orientées selon les vents dominants), sont ensuite canalisés vers la pièce à rafraîchir via un premier conduit avant de remonter par un autre symétrique placé sous le vent créant ainsi un courant d'air dans cette pièce. Pour que le dispositif soit encore plus efficace, un bassin est placé au pied de la tour pour rafraîchir l'air entrant par évaporation, ainsi qu'une grille sous la tour qui relie l'air frais du sous-sol avec les pièces à rafraîchir.

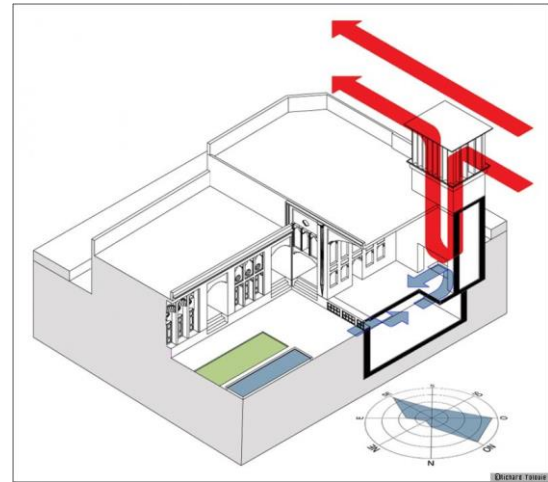


Figure 68: Effet attrape vent Source : <http://www.richard-tolouie.com>

Effet cheminée

La tour chauffée par le soleil réchauffe l'air contenu dans ses conduits. Mettant en œuvre le principe de convection, l'air chaud monte créant une aspiration en bas de la tour, tout en ventilant la pièce. En l'absence des vents, ce principe prédomine. Dans les périodes froides des portes sont prévues au pied de la tour pour pouvoir fermer l'entrée d'air (Figure 69).

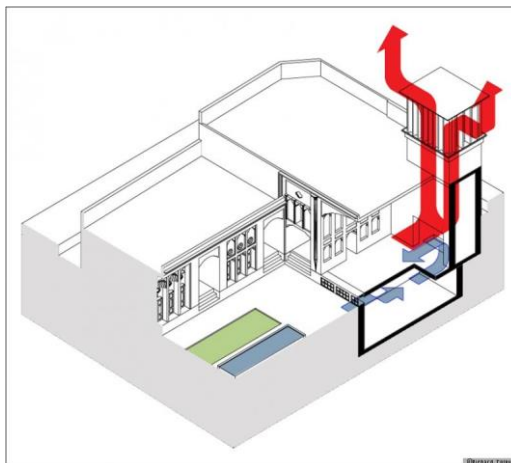


Figure 70 : Effet cheminée Source : www.richard-tolouie.com



Figure 69: Portes au pied de la cheminée Source : www.richard-tolouie.com

Le Badgir est généralement rectangulaire, et peut être centré ou déporté latéralement par rapport à la maison, et selon les cas, il peut avoir : une ouverture, deux opposées, quatre disposées symétriquement dans un plan carré, six voir même huit dans des tours octogonales, ces ouvertures sont orientées selon les vents dominants.

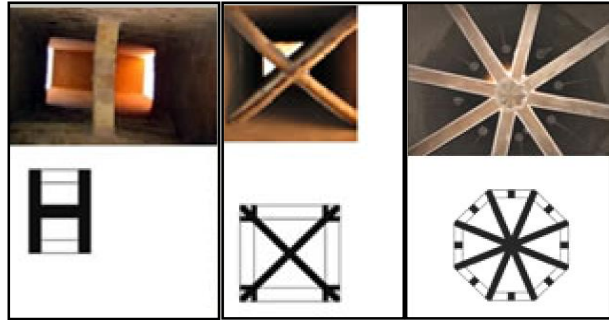


Figure 71: Différents types de Badgir Source : www.richard-tolouie.com

-Tour à vent jumelée à une rivière souterraine

Le principe de fonctionnement d'une tour à vent associée à une rivière souterraine se base sur un refroidissement sensible par contact de l'air extérieur capté avec des conduits souterrains et sur un refroidissement latent par humidification au contact du cours d'eau (Figure 72).

La Figure 72 montre que l'air refroidi par humidification de la rivière de "a" jusqu'à "b" est rejoint par l'air refroidi par contact avec les parois internes de la tour à vent de "1" à "6" pour obtenir un refroidissement optimal en "d" [Izard, 2006].

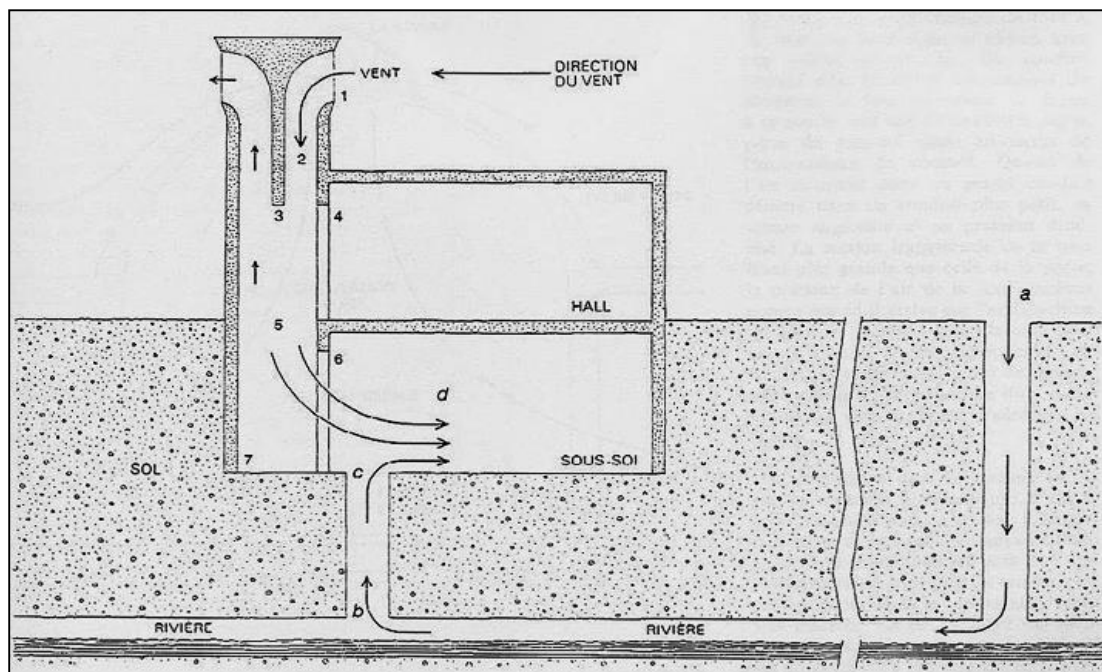


Figure 72: Combinaison d'une rivière souterraine et d'une tour à vent (d'après Mehdi N. Bahadori,) (Izard, 2006)

-Malqaf égyptien

En Egypte, les systèmes de captage du vent prennent le nom de **malqaf**, un dispositif de rafraîchissement passif très ancien qui remonte à l'époque des pharaons. Le palais d'Othman Katkhuda construit au XIV^e siècle au Caire fournit une excellente illustration de ce système (Figure 73). Les étudiants de « l'Architectural Association School of Architecture in London » ont fait des mesures des déplacements d'air le 2 avril 1973 à l'intérieur du palais : le dessin à droite dans la Figure 73 illustre les directions et les vitesses des flux d'air, avec la longueur des flèches qui correspond à la vitesse d'air (Izard, 2006).

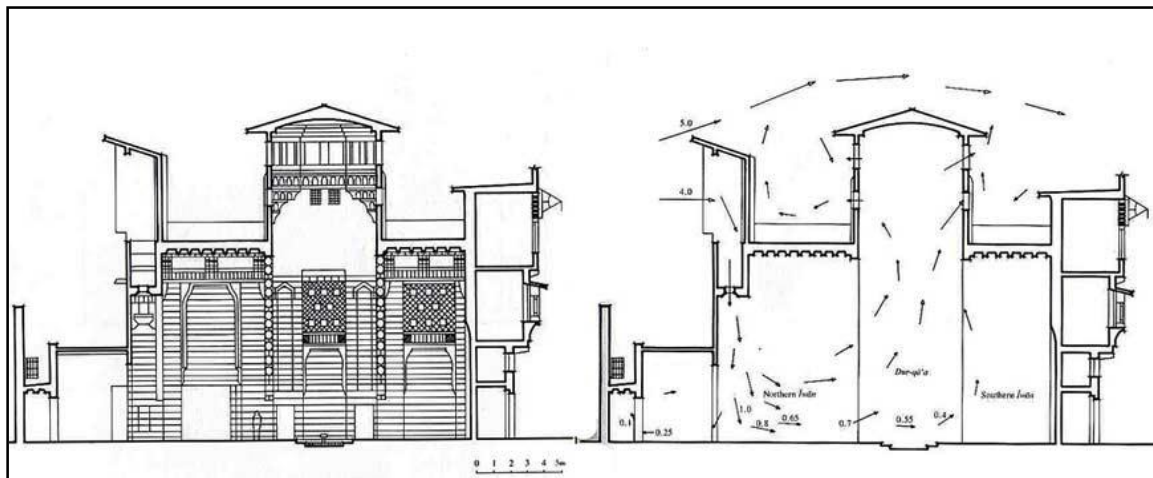


Figure 73: Circulation de l'air sous l'effet d'un vent dans un Malqaf d'après Hassan Fathy (Izard, 2006)

La Figure 74 illustre le principe de fonctionnement du Malqaf, utilisé par l'architecte égyptien Hassan Fathi dans certains de ses projets, qui se base sur : Le captage de l'air à une hauteur suffisante pour éviter les poussières et avoir une vitesse d'air suffisante pour générer un flux, puis son humidification pour le rafraîchir par vaporisation. Cela grâce à l'eau qui coule en cascade à travers des mailles métalliques et des bacs remplis de charbon de bois, un dispositif que Hassan Fathi appelle "déflecteur"; un bassin avec ruissellement appelé "salsabil" est parfois intégré pour compléter ce système (Izard, 1993)

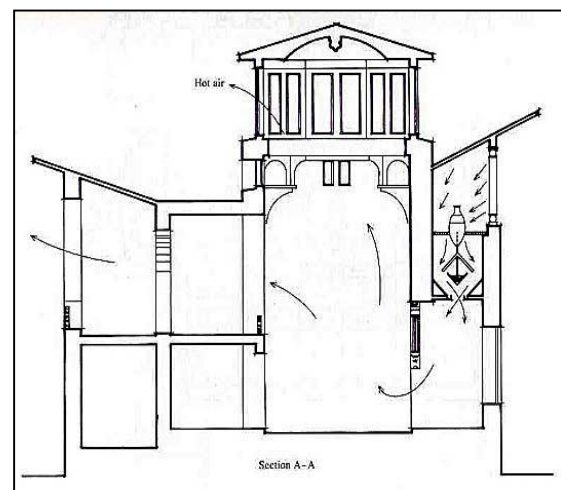


Figure 74: Coupe d'un Malqaf avec un procédé d'humidification pour un climat chaud et aride d'après Hassan Fathi (Izard, 1993)

VII.1.2. Moucharabieh

Le moucharabieh est l'un des systèmes d'ouvertures le plus ingénieux dans l'architecture musulmane. Conçus en forme de claustras ou lattis finement tressé (généralement en bois), ses petits orifices permettent de filtrer le rayonnement solaire et de diminuer la pression du vent tout en assurant la ventilation des espaces intérieurs.

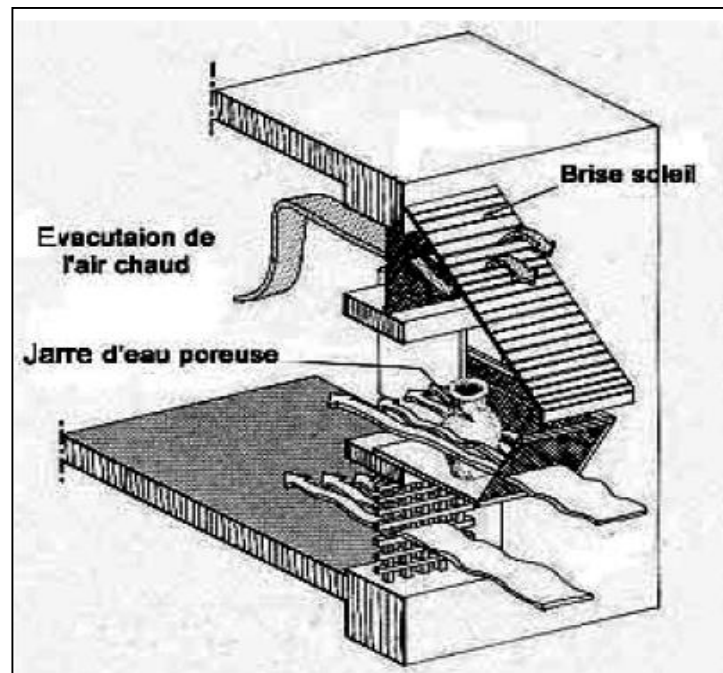


Figure 75: Fonctionnement d'un moucharabieh (Izard, 1979)

Le moucharabieh se présente souvent en saillie afin de profiter de trois façades augmentant ainsi la surface en contact avec le vent pour ventiler plus efficacement. Il répond à un souci d'intimité tout en offrant la possibilité de regarder vers l'extérieur et on lui attribue aussi la fonction de "filtre" des insectes (Izard, 1993). Dans certain cas, une jarre d'eau poreuse est disposée du côté intérieur du moucharabieh afin de rafraîchir les flux d'air par évaporation, ce qui génère un mouvement d'air en boucle.

Le volume d'air extérieur se rafraîchit en pénétrant par la partie inférieure de l'ouverture et permet d'évacuer, par différence de pression, l'air chaud intérieur à travers la partie supérieure de la même ouverture, ce qui engendre une ventilation mono latérale de l'espace intérieur.

VII.1.3. Le Patio

Symbole de l'architecture traditionnelle méditerranéenne, il est l'exemple-type des espaces intermédiaires entre intérieur et extérieur. Espace central autour duquel est organisé le reste des espaces de vie, le patio fonctionne comme un puits de fraîcheur qui régule la température intérieure de l'habitation, car sa configuration spatiale (rapport entre hauteur, largeur et longueur) permet d'ombrer la majeure partie de ses parois tout au long de la journée, ce qui abaisse sensiblement la température de l'air à l'intérieur du patio.

L'air frais ne peut pas s'échapper et stagne en rafraîchissant ainsi les pièces qui sont ouvertes sur lui. De la végétation et des bassins d'eau peuvent être intégrés à l'intérieur du patio afin d'assurer l'humidification de l'air dans le but d'augmenter le refroidissement par évaporation de l'eau. Des occultations légères et amovibles sont parfois utilisées pour accroître la surface des parois ombrées (Izard, 1993).

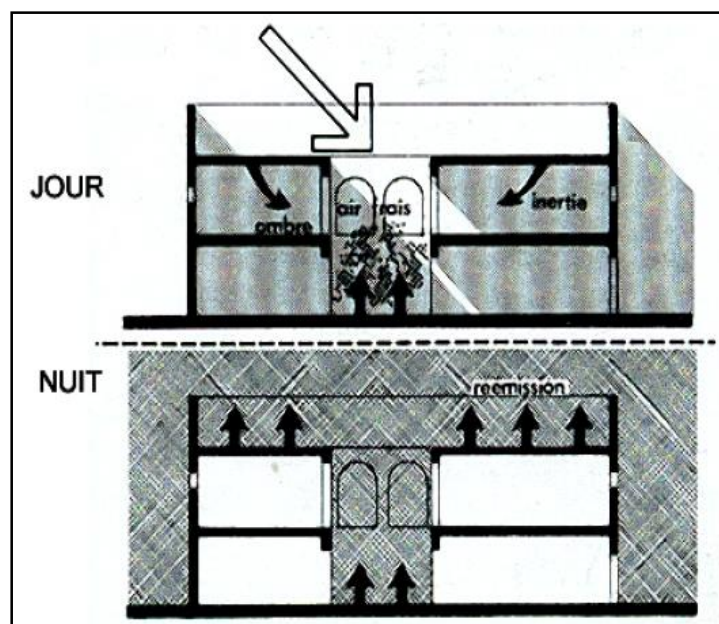


Figure 76: Fonctionnement jour/nuit d'un patio (Izard, 1979)

À travers ces exemples de l'architecture traditionnelle, nous avons voulu démontrer que des solutions architecturales bioclimatiques, simples à réaliser et fondées seulement sur des mécanismes physiques naturels, peuvent améliorer considérablement la ventilation naturelle d'un édifice. Aujourd'hui encore, beaucoup d'architectes et d'ingénieurs essayent de bien comprendre leur fonctionnement afin de les intégrer dans des stratégies de ventilation naturelle.

VII.2. Exemples de stratégies de ventilation naturelle dans l'habitat collectif

Dans cette partie, nous illustrons des dispositifs de ventilation naturelle dans l'habitat collectif à travers l'analyse d'exemples de projets contemporains de référence.

VII.2.1. La tourelle à vent : 95 Logements collectifs du quartier Delzieux

Ce projet s'inscrit dans le cadre du projet VILLE-PORT de la ville de Saint-Nazaire, visant à développer un projet urbain autour du square Delzieux.

Conçu par l'Atelier Philippe Madec pour le compte du CISN Atlantique et SILENE, ce programme de 96 logements collectif se compose de cinq immeubles qui forment une équerre déterminent l'espace du square Delzieux, orientés plus au Sud, protégés des vents dominants et des rues voisines.



Figure 77: vue sur le quartier Delzieux Source : <http://www.atelierphilippemadec.fr>

Système de Ventilation naturelle assistée et contrôlée (VNAC)

A côté d'autres principes à savoir : que toutes les pièces de chaque logement possèdent une fenêtre sur l'extérieur et que tous les logements s'ouvrent au moins sur deux orientations.

Le système de Ventilation naturelle assistée et contrôlée est le principe fort de la stratégie de ventilation développée dans ce projet, dont le but est de : profiter de l'énergie renouvelable

éolienne (économie d'énergie), assurer une bonne qualité de l'air tout en limitant les débits en hiver (assurer les débits de ventilation réglementaires) et en les augmentant en été (contribuer au confort thermique) grâce à une régulation performante par logement.

Le système VNAC est composé :

-D'entrées d'air autoréglables spécifiques à la ventilation naturelle (fonctionnant sous de faibles différences de pression).

La **Figure 78** illustre le fonctionnement du clapet autoréglable qui bascule en cas de légère pression du vent (1), et se plie sous une pression plus forte (2).

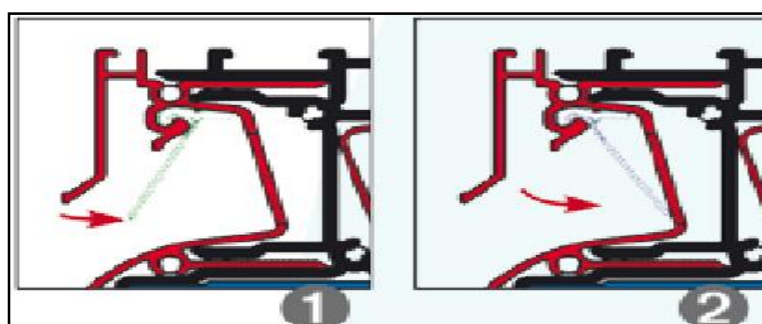


Figure 78: Coupe sur l'entrée d'air auto réglable (ARENE, 2012)

-De bouches d'extraction situées dans chaque pièce humide cuisine, salle de bains, WC et salle d'eau.

Elles sont constituées de simples grilles et leur section correspond à celle du conduit secondaire s'y rattachant.



Figure 79 : Bouche d'extraction (ARENE, 2012)

-De Conduits d'extraction : Chaque logement possède son propre conduit principal d'extraction.

Chaque bouche d'extraction dans chaque pièce humide est reliée au conduit principal d'extraction par un conduit spécifique positionné en soffite ou/et faux-plafond dans le logement.



Figure 80: conduits d'extraction (ARENE, 2012)

-**D'un système de régulation** des débits par logement (1 registre et 1 capteur par conduit géré par 1 automate de régulation).

-**D'une tourelle à vent** : c'est la clé de voûte du dispositif d'extraction placé sur le toit, elle est raccordée à plusieurs conduits principaux d'extraction donc desservant plusieurs logements.



Figure 81 : Vue sur une tourelle à vent Source : <http://www.atelierphilippemadec.fr>

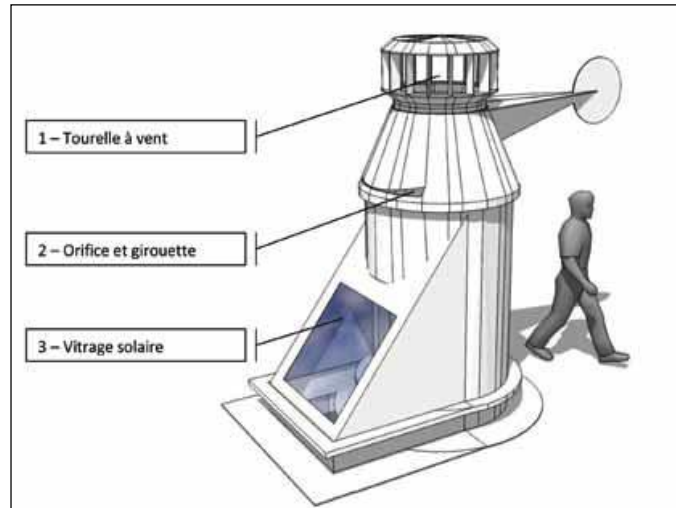


Figure 82 : Axonométrie de la Tourelle à vent Source : <http://www.atelierphilippemadec.fr>

Ce dispositif d'extraction consiste en un ensemble recueillant les sorties des conduits individuels de ventilation naturelle des logements (environ 5 conduits par tourelle). L'ensemble doit servir d'embase à une **tourelle à vent (1)** située à son sommet, permettant d'augmenter les débits extraits sous l'action du vent qui fait alors tourner la tourelle à vent. Les tourelles sont donc composées d'une partie fixe ancrée dans la dalle béton et de deux parties mobiles **(1)** et **(2)**. Une partie mobile "**girouette**" **(2)**, munie d'un orifice destiné à introduire de l'air supplémentaire dans la tourelle, est positionnée entre le fût fixe et la tourelle à vent (mobilité par rapport au fût fixe assurée par un système de roulements à billes). Le but de la girouette est d'orienter l'orifice face au vent pour créer une surpression améliorant le tirage.

Pour encore augmenter le tirage thermique, un vitrage **(3)** est ajouté en pied de tourelle afin d'augmenter ponctuellement la température à la sortie des conduits d'extraction et donc favoriser le tirage, une sorte de "**cheminée solaire**" (ARENE, 2012).

Principe de fonctionnement

L'air neuf est introduit dans le logement par les entrées d'air situées dans les pièces principales (chambres et séjour) ; puis extrait dans les pièces humides (cuisine, salle de bains et WC). L'air vicié est rejeté à l'extérieur par des conduits débouchant en toiture, associés aux tourelles à vent. Sur l'ensemble de l'opération (95 logements), 19 tourelles sont installées, chaque tourelle étant raccordée à environ 5 logements.

Le système a été pensé et conçu exactement comme un système de ventilation simple flux autoréglable, avec une spécificité dans le dimensionnement des entrées d'air, des détalonnages de portes et des conduits, liée au fonctionnement à faible différence de pression en ventilation naturelle. Le système proposé permet également de respecter les isollements acoustiques réglementaires des façades.

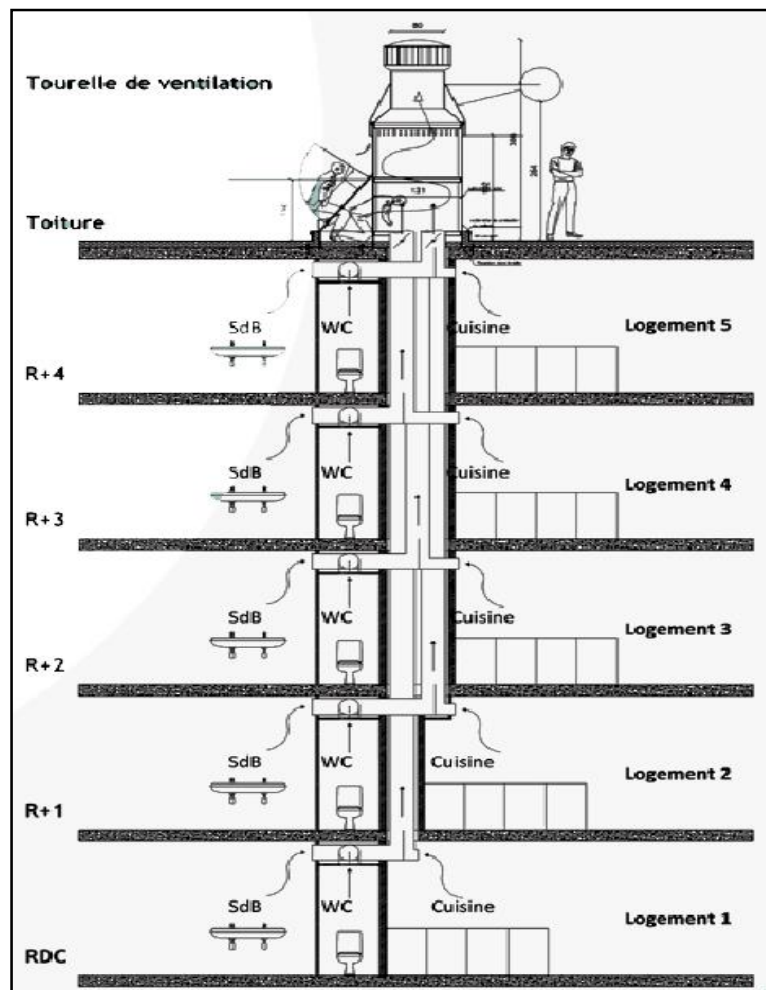


Figure 83: Coupe partielle sur le système VNAC (ARENE, 2012)

VII.2.2. Ventilation naturelle avec récupération de chaleur : le quartier BedZed

Situé en périphérie de Londres abritant commerces, bureaux, et 82 logements, le quartier **BedZed (Beddington Zero (fossil) Emission Development)**, a été conçu par **Bill Dunster Architects (ZEDfactory)**, agence Londonienne pionnière en matière d'architecture durable, en repensant l'architecture et l'urbanisme sur la base d'efficacité énergétique, de la simplicité et des usages des habitants.



Figure 84: vue sur un bâtiment de BedZed Source : www.zedfactory.com/

Dans ce projet plusieurs systèmes hybrides ont été conçus pour réduire la consommation énergétique des bâtiments ainsi que son empreinte écologique, toutefois ce qui nous intéresse c'est l'ingénieux système de ventilation naturelle assisté développé par ZEDFactory qui se base principalement sur une tourelle à vent avec échangeur de chaleur double flux.

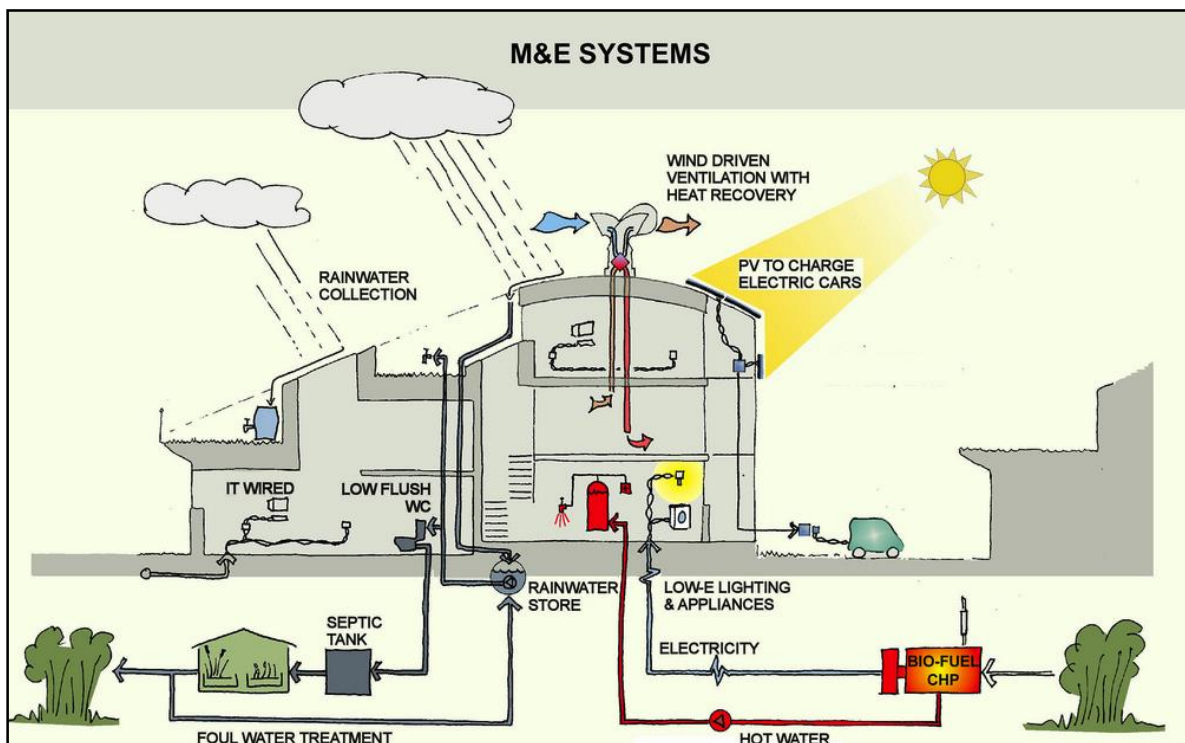


Figure 85: Systèmes hybrides et durable développés dans les bâtiments BedZed (Twinn, 2003)

-La tourelle de ventilation avec échangeur de chaleur double flux "Wind Cowl"

La stratégie ventilation naturelle assistée de BedZed fonctionne grâce à une tourelle à vent ("wind Cowl" en anglais) posée sur le toit, qui s'oriente comme une girouette. L'entrée du capteur est toujours du côté face au vent, tandis que la bouche d'extraction est placée du côté opposé afin de bénéficier de la dépression provoquée par le passage de l'air.



Figure 86: les tourelles à vent de BedZed. Source : www.flickr.com

-Fonctionnement du "Wind Cowl"

Développé par THE ZEDfabric, une filiale de ZEDfactory, ce système passif permet d'aspirer l'air frais et de rejeter l'air vicié à travers les bouches de ventilation dans chaque pièce en utilisant la force du vent. L'air vicié chaud extrait chauffe l'air frais entrant grâce à un échangeur de chaleur situé à l'intérieur de la tourelle à vent sous le capteur. Ce système permet de récupérer de la chaleur de l'air évacué avec une efficacité de 70% (Figure 87).

Le "Wind Cowl" fonctionne comme un système de ventilation active, mais au lieu d'utiliser des ventilateurs électriques comme moteur, il utilise le vent pour créer à la fois une pression positive à l'entrée et pression négative à la sortie en assurant un débit d'air minimum. Dans des conditions de vent faible, le dispositif continue d'assurer un niveau de ventilation raisonnable grâce à l'effet de cheminée.

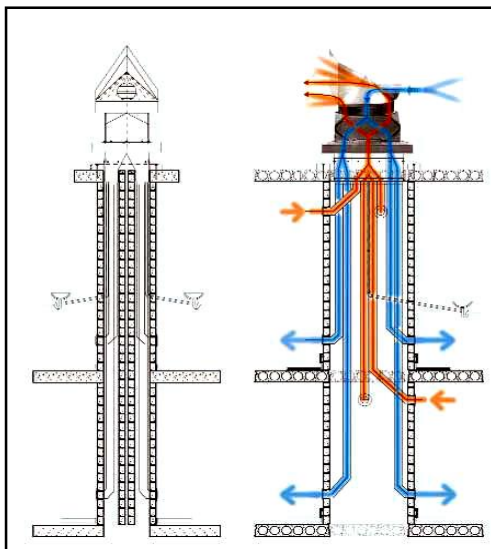


Figure 88: Fonctionnement du "Wind Cowl"
Source : www.zedfactory.com/

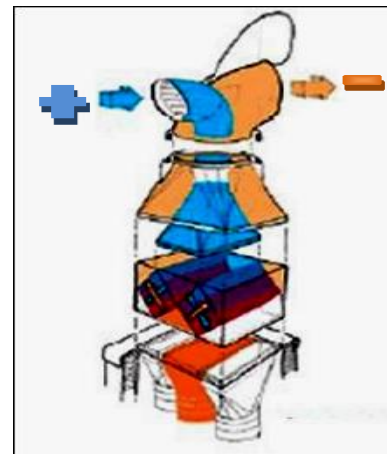


Figure 87 : Principe de l'échangeur de chaleur. Source :

VII.3. Critères de choix d'une stratégie de ventilation dans l'habitat collectif

Pour un architecte, le choix d'une stratégie de ventilation naturelle est intimement lié aux différentes contraintes (climatiques, économiques...) relatives au contexte du bâtiment, et ce choix sera déterminant tout au long de sa conception, car il influencera d'une manière ou d'une autre les décisions de l'architecte dans sa quête de solutions bioclimatiques durables.

Dans le cas de logement neuf comme dans les cas des opérations de réhabilitation, des critères de natures différentes sont à prendre en considération dans le choix de la stratégie de ventilation à adopter, et ce afin d'intégrer tous les paramètres relatifs à la réalité du terrain ce qui va rendre l'opération plus pragmatique.

VII.3.1. Critères esthétiques

L'aspect esthétique à un côté subjectif mais reste important pour nous Architecte, car l'impact visuel des éléments apparents d'un système de ventilation naturelle (cheminée, tourelle d'extraction...) et de leur fonctionnement (salissures, par exemple) doit être pris en compte.

Ces éléments peuvent être intégrés dans l'architecture même du bâtiment et en devenir parfois le symbole de son cachet bioclimatique (les Wind Cowl de BedZed). Cela concerne aussi l'architecture d'intérieur, car les problèmes d'encombrement et de l'intégration des conduits, des entrées d'air, des bouches d'extraction et d'insufflation doivent être pris en compte par l'architecte et les concepteurs du système.

VII.3.2. Critères d'usage

L'appréciation de l'usage ne peut être que le fruit de l'expérience, de l'évaluation et de l'extrapolation à partir des systèmes les plus répandus dans les bâtiments existants.

Les critères d'usage peuvent être appréciés suivant plusieurs notions qualitatives telles que (CSTB, 2003) :

- le confort (bruit, odeurs, courant d'air froid...).
- sur-occupation (Adaptation des débits, ventilation intensive.

- la compréhension du fonctionnement par l'utilisateur (respect des installations, utilisation optimale du système de ventilation).
- l'indépendance de l'utilisateur : ne pas conditionner l'utilisation de l'espace en adaptant le système au comportement de l'utilisateur et en lui permettant d'agir sur ces composants.
- L'accessibilité aux différentes parties du système de ventilation et la possibilité du réglage et de l'entretien de ces composants.
- La durabilité du dispositif de ventilation, liée à la qualité des différents composants et de leurs mises en œuvre.

VII.3.3. Critères économiques

C'est l'un des points les plus importants, car l'architecte doit évaluer l'ensemble des coûts liés à l'investissement (étude et réalisation), au fonctionnement du système de ventilation (CSTB, 2003).

5.7 : Critères de choix d'un système																				
		Adapté aux logements collectifs	Adapté aux logements individuels	Compatible conduit SHUNT	Compatible conduit INDIV.	Compatible conduit métallique	Compatible avec l'évacuation des PDC	Modulation débits	Maîtrise des débits	Économie d'énergie	Consommation Auxiliaires	Qualité d'air (QAI)	Acoustique - Bruits extérieurs	Acoustique - Bruits propres	Coût fourniture	Coût installation	Coût maintenance	Complexité concept°	Complexité installation	Complexité maintenance
Ventilation naturelle	fixe	+	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
	autoréglable	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	hygroréglable	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Ventilation hybride	fixe	+	+	+	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+
	autoréglable	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
VMC	hygroréglable	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	autoréglable	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+	+	+	+

Figure 89: Critères de choix d'un système de ventilation (AVEMS, 2010)

-Les coûts d'investissement

Une stratégie de ventilation naturelle assistée est plus économique concernant les coûts d'investissement en termes d'équipement, plus le système sera mécanisé et plus l'investissement sera important. Ainsi, un système de ventilation naturelle ne nécessite pas de ventilateurs, tandis qu'un système simple flux oui, et encore plus pour un double flux. En revanche, les frais d'études pour un système de ventilation naturelle peuvent se révéler importants, car il nécessite des simulations poussées et une étude approfondie pour en garantir un bon fonctionnement (AVEMS, 2010).

-Les frais de climatisation

Ils peuvent être plus faibles avec une stratégie de ventilation naturelle nocturne qui permet de refroidir le bâtiment durant l'été, la nuit lorsque les températures extérieures sont plus faibles que les températures intérieures. Cela permet de faire des économies considérables sur les frais de climatisation.

-Les frais de chauffage

Ils peuvent être réduits dans le cas de l'utilisation de la ventilation mécanique double flux, si un récupérateur de chaleur est présent mais le coût d'installation d'une VMC est important dans des programmes de logements sociaux. Mai, nous avons vu avec l'exemple de BedZED qu'il est possible d'intégrer un échangeur de chaleur à l'intérieur de la tourelle à vent, même si ce dispositif est difficile à obtenir dans le cas de la ventilation naturelle assistée et nécessite une étude thermo-aéraulique poussée.

-Les frais d'exploitation de la ventilation naturelle

Ils sont faibles, car il n'y a que la maintenance à effectuer, et éventuellement, la consommation des actionneurs dans le cas d'un système automatisé d'ouverture des fenêtres. En ce qui concerne les frais d'exploitation d'un système mécanique, ils seront également plus importants si le système est à double flux plutôt qu'à simple flux. L'impact économique du système de ventilation est important, et il faut considérer l'impact sur l'investissement et sur l'exploitation, qui sont deux choses distinctes (tenir compte du coût de l'exploitation, des performances espérées, et des coûts d'étude).

Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons vu que les enjeux de la ventilation naturelle dans les bâtiments d'habitation collectif sont déterminants pour le confort des habitants.

Ainsi, en conjuguant à la fois les exigences sanitaires, le confort thermique et l'efficacité énergétique, la ventilation naturelle constitue la clé de voûte d'une conception durable qui assure le bien-être de l'homme tout en préservant son environnement.

L'analyse du fonctionnement des dispositifs de ventilation naturelle dans l'architecture traditionnelle a démontré que des solutions bioclimatiques, basées exclusivement sur les moteurs naturels du déplacement de l'air, peuvent être efficaces et constitue une source d'inspiration pour des stratégies de ventilation naturelle actuelle.

D'un autre côté, L'analyse de bâtiments de référence a révélé qu'une ventilation naturelle assistée permet d'atteindre l'efficacité d'une VMC pour un coût énergétique et économique nettement inférieur.

Le recours à des dispositifs mécaniques afin de compléter les moteurs naturels de l'écoulement de l'air (tirage thermique, vent) a démontré, à travers la VNAC (Ventilation Naturelle Assistée et Contrôlée) que la combinaison des principes du fonctionnement des dispositifs passifs de l'architecture traditionnelle avec les technologies actuelles peut s'avérer une voie vers des solutions durables de ventilation naturelle.

Chapitre III : La cage d'escalier dans les stratégies de ventilation naturelle.

Dans ce chapitre, nous avons élaboré un état de l'art autour de l'intégration de la cage d'escalier dans les stratégies de ventilation naturelle.

Dans la première partie, nous avons exposé notre approche du bâtiment en tant que système de ventilation, dans lequel la cage d'escalier est considérée comme un conduit vertical.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons analysé des exemples de bâtiments contemporains où la cage d'escalier constitue un élément déterminant dans leurs stratégies de ventilation naturelle.

I. Approche architecturale d'un dispositif de ventilation naturelle

I.1. Grille de lecture architecturale d'un système de ventilation

Dans ce point, nous nous intéressons à l'architecture de l'espace intérieur d'un bâtiment en tant que paramètre déterminant dans la ventilation naturelle. Ainsi une réflexion sur la relation entre la topologie (géométrie) du volume intérieur d'un bâtiment et son comportement thermo--aérodynamique est primordiale pour la maîtrise des écoulements d'air d'une pièce à une autre (nous avons bien vu que la forme architecturale peut être très efficace dans la canalisation des flux d'air dans les Badgir iranien).

Cette relation forte entre formes architecturales et ventilation naturelle a été mise en exergue par Y. Mansouri dans sa thèse de doctorat (*Figure 90*), exposant ainsi une grille d'analyse morphologique des dispositifs de ventilation naturelle en s'appuyant sur des exemples de bâtiments références en la matière (Mansouri, 2003).

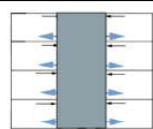
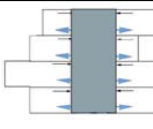
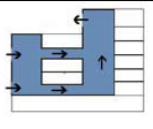
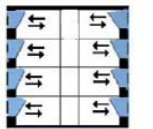
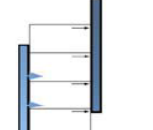
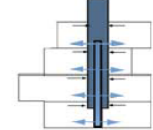
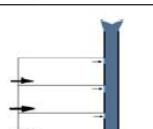
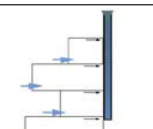
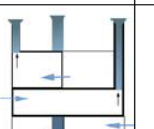
Analyse topologique					
Analyse typologique	Les structures de figures à bases identiques	Les structures de figure à base similaires	Les structures de figures à bases différentes		
Espace de transition					Contact surfacique
Ouvertures					
Conduits					Contact ponctuel
Cheminées					
	Structures tramées	Structures d'éloignement		Structures de chevauchement	

Figure 90: Grille d'analyse morphologique du système de ventilation (Mansouri, 2003)

Cette analyse permet d'approcher, d'une façon plus objective, un bâtiment suivant la structure de ses différents composants (travé, de chevauchements, d'éloignement) , leurs typologies (espaces de transition, cheminées, conduit, ouvertures) et leurs topologies (figure de base identique ou différente), ainsi qu'à la nature des contacts existant entre chacun de ses éléments (surfacique, ponctuel). L'organisation spatiale et la composition architecturale d'un bâtiment sont déterminantes pour l'écoulement d'air à l'intérieur de celui-ci, ainsi une étude morphologique des différentes parties du bâtiment et du type de relations qui les lient est nécessaire pour mieux cerner les mécanismes thermo-aérauliques qui régissent les flux d'air entre les différents espaces.

C'est sur cette base qu'une topologie des dispositifs de ventilation naturelle a été proposée dans la thèse de Y. Mansouri. Les espaces intérieurs sont classés selon leur morphologie, leur rôle dans la ventilation naturelle et leur fonction, comme suit ; les espaces de transition, les cheminées, les conduits de ventilation, les ouvertures (Mansouri, 2003).

Nous nous intéressons particulièrement aux espaces de transition dans le cadre de notre travail de recherche dont la cage d'escalier constitue l'élément le plus répandu dans l'habitat collectif.

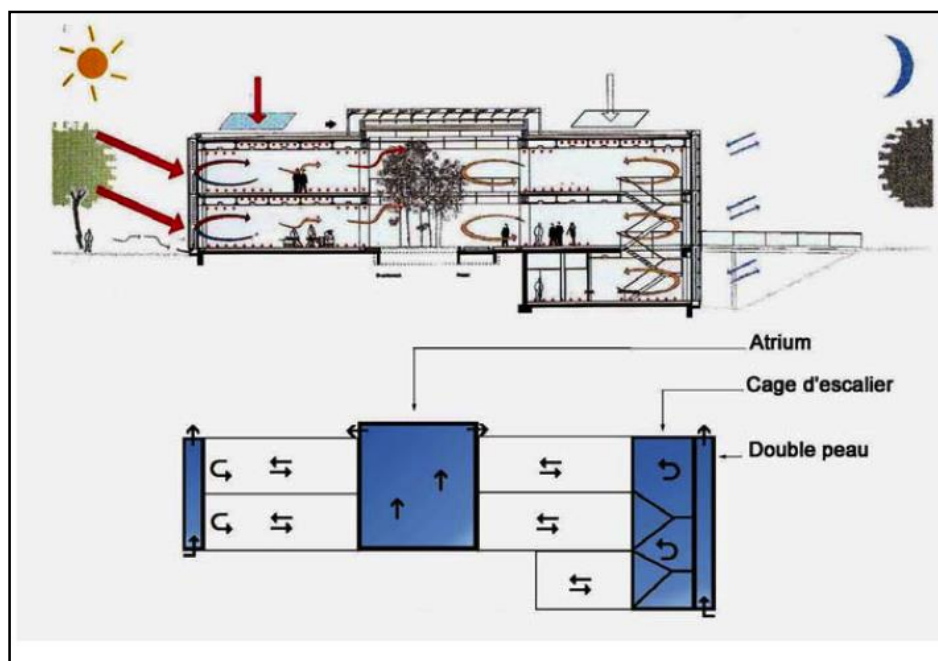


Figure 91: Stratégie de ventilation naturelle basée sur les espaces de transition Immeuble "Götz GmbH (Mansouri, 2003)

I.2. Le bâtiment en tant que système

Dans notre approche, nous appréhendons, par analogie, le bâtiment en tant qu'un système. Nous entendons par système "un *ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but*". (De Rosnay, 1975)

C'est sur la base de cette définition empruntée à Joël de Rosnay²⁶-- que se base cette analogie. À cet égard, les éléments qui constituent le système bâtiment sont les parois, les ouvertures, la toiture..., et L'interaction dynamique englobe tous les échanges physiques avec l'environnement extérieur (thermiques, aérauliques...).

C'est à nous architectes d'organiser ces différents éléments de manière à répondre à un but ultime qui est celui du confort de l'usager.

I.2.1. Analogie, bâtiment/système de ventilation

Ainsi, nous considérons un bâtiment comme un système aéraulique composé de plusieurs éléments de différentes natures (parois, ouvertures, espaces intérieurs, toiture...) agencés (organisation spatiale, configuration architecturale, morphologie...) en fonction d'une finalité précise (ventilation efficace). Ces éléments s'interagissent (flux d'air...) et constituent un ensemble cohérent séparé par une frontière (parois extérieures, ouvertures) de son environnement, avec lequel il établit des échanges dynamiques (fluctuation dans le temps).

Cette analogie nous permet, tout au long du processus de conception, d'approcher la problématique de la ventilation naturelle d'une manière plus globale et d'apprécier l'impact de nos choix architecturaux sur le comportement thermo-aéraulique du bâtiment et d'anticiper d'éventuelles conséquences négatives (court-circuit, espace mal ventilé...).

Cette approche nous éviterait de tomber dans des solutions de ventilation isolées qui peuvent induire des anomalies une fois remises dans leur contexte (système bâtiment).

²⁶ Cette définition est tirée du livre de Joël De Rosnay, "Le macroscopie, Vers une vision globale", 1975.

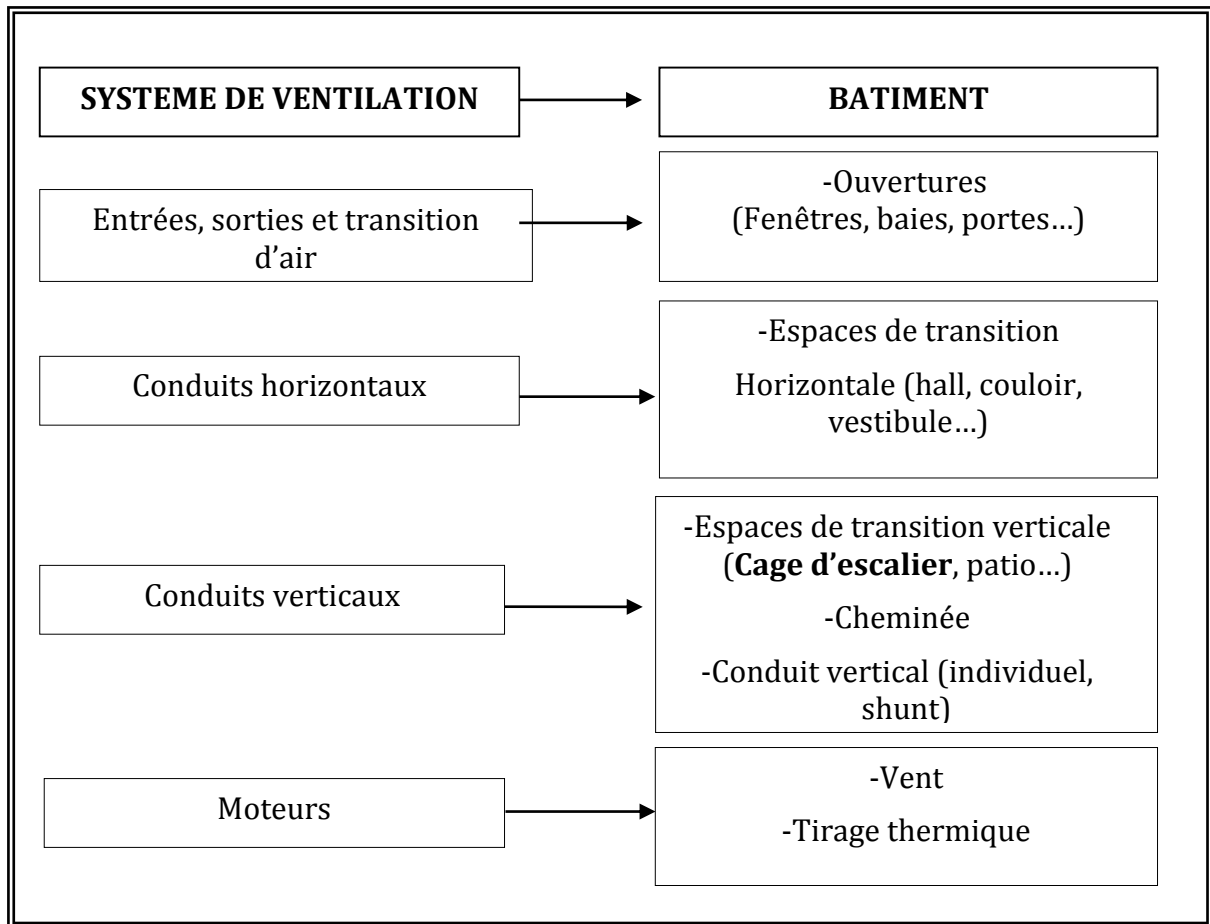


Figure 92: Analogie bâtiment - système de ventilation naturelle (source : Auteur)

I.2.2. La cage d'escalier en tant que conduit vertical

Dans un bâtiment, l'écoulement d'air peut être maîtrisé par un agencement réfléchi de tous les éléments qui le composent. Nous avons vu que les espaces de transition, de par leur fonction et leur morphologie, fonctionnent comme des conduits d'air dans le système de ventilation naturelle que représente le bâtiment.

C'est sur la base de cette réflexion que s'est construite notre problématique autour de la cage d'escalier en tant qu'un espace de transition qui assure une liaison verticale entre les différents niveaux d'un bâtiment, permettant ainsi d'établir une relation entre les différents volumes d'air de chaque étage et créer des mouvements d'air verticaux (ascendant, descendant) par le biais du tirage thermique et de la pression du vent (différence de pression).

De ce fait, une réflexion autour de la conception de cet espace s'avère très utile pour renforcer la ventilation naturelle dans un édifice en l'intégrant dans un système de ventilation naturelle global dont fait partie chaque composant du bâtiment.

À côté de l'ascenseur, la cage d'escalier est devenue un espace inévitable dans les bâtiments collectifs à usage d'habitation, du fait de sa fonction de circulation verticale. Un état des lieux sur l'habitat collectif en Algérie montre clairement que l'espace de transition verticale le plus répandu est la cage d'escalier²⁷, un espace souvent standardisé et négligé car la seule considération prise en compte lors de sa conception est sa fonction de circulation verticale.

C'est dans cette optique que nous proposons une nouvelle approche de la cage d'escalier, non plus en tant qu'un espace de circulation verticale seulement, mais aussi comme conduit vertical qui s'inscrit dans un système de ventilation naturelle qui est le bâtiment dans son ensemble.

Dans le but d'apprécier les potentialités que la cage d'escalier peut avoir en termes d'apport dans une ventilation naturelle, nous avons analysé dans ce qui suit des bâtiments, qui sont des exemples de référence, dont la stratégie de ventilation naturelle intègre la cage d'escalier en tant qu'élément primordial pour son fonctionnement. Le but de cette analyse est d'apprécier la cage d'escalier dans différentes situations (contexte climatique, ventilation recherchée...), afin d'en tirer des enseignements sur son comportement thermo-aéraulique dans un bâtiment.

²⁷ Les escaliers sont inscrits souvent dans une cage, le recours à des patios et des atriiums dans l'habitat collectif en Algérie est rare et ceux-ci est dû à des impératifs d'économie de surface et de rentabilité.

II. Cage d'escalier intégrée dans des stratégies de ventilation naturelle

À travers cette partie, nous procédons à un état de l'art des bâtiments dans lesquels la cage d'escalier est intégrée dans une stratégie de ventilation naturelle, et constitue un élément indispensable au bon fonctionnement de cette dernière. Nous nous basons sur des exemples de recherches et de projets contemporains de par le monde, dans le but de cerner le rôle que peut jouer cet espace dans l'optimisation et le contrôle de l'écoulement d'air dans un bâtiment.

II.1. Cage d'escalier comme cheminée d'extraction : "Siège de Bang & Olufsen"

Le bâtiment du siège social de la société de Bang & Olufsen²⁸, situé dans la périphérie de la ville de Struer au Danemark, a été conçu par KHR Arkitekter (*Tommy Kleiven et l'architecte principal de ce bureau d'architecture Danois*) et construit en 1998 sur un grand champ entouré par un paysage rural. L'édifice est très renommé grâce à sa stratégie ingénieuse de ventilation naturelle assistée. Le bâtiment se développe sur 3 étages avec une hauteur totale de 12 m, et se compose de trois volumes parallélépipèdes organisés en forme de U. Cette disposition n'est pas une conséquence directe du concept de ventilation naturelle, même si les volumes intérieurs des ailes sont plus faciles à ventiler grâce à leur forme allongée et étroite (espaces peu profonds).



Figure 93: Bâtiment Bang & Olufsen. Source : <http://www.khr.dk/>

²⁸ Bang & Olufsen est une société commerciale danoise fondée en 1925 à Quistrup près de Struer au Jutland-Central. Cette société conçoit et fabrique des appareils et produits audiovisuels haut de gamme.

Dans le but de mettre au point une stratégie de ventilation naturelle efficace, les ingénieurs ont utilisé des simulations CFD²⁹ pour évaluer l'effet et les variations de la pression différentielle engendrés par le vent sur l'enveloppe du bâtiment.

En étudiant la géométrie du bâtiment, il a été possible de déterminer l'ampleur de la différence de pression créée par le vent entre l'entrée et la sortie, et donc de quelle manière l'air circulerait à travers le bâtiment.

Celui-ci a été conçu de telle sorte à fonctionner lui-même comme un conduit de ventilation énorme. L'air vicié est extrait à travers deux cages d'escalier par tirage thermique suivant le principe d'une cheminée (Kleiven, 2003).

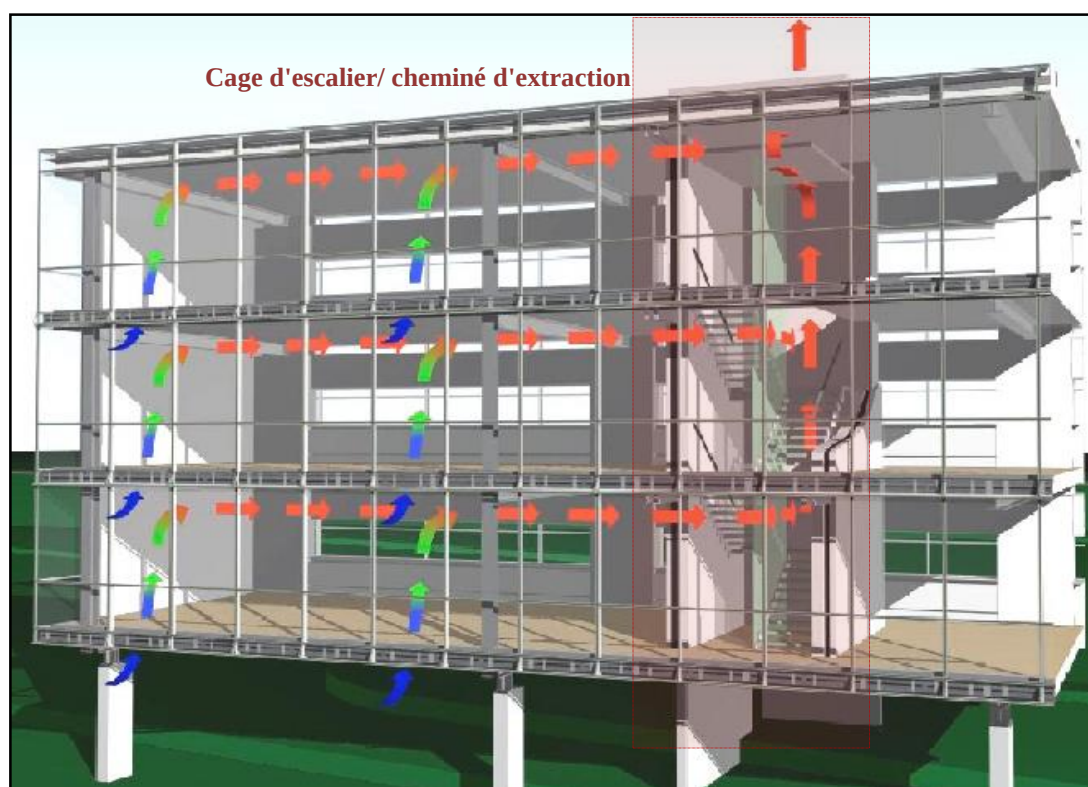


Figure 94: Principe de la ventilation naturelle assistée du Bâtiment Bang & Olufsen. (Fait par Birch & Krogboe A/S.) Source : <http://theses.ulaval.ca> Réadaptée par l'auteur

²⁹ CFD (Computational Fluid Dynamics) est un code qui se base sur une subdivision du bâtiment en un grand nombre de sous-volumes (plusieurs milliers de mailles et de zones), et permet de modéliser et de simuler le déplacement de l'air à l'intérieur.

Sur le toit de chaque cage d'escalier, un caisson d'extraction (*Figure 95 A*) est conçu d'une manière à s'adapter à la direction du vent, utilisant ainsi sa force pour aspirer l'air vicié de l'intérieur du bâtiment, ce qui crée une dépression permettant ainsi à l'air frais de pénétrer dans le bâtiment par des entrées positionnées sur le vitrage de la façade nord.

Dans le cas où le tirage thermique et le vent seraient insuffisants des ventilateurs d'extraction (*Figure 95 B*) sont intégrés dans ce dispositif pour maintenir le taux de renouvellement d'air souhaité.

Les escaliers (*Figure 95 C*) sont conçus d'une façon à réduire leur résistance aux flux d'air, de ce fait, les contremarches sont évidées afin d'augmenter leur perméabilité à l'air. (Kleiven, 2003).



Figure 95: Caisson d'extraction, Ventilateur, Escalier. Source : www.ieemaster.civil.aau.dk

II.2. Cage d'escalier intégrée dans un dispositif de capteur à vent

Une étude effectuée par Dr H. Altan, directeur de recherche à l'université de Sheffield, sur l'intégration des capteurs à vent dans les bâtiments résidentiels modernes menée à Larnaca à Chypre, à démontrer que l'installation d'un capteur à vent au-dessus d'un escalier situé au milieu d'un bâtiment³⁰, jumelée à une isolation efficace, peut réduire d'une manière significative la température intérieure la nuit en été, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie (Altan, et al., 2012).

³⁰ Le cas d'étude choisi est un bâtiment résidentiel de deux étages situé dans la ville de Larnaca à Chypre. Il a été construit il y a près de cinq ans. Les dimensions du rez-de-chaussée sont 14.95m × 14.85m et le premier étage a des dimensions de 11.90m × 14.85m. La hauteur des chambres est d'environ trois mètres sur chaque étage.

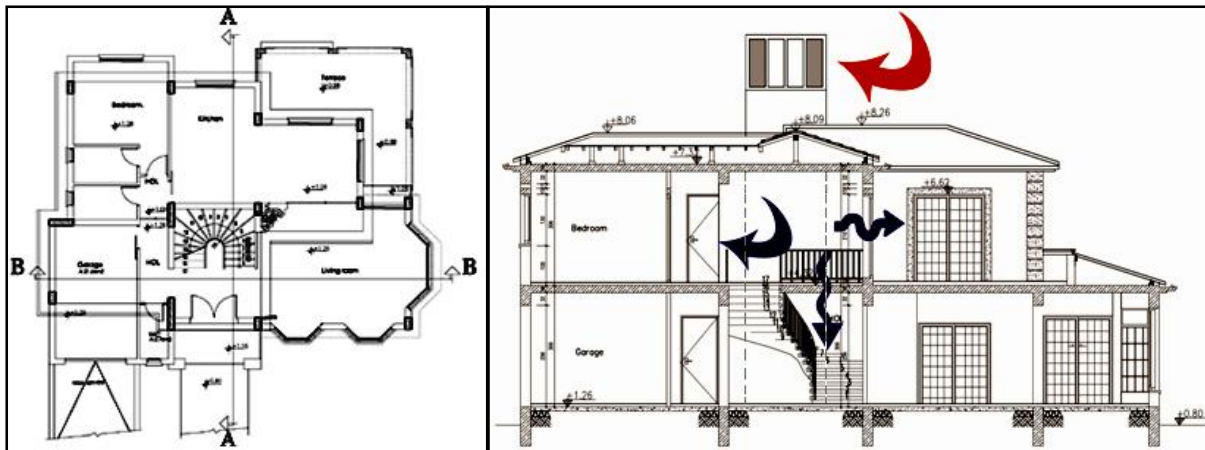


Figure 96: Plan du RDC et direction des flux d'air sur la section "AA» [(Altan, et al., 2012)

Les différentes simulations thermo-aérauliques effectuées pour la journée la plus chaude de l'année (13 août) ont démontré qu'en milieu de la journée le capteur à vent ouvert de tous les côtés accentue les surchauffes à l'intérieur de l'habitation en canalisant vers l'intérieur le vent sud chaud d'été. Une isolation efficace et une diminution des ouvertures du côté sud (vent chaud dominant d'été) ainsi qu'une adaptation du capteur à vent (possibilité de fermeture du côté sud, utilisation d'une cheminée solaire) peuvent assurer une ventilation appropriée pendant la journée et ainsi contribuer au confort thermique à l'intérieur de l'habitation (Altan, et al., 2012).

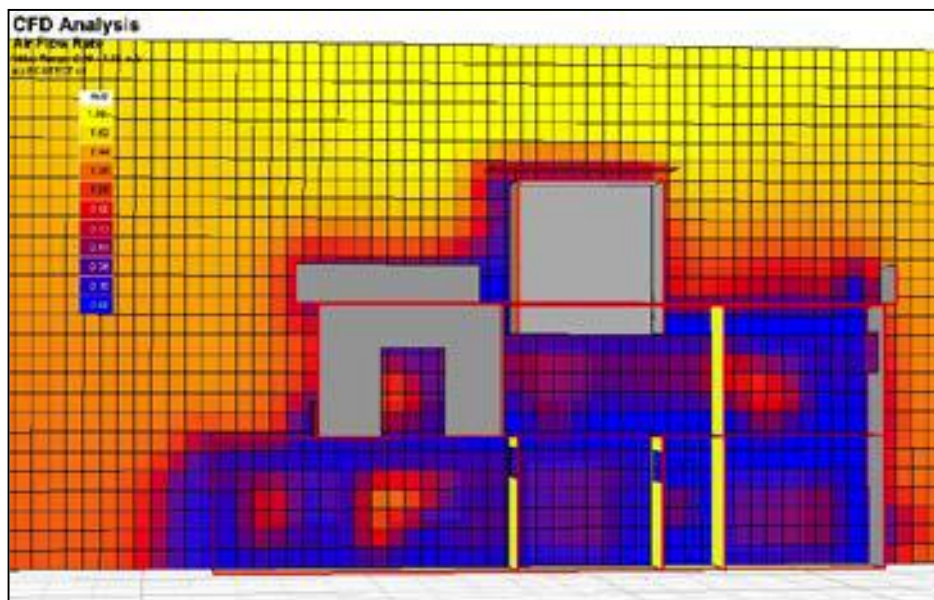


Figure 97: Profil des flux d'air après intégration de la tour à vent (Altan, et al., 2012)

II.3. Cage d'escalier "tour de ventilation naturelle" : Inland Revenue Centre Campus

Castle Meadow, Nottingham, UK (*Michael Hopkins & Partner*. www.hopkins.co.uk)

Conçu par Michael Hopkins & Partner, **Inland Revenue Centre** est un complexe composé de sept bâtiments distincts dont la disposition forme des boulevards bordés d'arbres. Tous les bâtiments sont ventilés naturellement, ce qui fait de ce projet un exemple en matière de stratégie de ventilation naturelle assistée, dans laquelle la cage d'escalier joue un rôle primordial dans son bon fonctionnement.



Figure 98: Inland Revenue Centre Campus Source : www.hopkins.co.uk

La stratégie de ventilation naturelle assistée développée dans ce projet est basée sur plusieurs cages d'escalier en forme de tour de ventilation naturelle. Placées dans chaque coin des différents bâtiments composants le complexe, ces tours sont entièrement vitrées afin d'accentuer le tirage thermique en réchauffant l'air par effet de serre, une dépression est ainsi créée à l'intérieur de chaque tour, et permet d'aspirer l'air vicié intérieur.

Par conséquent, le circuit de l'air est bien contrôlé et suit le circuit illustré dans la *Figure 99* et ce comme suit :

1. L'air frais, provenant de l'extérieur du bâtiment et du sous-sol pénètre par des grilles d'aération dotées de ventilateurs contrôlés manuellement ;

2. Il traverse dans les espaces de bureaux à travers les portes et les fenêtres (ventilation transversale) ;
3. L'air chaud est aspiré par effet cheminée à travers une tour d'escalier vitrée, le gain solaire à l'intérieur de cette tour accentue l'effet de tirage thermique ;
4. En fin, l'air vicié est évacué par le toit qui s'ouvre automatiquement quand la température intérieure dépasse un certain seuil et ça permet aussi de régler les débits d'air extraits.

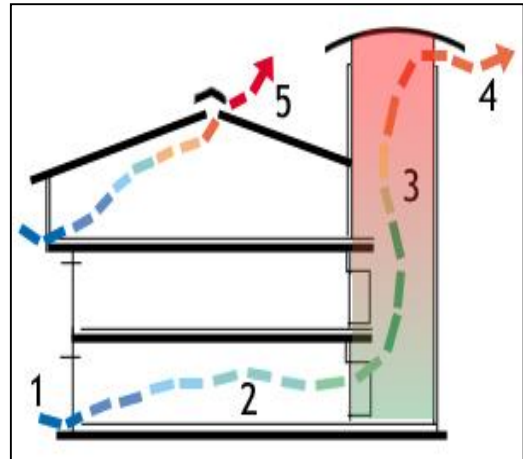


Figure 99: Principe de la stratégie de ventilation naturelle d'Inland Revenue Centre.
Source : <http://gaia.lbl.gov/>

Afin de maintenir une ventilation adéquate dans les trois étages inférieurs, le quatrième étage, qui est le dernier, est isolé de la tour d'escalier par des portes étanches à l'air. Cependant le fait que le toit de cet étage, doté de lucarne, n'est pas suffisamment incliné à induit des surchauffes en été ce qui implique un inconfort pour les usagers. En ce qui concerne les étages inférieurs, la seule gêne relevée est l'existence, parfois, de courants d'air dus à un tirage thermique important.

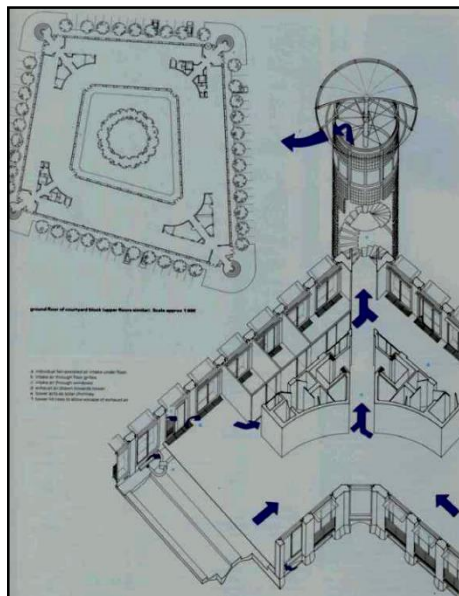


Figure 100: schéma de ventilation Source : Architectural record, mai, 1995



Figure 101: tour de ventilation naturelle source : <http://cmiserver.mit.edu>

II.4. Cage d'escalier dans une opération de rénovation : Rénovation de "Piet Bloms"

Rotterdam, (*Personal Architecture*. www.personal-architecture.nl)

Cet exemple est une rénovation d'un bâtiment constitué de logements en forme de cube dans le but de créer une résidence pour délinquants en fin de détention.

Afin de remédier à une faible articulation entre les différents niveaux et d'améliorer la qualité de la circulation verticale tout en renforçant l'éclairage naturel, un vide de 3×3m a été créé au cœur du bâtiment sur toute sa hauteur dans lequel une nouvelle cage d'escalier a été intégrée.



Figure 102: (A) vue extérieure, (B) Atrium, (C) plan de l'atrium.

Source : www.personal-architecture.nl

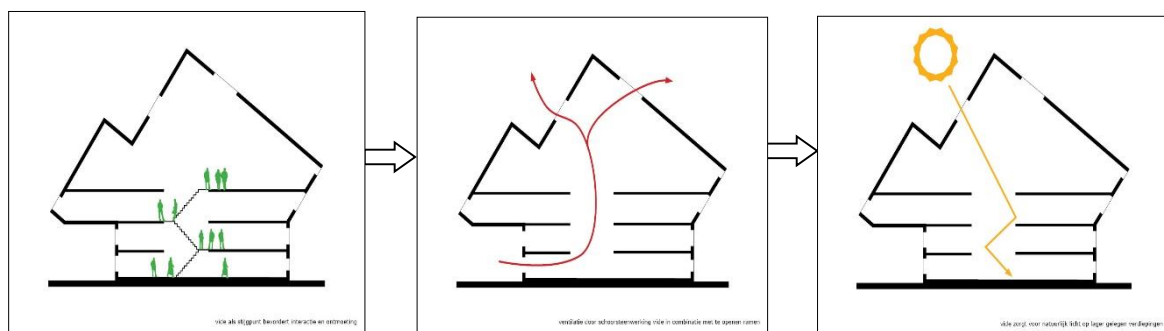


Figure 103: Coupes schématiques sur l'atrium, transition verticale usagers, flux d'air, lumière naturelle

Source : <http://www.dezeen.com/> réadaptée par l'auteur

La création de ce nouvel espace (vide + cage d'escalier), conçu sous forme d'atrium, assure un écoulement d'air ascendant induit par un "Effet Cheminée" ce qui a permis de renforcer considérablement la ventilation naturelle des espaces intérieurs disposés tout autour de cet atrium. Ainsi, dans cette rénovation, la cage d'escalier ne se résume pas à la seule fonction de transition verticale des usagers mais aussi de l'air et de la lumière naturelle.

II.5. Cage d'escalier : combinée avec une façade végétale : "Stacking Green"

Saigon, Vietnam (Vo Trong Nghia Architects.
<http://votrongnghia.com>)

Le nom de la maison "Stacking Green"³¹, est dû à ses façades entièrement composées de rangées de plantations foisonnantes sous forme de Jardinières en béton.

Celles-ci s'étendent entre les parois latérales pour couvrir les façades avant et arrière, et sont espacées suivant la hauteur des plantes.



Figure 104: Cage d'escalier avec façade végétale

Source : <http://votrongnghia.com>

³¹ La maison verte Stacking Green Hous, conçue par l'architecte Vo Trong Nghia, à Saigon au Vietnam dans un climat tropical. Pour un couple et leur mère, est construite sur un terrain étroit de 4m de largeur et de 20 m de profondeur d'où sa forme allongée. Ce projet a remporté le prix «Building de l'année 2012» dans la catégorie «Maison» du magazine d'architecture américain "Archdaily".

Un système de tuyaux d'irrigation automatique assure leur arrosage. Cette façade verte sert à la fois de protection solaire et atténue la pollution et le bruit provenant de la rue. Mais nous nous intéressons plus particulièrement à la position de la cage d'escalier dans la stratégie de ventilation naturelle de cette maison située dans un climat tropical.

Située entre les rangées de plantes et la paroi de la maison, dans une sorte d'espace semi-extérieur séparé de l'intérieur de la maison par un vitrage, afin de favoriser la circulation de l'air dans la maison en mettant en contact direct les espaces intérieurs avec cette zone tampon.

L'espace constitué de la cage d'escalier associée à une façade végétalisée permet de rafraîchir l'air par évapotranspiration des plantes et par effet d'ombrage ainsi qu'une circulation optimale de l'air à l'intérieur des espaces de vie, qui est recherchée dans les climats chauds et humides (tropical)

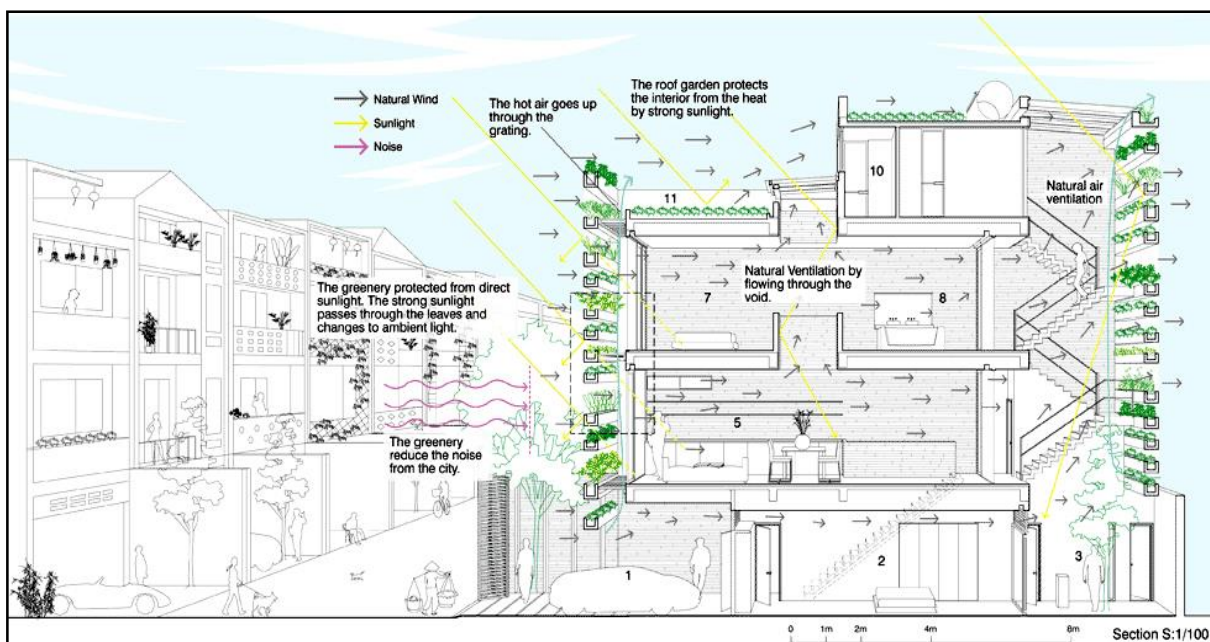


Figure 105: Schémas de ventilation naturelle "Stacking Green" Source : <http://www.dezeen.com>

Conclusion

A travers ces exemples, nous avons pu constater les possibilités qu'offre la cage d'escalier en termes de conception architecturale et les formes et les positions qu'elle peut avoir afin d'être intégrée dans différentes stratégies de ventilation naturelle.

De la cheminée d'extraction du siège de «*Bang & Olufsen*», passant par la tour de ventilation naturelle de "*Inland Revenue Centre Campus*" jusqu'à l'exemple de "*Stacking Green*", nous avons vu comment la cage d'escalier, dans plusieurs situations et sous diverses formes architecturales, peut contribuer considérablement dans différentes stratégies de ventilation naturelle sous divers contextes climatiques.

Il est clair qu'il doit exister d'autres exemples aussi riches qu'originaux que ceux cités auparavant qui recèlent encore plus d'enseignements et servent de laboratoires à grandeur réelle aux architectes et aux ingénieurs pour s'en inspirer dans le but de développer de nouvelles solutions bioclimatiques en matière de ventilation naturelle.

Chapitre IV : Évaluation de l'apport de la cage d'escalier dans la ventilation naturelle d'un habitat collectif en Algérie par simulation thermo-aéraulique

La première partie de ce chapitre consiste en une introduction dans la simulation numérique dans le bâtiment qui sert de base théorique pour la deuxième partie.

La deuxième partie est dédiée à l'évaluation de l'apport de la cage d'escalier dans différentes stratégies de ventilation naturelle, et ceci à travers une série de simulations sur deux modèles de bâtiments représentatifs de l'habitat collectif en Algérie, et ceci selon deux contextes climatiques ; celui d'Alger et de Biskra. Cette évaluation s'est effectuée sur la base de simulations thermo-aérauliques réalisées avec le logiciel ECOTECT ANALYSE 2011 couplé à WINAIR4, suivant différents scénarios.

I. Introduction aux simulations numériques de bâtiments

La complexité et la variabilité des paramètres (géométrie de l'édifice, température, vitesse et pression du vent, contexte matériel environnant...) qui entrent en jeu dans l'étude du comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment ne peuvent être appréhendées par des schémas simplistes qui risquent de nous induire en erreur. A cet égard, et dans le but d'inclure le maximum de variables, le recours à la modélisation mathématique et numérique est inévitable. Basées sur des équations mathématiques complexes, plusieurs méthodes de modélisation ont été développées dans le but de cerner, de la manière la plus précise possible, les différents comportements d'un bâtiment en régime dynamique. Ainsi la modélisation numérique d'un bâtiment et de son environnement, et la simulation informatique de son comportement thermique et aéraulique deviennent un outil incontournable pour les architectes et les ingénieurs dès les premiers stades de conception.

I.1. Modèle et modélisation

Le comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment en régime dynamique ne peut être étudié que par la prise en compte de toute la complexité du système³² bâtiment-environnement, dans ce cas le recours à la modélisation est inéluctable.

La définition de la modélisation que nous jugeons la plus adaptée à notre cas est celle de Le Moigne³³ qui la décrit comme l'"Action d'élaboration et de construction intentionnelle, par composition de symboles, de modèles susceptibles de rendre intelligible un phénomène perçu complexe, et d'amplifier le raisonnement de l'acteur projetant une intervention délibérée au sein du phénomène ; raisonnement visant notamment à anticiper les conséquences de ces projets d'actions possibles" (Boyer, 1993).

³² Pour la définition du mot **Système**, on retient de **J Rosnay** proposé par **Harry Boyer** dans sa thèse de doctorat celle d'un *ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but*. Une définition que nous jugeons adéquate pour appréhender le caractère dynamique du comportement thermo-aéraulique d'un bâtiment et son environnement, faisant partie d'un système.

³³ **Jean-Louis Le Moigne** est professeur de sciences des systèmes à l'université d'Aix-Marseille III. Ingénieur ECP, après douze années de pratique dans un grand groupe industriel français et une année sabbatique au MIT et à Harvard (1971), il se consacre à l'enseignement et à la recherche dans le domaine des "nouvelles sciences" : science de la décision, systèmes d'information, sciences de l'organisation, intelligence artificielle et systémique

On entend par modèle toute représentation mathématique, graphique ou numérique des relations qui existent ou qui peuvent éventuellement exister, entre des phénomènes et/ou des éléments faisant partie d'un même système réel afin de simplifier son étude, ainsi à titre d'exemple les modèles en ventilation naturelle permettent d'évaluer le débit et la direction de l'air échangé, sans moyen mécanique, entre le bâtiment et son environnement extérieur en fonction des caractéristiques architecturales, climatiques et thermiques (Boivin, 2007).

I.2. Les types de modèles

Selon la complexité et la nature du problème posé et de l'objet d'étude, il existe différentes approches de la modélisation du comportement dynamique d'un bâtiment :

I.2.1. Modèles monozones

C'est l'approche la plus simple, elle considère tout l'intérieur du bâtiment comme une seule zone dont les caractéristiques sont uniformes (température, pression, concentration de polluants...) et sur laquelle agissent un ensemble de paramètres extérieurs (conditions climatiques, topographie du site...).

L'avantage de ces modèles c'est qu'ils sont relativement faciles à utiliser et ne nécessitent que des données générales sur l'enveloppe du bâtiment (conductivité, capacité thermique, perméabilité, ...), le système de ventilation ou de chauffage (puissance disponible, système de régulation, débits extraits, ...) et l'inertie (parois internes, mobilier, ...) (Woloszyn, 1999).

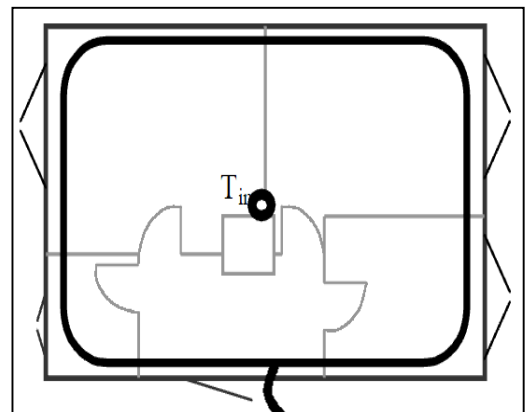


Figure 106: Model monozone (Woloszyn, 1999)

Les modèles monozones sont généralement utilisés dans le bâtiment pour l'estimation des consommations énergétiques, mais ils ne sont pas efficaces dans les cas d'une évaluation précise du confort, lorsqu'on enregistre des écarts considérables de température dans les différentes pièces du bâtiment et quand on cherche une donnée locale et plus précise (température moyenne dans une pièce, puissance nécessaire pour chauffer une pièce, ...).

Ils constituent une approche intéressante et permettent de se faire une bonne idée du fonctionnement global d'un bâtiment. La première version du logiciel CODYBA³⁴ fonctionne à base de modèle monozone.

I.2.2. Modèles multizones

Un modèle multizone ou modèle nodal représente le bâtiment par un ensemble de nœuds. Chaque nœud correspond à une zone qui représente en réalité une pièce ou l'extérieur par exemple, celle-ci est définie par des caractéristiques uniformes (température, pression...). La liaison entre les zones est constituée par des ouvertures par lesquelles transite l'air (portes et fenêtres, entrées d'air, défauts d'étanchéité de l'enveloppe...) (Trocmé, 2009).

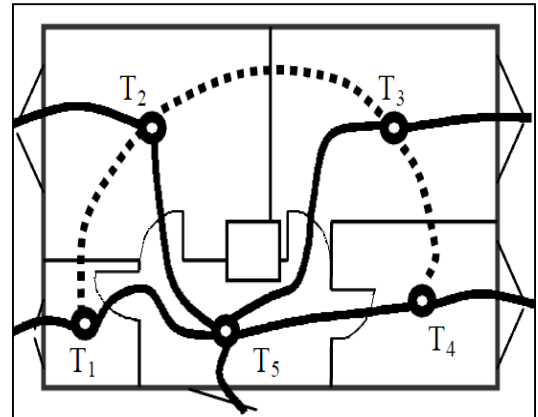


Figure 107: Model multizones (Trocmé, 2009)

La modélisation multizone constitue un bon compromis entre les modèles monozones et le CFD, aussi bien au niveau des temps de calcul que de la précision des résultats. Elle est particulièrement adaptée pour simuler des logements complets, voire même des bâtiments entiers. Elle est basée sur l'hypothèse des caractéristiques uniformes de l'air à l'intérieur de chaque pièce.

De ce fait, elle montre ses limites dans le cas d'une forte hétérogénéité de l'air à l'intérieur d'une pièce. Les logiciels se basant sur les modèles multizones sont très nombreux et peuvent être classés en trois catégories :

- **Les outils énergétiques** : modélisent le comportement thermique. Ils fournissent les températures dans chaque zone et permettent d'estimer les puissances consommées pour chauffer ou refroidir le bâtiment. Les débits infiltrés ou échangés entre les pièces peuvent être intégrés dans le calcul en tant que paramètres. Parmi

³⁴ **CoDyBa** est un logiciel, développé par un ingénieur en informatique avec l'aide de quelques chercheurs du **CETHIL** (Centre de Thermique de l'INSA de Lyon, [CET]) (CoDyBa a été créé à l'origine par J.-J. ROUX, chercheur à l'Université. La version multizones sous Windows ont été développées par Jean NOEL.)

les logiciels les plus répandus nous pouvons citer : *TRNSYS*, *COMFIE-PLEIADES*, *SimSPARK*, *EnergyPlus*, *DOE-2*, *ECOTECT*, etc.

- **Les outils aérauliques** : permettent de calculer les débits et la variation du mouvement d'air à l'intérieur d'un bâtiment en intégrant les effets relatifs au vent et au tirage thermique (convection naturelle). Ils permettent également d'évaluer la qualité de l'air dans les bâtiments. Parmi les logiciels les plus utilisés dans cette catégorie, on trouve : *CONTAM*, *COMIS*.
- **Les outils thermo-aérauliques** : De nombreux codes proposent des simulations mixtes thermo-aérauliques tels que : *BILGA*, *BREEZE*, *ESP-r*, *CODYRUN*. De même, on peut noter la récente possibilité de coupler deux logiciels complémentaires, *TRNSYS* et *COMIS* et *ECOTECT* avec *WINAIR 4*.

Le premier logiciel est dédié uniquement à l'étude des transferts thermiques dans la structure du bâtiment, le second logiciel traite des transferts aérauliques, y compris les transferts de polluants. On obtient ainsi une représentation complète du comportement thermique et aéraulique d'un bâtiment.

Pour tous ces logiciels, dont les zones sont définies lors du découpage, on considère que la température et la masse volumique de l'air sont uniformes tandis qu'on admet une variation hydrostatique de la pression (Musy, 1999).

1.2.3. Modèles zonaux

Dans le cas d'une forte variation thermique dans la même pièce du bâtiment, les modèles zonaux sont plus adaptés, car chaque pièce est découpée en plusieurs sous-zones. Ces dernières dépendent des écoulements dans chaque pièce (présence des jets de ventilation, des panaches thermiques, ...).

Les modèles zonaux permettent de représenter correctement les pièces avec une forte stratification thermique. En revanche, ils nécessitent une bonne connaissance de la configuration représentée et en

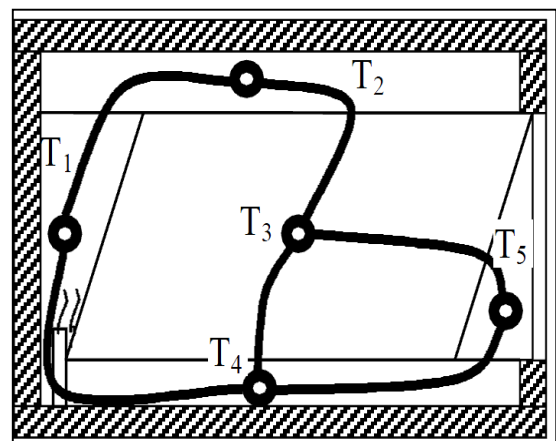


Figure 108: Model zonal (Woloszyn, 1999)

particulier des écoulements moteurs. Une difficulté de cette modélisation résulte de la nécessité de construire le maillage (les zones) en fonction des propriétés de l'écoulement.

Les modèles zonaux sont adaptés à l'étude d'un local, même de taille importante, ou bien d'un ensemble comportant un nombre faible de pièces. Mais, dans le cas des configurations géométriques complexes, ou de changement de comportement aéraulique, ils montrent certaines limites.

I.2.4. Modèles de codes de champ ou codes CFD

Les **codes de champ** ou code **CFD** (*Computational Fluid Dynamics*) se base sur une subdivision du bâtiment en un grand nombre de sous-volumes (plusieurs milliers de mailles et de zones) par une série d'équations qui sont résolues par discrétisation spatiale et par analyse numérique, suivant une construction géométrique.

Grâce à une haute résolution spatiale, les **CFD** peuvent représenter les formes architecturales les plus complexes, et étudier l'évolution du comportement thermo-aéraulique d'un volume d'air dans toute sa complexité (variation des mouvements d'air et des températures) à l'intérieur de chacune des pièces d'un bâtiment.

L'inconvénient de ces codes c'est qu'ils nécessitent un long temps de calcul et des ordinateurs très puissants, ce qui limite la taille des modèles à calculer (Woloszyn, 1999). Les codes de champs nécessitent également un utilisateur très qualifié car leur bon usage exige une parfaite compréhension des phénomènes physiques. Ainsi une bonne connaissance de l'outil est primordiale pour une utilisation optimale. Parmi les logiciels qui sont basés sur le code **CFD** nous pouvons citer entre autres : Les codes FLUENT, FLOVENT, SIMULAR AIR, PHEONICS, WINAIR 4 ...

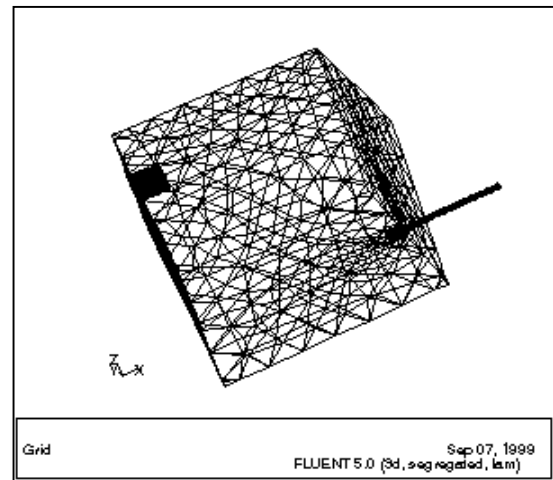


Figure 109: Codes de champ ou Codes CFD
(Woloszyn, 1999)

II. Les paramètres de la simulation

Alain Chatelet définit, pour nous architectes, la simulation numérique assistée par ordinateur en tant qu'un outil informatique : *"qui permet de valider rapidement des options fondamentales (implantation, structure, ouverture...), d'explorer et de commencer à optimiser certain choix, mais aussi d'informer le maître d'ouvrage et le convaincre éventuellement de la nécessité d'engager des coûts parfois élevés à la construction pour un meilleur confort et des charges de fonctionnement moindre (qui entraîneront un coût global plus faible)"* (Chatelet, et al., 1998). C'est dans cette optique que s'inscrit notre utilisation de l'outil informatique et de la simulation numérique, comme un outil d'aide à la conception au service de l'architecte pour asseoir ses choix architecturaux et ses intuitions esthétiques sur des bases scientifiques. Afin de mener à bien une simulation thermo-aéraulique, nous devons suivre un processus organisé en différentes phases de telle sorte à pouvoir modifier et ajuster le modèle à différents niveaux, il faut donc adopter le principe de réversibilité pour changer les scénarios suivant l'objet d'étude, toutefois on peut résumer ce processus en trois grandes étapes :

- 1- Il faut collecter les données nécessaires à la modélisation des paramètres relatifs au bâtiment et à son environnement, puis les insérer dans le logiciel de simulation, ce qu'on appelle dans le jargon informatique les **"inputs"** (Entrées). Par exemple, les fichiers météo sous format WEA, la géométrie en format DXF ou DWG.
- 2- Ensuite c'est l'étape du « **traitement des données** » via le logiciel qui structure et combine les données en fonction du type de modélisation du bâtiment et des phénomènes physiques qui rentrent en jeu. Dans cette opération de simulation, le temps de calcul est proportionnel à la complexité du modèle (Nombre de zones, géométrie du bâtiment...) et au nombre de paramètres traités (température, confort, vitesse de l'air...), mais aussi à la puissance de l'ordinateur (capacité du processeur, carte graphique, mémoire vive...).
- 3- La dernière étape est l'exploitation des fichiers **"outputs"** (**Sorties**) de la simulation, et qui peuvent être sous forme de chiffres, de graphiques, d'animations... Avant de les utiliser, il est préférable de vérifier leur fiabilité et de les confronter à d'autres données existantes (expérimentale, cas similaire, mesure sur site, ...). La lecture et l'interprétation des "outputs" est l'étape la plus importante et la plus délicate, le recours aux points de vue d'expert est également souhaitable.

II.1. Logiciel de simulation choisi : ECOTECH ANALYSE 2011 et WINAIR4

Dans le cadre de ce travail de recherche, notre choix s'est porté sur *ECOTECH ANALYSE 2011* développé par la firme américaine Autodesk, ce choix découle de plusieurs critères qui ont été pris en compte et que l'on peut regrouper comme suit :

-La nature du problème posé et des phénomènes à analyser

Dans notre cas d'étude, la problématique gravite autour de la ventilation naturelle et les phénomènes à analyser sont l'écoulement de l'air et les températures ce qui nous a poussés à combiner entre deux logiciels : ECOTECH ANALYSIS 2011 pour la simulation thermique et WINAIR4 (ver 1.4e - Jun 2005)³⁵ pour le calcul aérodynamique (CFD). (Les informations sur les licences des logiciels sont jointes en annexes 01 et 02)

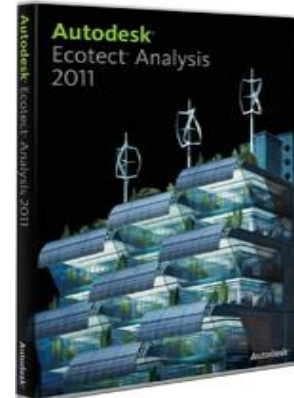


Figure 110 : Ecotech Analysis 2011
Source : <http://usa.autodesk.com>

-La disponibilité du logiciel et sa maîtrise

Ce critère est intimement lié à la réalité du terrain. Dans notre cas, le choix d'ECOTECH ANALYSIS 2011 comme logiciel principal est dû à l'ergonomie de son interface (plus accessible pour les architectes), et à sa similitude avec celui de 3DS MAX (les deux sont produits par la même société d'édition : Autodesk), et dont nous avons déjà un niveau de maîtrise avancée, car c'est l'un des outils de prédilection pour les architectes dans leur profession.

Le choix de WINAIR4 a été principalement dicté par ce critère, car son utilisation est nettement plus facile comparé à d'autres logiciels CFD tel que FLUENT ou AUTODESK SIMULATION CFD qui nécessitent un niveau de connaissances avancé ainsi qu'un temps considérable pour sa maîtrise et son utilisation pour des résultats plus précis et détaillés. Cependant, le degré de

³⁵ WINAIR4 (ver 1.4e - Jun 2005) est un logiciel de simulation CFD développé par le CRIBE (The Centre for Research in the Built Environment) de l'école d'architecture du pays de galles à l'université de Cardiff. Le champ d'exportation des données vers WINAIR 4 est intégré directement dans ECOTECH Analyse 2011. (<http://www.cardiff.ac.uk/archi/crive>).

précision de WINAIR4 correspond à l'objectif de notre travail, et notre niveau de connaissances en matière de logiciel de simulation est suffisant pour son utilisation.

-La puissance du matériel informatique disponible (le temps de calcul du logiciel)

Cette donnée est cruciale, car elle peut entraver tout le processus de simulation. La non-prise en considération de ce critère peut faire perdre beaucoup de temps voir même bloquer la simulation. Ainsi avant d'opter pour un logiciel il faut évaluer le matériel informatique qui est à notre disposition, et ainsi que le volume et la nature de la simulation envisagée, qui sont intimement liés au premier critère. Ce critère est déterminant dans le choix du couplage d'ECOTECT ANALYSIS 2011 avec WINAIR4, car ce dernier nécessite un équipement informatique standard pour effectuer le calcul CFD dans un temps relativement court.

-La fiabilité du logiciel

La cotation du logiciel et sa fiabilité ne peuvent se vérifier que par un état de l'art des travaux de recherche et des études menées en utilisant ce logiciel, ainsi qu'à travers les critiques que reçoit le logiciel par les professionnels et les experts en la matière.

Dans le cas d'ECOTECT, son utilisation est très répandue dans toutes les universités et laboratoires du monde, surtout dans les travaux de recherche anglo-saxons. Sa firme d'édition Autodesk³⁶ est une référence mondiale dans les logiciels de simulation et d'ingénierie.

Le logiciel ECOTECT offre une multitude de possibilités en termes d'analyse et de simulation dynamique sur le bâtiment, son utilisation est très répandue dans le milieu scientifique et dans la recherche universitaire. Parmi les différentes analyses qui peuvent être effectuées par ECOTECT nous pouvons citer entre autres :

- L'évaluation de l'éclairage naturel en simulant les ombres, l'éclairement et la luminosité, avec possibilité de l'associer au logiciel RADIANCE (Buhagiar, et al., 2008).

³⁶ **Autodesk** est une société d'édition de logiciels de création et de contenu numérique, elle a été fondée par John Walker avec 12 autres personnes en 1982. Aujourd'hui, son siège social se trouve à San Rafael, Californie. Elle a produit une centaine de logiciels commercialisés dans 106 pays, avec 9 millions d'utilisateurs dans le monde.

- le calcul des taux d'ensoleillement et des gains solaires (Bouffard , 2013).
- Les simulations thermiques qui permettent de calculer les gains et les déperditions thermiques, les performances des parois (conductance, résistance thermique...), et d'évaluer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments (Gezer, 2003).
- L'élaboration de stratégies de ventilation naturelle et l'étude des mouvements d'air à l'échelle urbaine, et ce à travers les possibilités de l'associer à des logiciels capables de prendre en charge la simulation aéraulique (Altan, et al., 2012).

Dans notre cas d'étude, nous avons opté pour le logiciel WinAir 4 pour les raisons suivantes :

- Il est compatible avec ECOTECH et leur couplage est facile, car un onglet spécial WINAIR 4 est prévu dans le champ d'exportation d'ECOTECH pour faciliter l'échange des données entre les deux logiciels. Son utilisation est très simple.
- WINAIR 4 est fiable car il est développé par le CRIBE (The Centre for Research in the Built Environment), centre de recherche de l'école d'architecture du pays de galles à l'université de Cardiff, qui est une référence dans le Royaume-Uni en matière de recherche de solutions bioclimatiques et de conception durable dans le bâtiment.
- Plusieurs recherches ont été menées avec cette méthode basée sur l'association d'ECOTECH à WINAIR4 dont fait partie celle de H. Altan (Altan, et al., 2012) illustrée dans les points précédents.
- Cette méthode est aussi utilisée dans les laboratoires de recherche de différentes universités à travers le monde telles que l'université de Cardiff (Alexandri , et al., 2006), celle de Sheffield (Altan, et al., 2012), l'université britannique de Dubaï (Al Awadhi , 2011), université de Floride (Mozaffarian, 2009).
- Sans utilisation est relativement simple, toutefois le degré de précision est inférieur par rapport à d'autre logiciel tel que Fluent ou Autodesk simulation CFD dont le calcul prend plus de temps pour des résultats plus précis. Cependant, WINAIR4 correspond à l'objectif fixé dans notre travail de recherche en termes de degré de précision et de temps de calcul ainsi qu'en matière du niveau de maîtrise nécessaire pour son utilisation.

II.2. Protocole de la simulation

Avant de démarrer une simulation, il faut d'emblée fixer certains paramètres qui seront importants pour la maîtrise et la fiabilité de la recherche à savoir : Le bâtiment qui servira de modèle géométrique, les éléments architecturaux ciblés et les paramètres dynamiques à analyser. Pour cela nous avons répondu aux questions suivantes.

-Que savons-nous sur le bâtiment qui servira de modèle ?

Cela implique la définition : du type d'activité (dans notre cas c'est l'habitation) et des conditions de l'utilisation des espaces (utilisation diurne et nocturne). Les caractéristiques thermo-aérauliques de l'air environnant et les conditions aux limites du système à étudier (pression, vitesse, température de l'air,...). Les caractéristiques physiques de chaque matériau qui compose le bâtiment sont primordiales pour la pertinence de la simulation.

-Que voulons-nous vérifier précisément ?

Dans une simulation, les objectifs peuvent être multiples, cela peut aller de l'étude de l'efficacité d'un dispositif de ventilation naturelle jusqu'au dimensionnement d'un élément de ce dispositif (ouverture, hall, patio...). Dans notre cas, nous voulons évaluer l'apport que peut avoir une cage d'escalier dans la ventilation naturelle d'un habitat collectif en Algérie.

-Des critères de succès ou d'échec sont-ils définis ?

En général, des valeurs références liées au confort thermo-aéraulique de l'homme sont prises comme témoins pour évaluer l'efficacité du système de ventilation. Dans notre cas, c'est juste pour vérifier notre hypothèse de départ.

-Que pouvons-nous changer dans le modèle pour atteindre nos objectifs ?

La réponse à cette question est intimement liée à la nature de la recherche, et surtout à la réalité du terrain, mais dans la plupart des cas, la simulation se fait sous les conditions les plus défavorables. Plusieurs paramètres peuvent être sujets à des modifications pour évaluer l'efficacité du système à étudier. Il peut s'agir des conditions d'utilisation jusqu'à la géométrie du bâtiment ou de l'un de ses composants, passant par les caractéristiques des matériaux qui composent les parois, ainsi que les paramètres d'ambiance (conditions microclimatiques).

Dans notre cas les paramètres variables sont :

1. Les conditions microclimatiques car nous avons fait les simulations suivant deux hypothèses microclimatiques différentes liées à deux climats présents en Algérie (climat du littoral : Alger, et le climat semi-aride : Biskra).
2. La dimension et la présence d'ouvertures qui mettent en relation l'extérieur et la cage d'escalier : l'ouverture au niveau de la porte d'entrée principale et celle de l'escalier sur le toit.
3. La dimension et la présence d'ouverture au niveau des portes d'entrée de chaque logement, qui permet d'assurer la relation entre la cage d'escalier et les logements.
4. L'intégration de dispositifs passifs tels que le capteur à vent et le puits provençal dans un système de ventilation basé sur la cage d'escalier afin d'évaluer son apport en termes de ventilation naturelle des logements.

L'ensemble de toutes ces questions nous a aidés à fixer les paramètres déterminants dans notre simulation. Nous avons réalisé les simulations en suivant des étapes bien précises, que nous exposons explicitement dans ce qui suit.

II.3. Modèles de bâtiment choisis : critères de choix et présentation

Nous avons procédé à une série de simulations thermo-aéraulique à l'aide du logiciel ECOTECT ANALYSIS 2011 qui assure la modélisation et le calcul thermique couplé à WINAIR 4 qui prend en charge le calcul aéraulique (CFD) de la simulation, afin d'évaluer l'apport de la cage d'escalier dans différentes stratégies de ventilation naturelle. Nous avons modélisé avec ECOTECT deux bâtiments, qui ont servi de modèles tout au long des simulations, à savoir :

- Un bâtiment de **R+4** avec deux logements par palier (*Figure 111*)
- Un bâtiment de **R+6** avec quatre logements par palier (*Figure 112*)

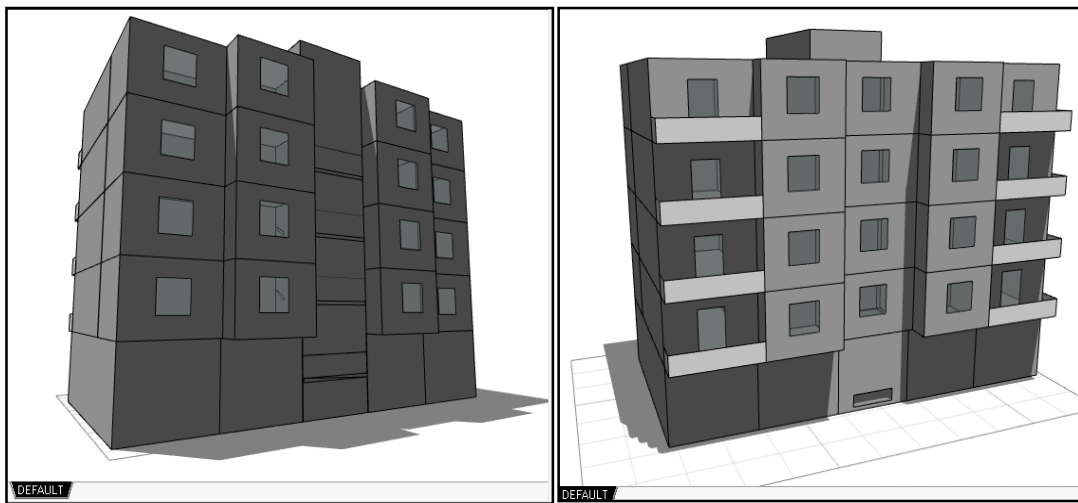


Figure 111 : Modèle 01, bâtiment de R+4, deux logements par palier, RDC commercial (Source : auteur)



Figure 112 : Modèle 02, bâtiment de R+6, quatre logements par palier, RDC commercial (Source : auteur)

Ce choix a été motivé par les critères suivants :

- Deux typologies très répandues dans l'habitat collectif en Algérie, notamment dans les ZHUN, qui constituent une partie non-négligeable du parc immobilier en Algérie. Les gabarits **R+4** et **R+6** avec RDC à usage commercial sont très récurrents dans les programmes de logements sociaux (LSP, OPGI...) lancés, ces dernières années, à travers le territoire national.



180 Lgts Mohammadia, R+5



Logements à Constantine, R+4



Logements à Boussaâda, R+4

Figure 113: Exemples de logement OPGI Source : <http://www.opgi.dz/>

- Les phénomènes considérés par notre recherche à savoir l'effet cheminée et captage du vent sont proportionnels à la hauteur du bâtiment, le gabarit R+4 et R+6 étant une moyenne des hauteurs qu'on retrouve sur le terrain. Ils constituent un échantillon représentatif.
- Le choix d'un bâtiment avec quatre logements par palier pose la problématique de la ventilation naturelle dans le cas d'une mono-exposition (possibilité d'ouverture seulement sur une seule façade). Ce modèle permettra de tester d'éventuelles solutions basées sur la cage d'escalier pour améliorer la ventilation dans ce type de bâtiment.

Les différents plans qui ont servi pour modéliser les deux modèles utilisés dans les simulations ont été dessinés avec le logiciel AUTOCAD 2013, développé par la même société d'édition qu'ECOTECT ANALYSIS 2011 à savoir AUTODESK, ce qui a facilité le transfert des données entre les deux logiciels du fait de leur compatibilité.

Dans la *Figure 114* et *Figure 115* sont illustrés : le plan du rez-de-chaussée, de l'étage courant et de la toiture ainsi qu'une coupe "AA" au niveau de la cage escalier pour chaque bâtiment sous format JPEG³⁷ après avoir été convertis d'un fichier source DWG³⁸. Les deux présentations graphiques sont jointes en annexe 03 et 04.

³⁷ La norme **JPEG** est une norme qui définit le format d'enregistrement et l'algorithme de décodage pour une représentation numérique compressée d'une image fixe.

³⁸ DWG est le format issu des fichiers de dessins AutoCAD. DWG est l'abréviation de DraWinG

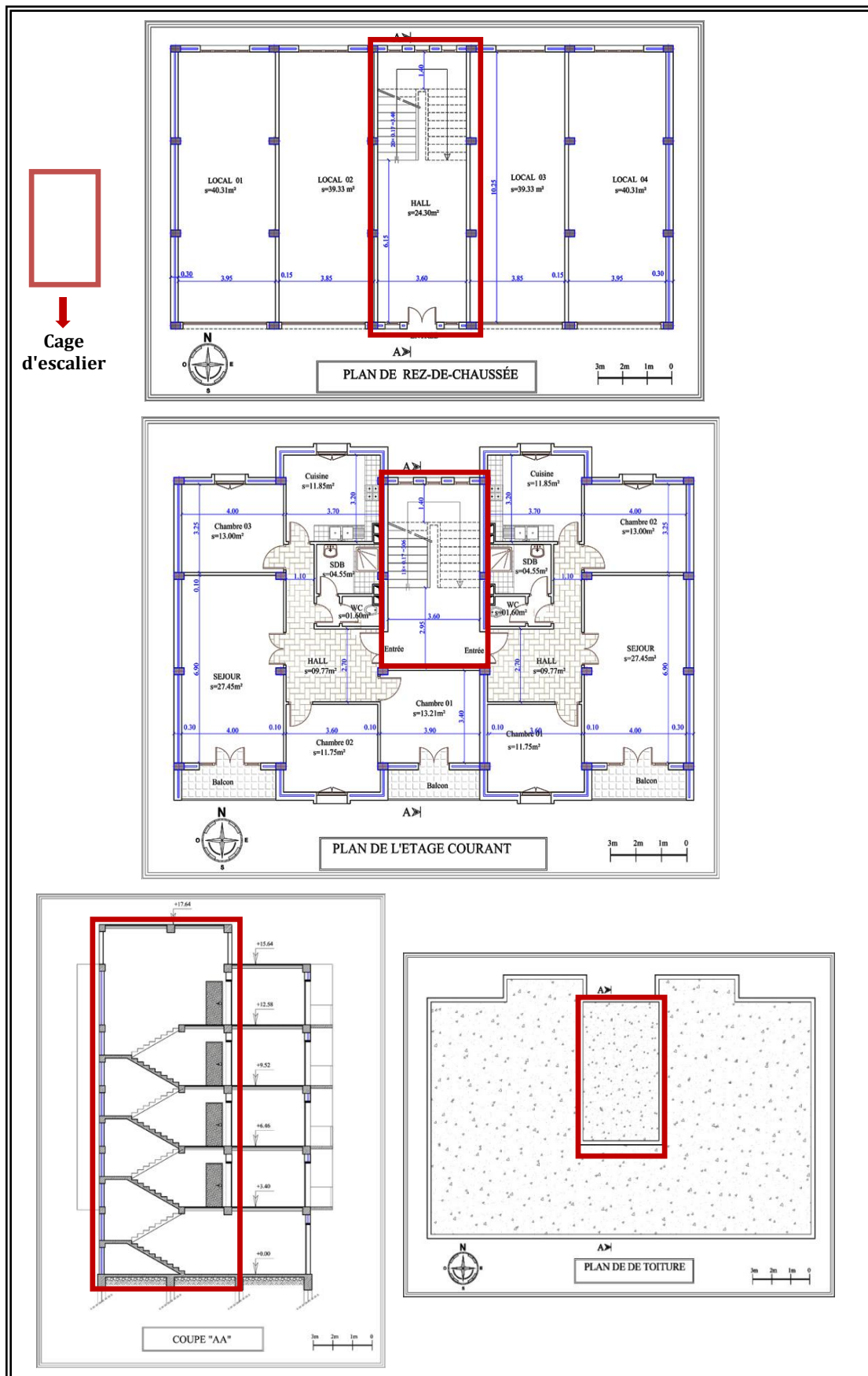


Figure 114 : Représentation graphique du modèle 01 (source : auteur)

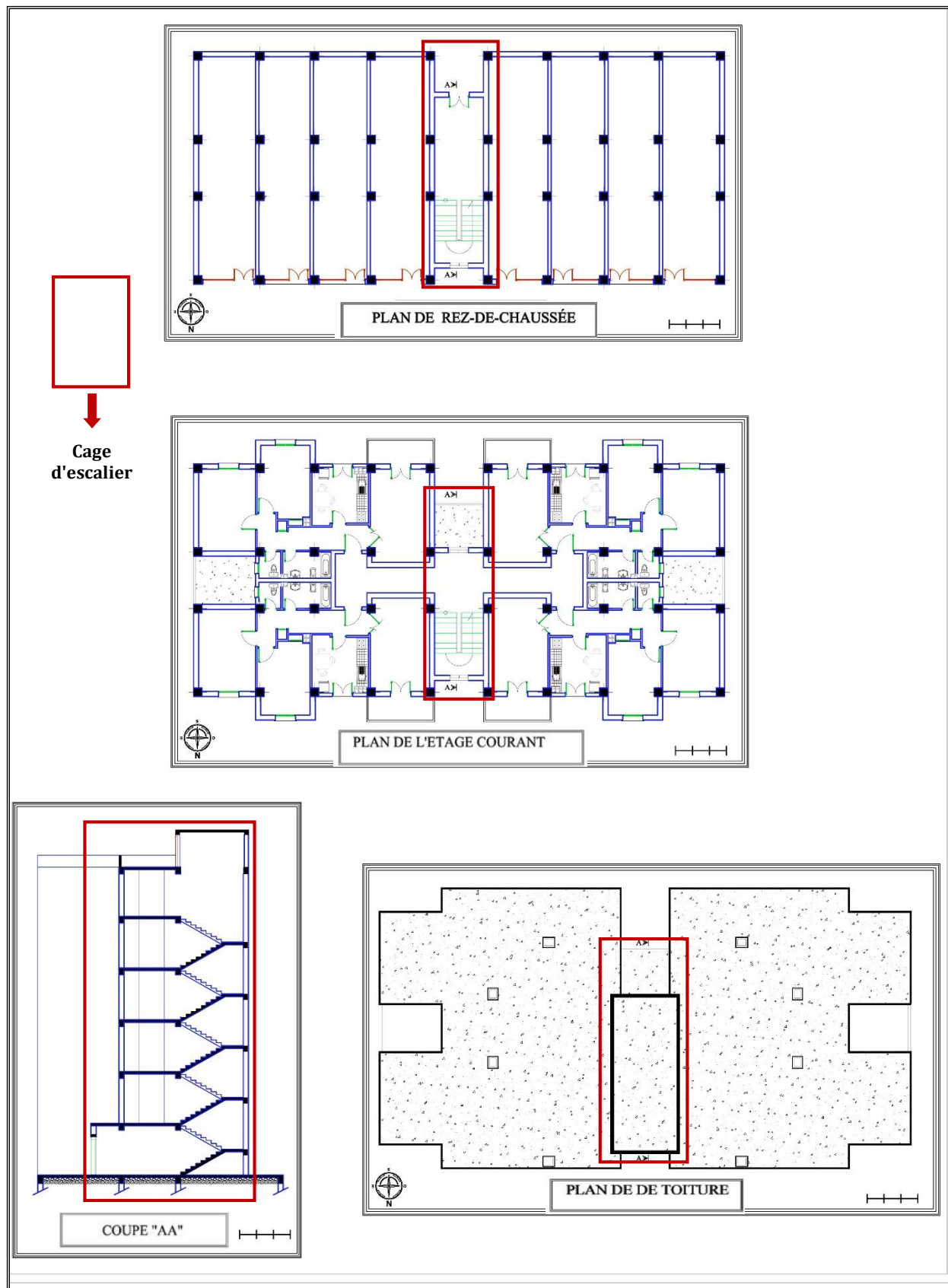


Figure 115: Représentation graphique du modèle 02 (source : auteur)

II.4. Étapes de modélisation

La modélisation des deux bâtiments s'est faite avec ECOTECT, selon les étapes suivantes :

II.4.1. Paramétrage du logiciel avant la modélisation

Cette étape consiste à introduire dans le logiciel les "Inputs" nécessaires au bon fonctionnement des simulations. Ces paramètres comportent toutes les informations et les données relatives aux deux modèles et à leur environnement à savoir :

- 1- **La description du projet** : englobe toutes les informations relatives au projet de simulation, son nom, son objectif, sa destination, etc. (*Figure 116A*)
- 2- **Les données climatiques** : dans notre cas, nous avons utilisé des fichiers "météo"³⁹ d'Alger et de Biskra introduits directement dans ECOTECT sous format **wea**. Ces données climatiques sont visualisables dans **Weather Tool**, un outil intégré dans le logiciel qui offre un aperçu sur toutes les données climatiques telles que : les températures, le régime des vents, l'humidité, l'ensoleillement, etc. (*Figure 116 B*).
- 3- **L'orientation** : par hypothèse, la cage d'escalier a été orientée en plein Nord, afin de réduire le nombre de paramètres à analyser dans les simulations (l'orientation n'a pas été considérée comme une donnée variable). D'autant plus que notre l'objectif principal est d'évaluer la faisabilité d'intégrer la cage d'escalier dans des systèmes passifs de ventilation naturelle, et une cage d'escalier orientée vers le côté des vents dominants Nord⁴⁰, nous permettra d'évaluer des dispositifs basés sur la force du vent (*Figure 116 C*).
- 4- **La nature du site** : Nous avons opté pour une configuration de type **Urbain** car le logiciel intègre dans ses calculs des coefficients liés à des paramètres microclimatiques tels que : la pollution, la nébulosité, la rugosité..., cette dernière, étant plus élevée dans les milieux urbains, à un impact considérable sur la vitesse du vent (*Figure 116 D*).

³⁹ Données météo de l'ONM (Office National de Météorologie) de dar El Beida Alger (1996-2005).

⁴⁰ Le plus souvent les vents dominants, en été, souffle du côté nord en Algérie, et plus particulièrement dans les deux contextes climatiques choisis dans nos simulations, à savoir celui d'Alger et de Biskra, les vents dominants soufflent du côté nord, nord est nord-ouest.

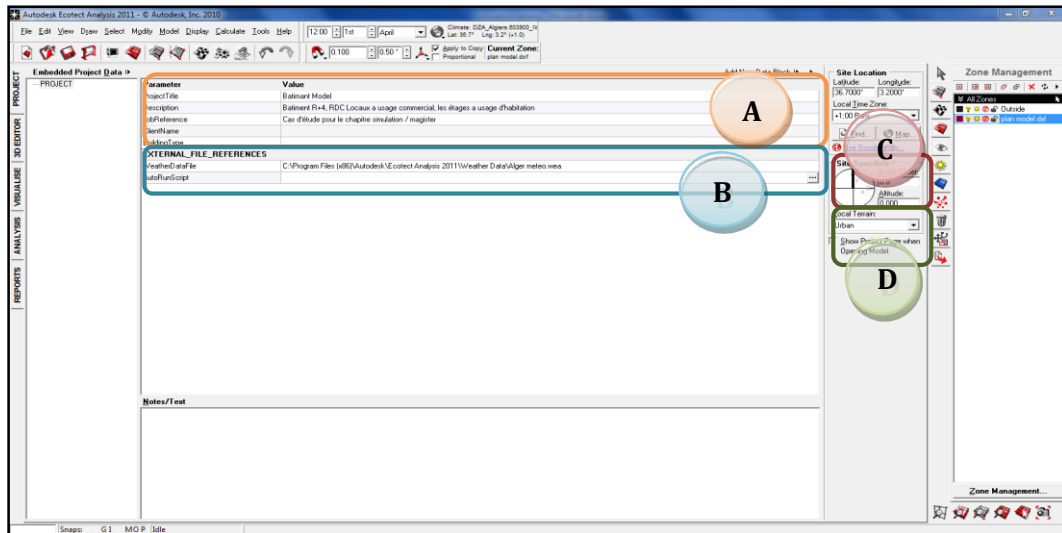


Figure 116: Capture d'écran sur la fenêtre projet, ECOTECT (Source : auteur)

II.4.2. Importation des plans

Les plans des deux bâtiments, dessinés à l'aide du logiciel AUTOCAD 2013, ont été importés vers ECOTECT sous format DXF⁴¹, pour servir de lignes de repères à la construction de leurs géométries 3D, ce qui a facilité la modélisation et surtout a permis de respecter les dimensions des deux modèles, car lors de l'importation, ECOTECT prend en considération les unités d'AUTOCAD (une option d'ajustement d'échelle est intégré dans le logiciel).

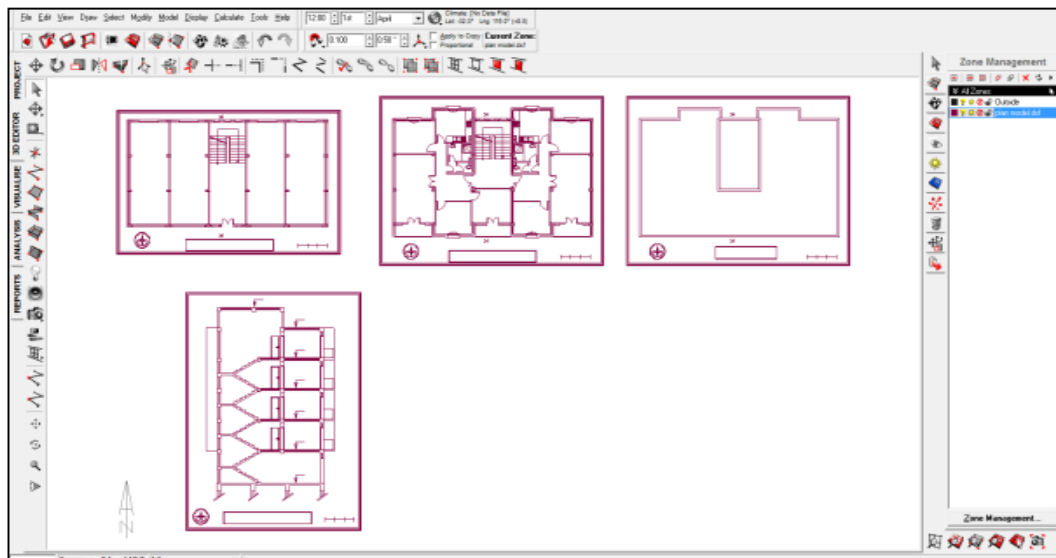


Figure 117: Capture d'écran d'ECOTECT après importation des plans (Source, Auteur)

⁴¹ **DXF**, sigle de **D**rawing **eX**change **F**ormat, est un format créé par la société **Autodesk** servant à échanger des fichiers DAO entre logiciel CAO n'utilisant pas le même format de fichier natif. Il a été conçu à l'origine pour représenter les modèles 3D créés avec AutoCAD.

II.4.3. Modélisation et visualisation du bâtiment

La modélisation dans **ECOTECT**⁴² obéit à la logique des zones thermiques, chaque espace intérieur, dont fait partie la cage d'escalier, est considéré comme une zone. Chaque zone à ses propres caractéristiques (température, humidité, la vitesse de l'air, taux d'occupation, présence d'appareils de climatisation...), qui sont prises en considération lors des différentes simulations. À son tour, la zone est composée de partitions (murs, un plancher, fenêtre, porte...), et pour chaque partition un matériau doit être affecté (une bibliothèque de matériaux assez riche et personnalisable est intégrée dans le logiciel). Afin d'identifier les différentes zones, ECOTECT permet de nommer et d'affecter une couleur distinctive à chaque zone pour faciliter son repérage et sa sélection dans la scène (*Figure 118*).

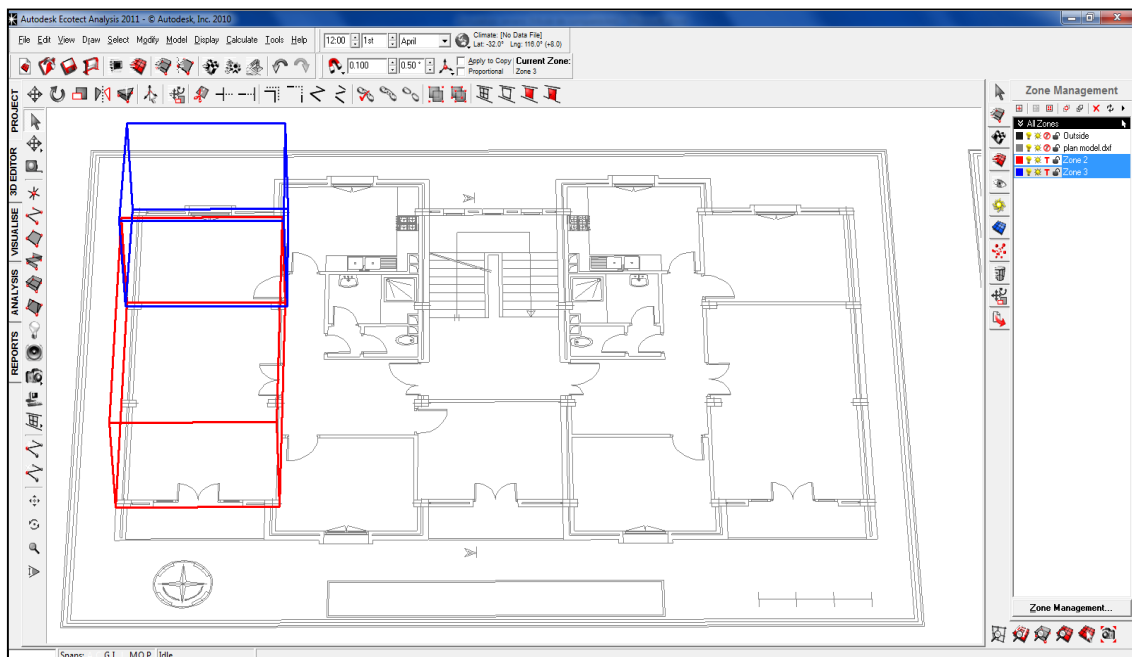


Figure 118: création de zones thermiques, ECOTECT (Source, Auteur)

Au cours de la modélisation, une fenêtre de visualisation est disponible afin de pouvoir apprécier les résultats en plusieurs modes d'affichage (lissage, transparent, croquis...), la trajectoire du soleil et les ombres peuvent être affichés à tout moment (*Figure 119*). Des caméras peuvent être placées afin de mémoriser les vues les plus intéressantes et pouvoir faire des captures-écran et les enregistrer en format JPEG.

⁴² Malgré la possibilité d'importer directement la géométrie 3D d'un autre logiciel de modélisation (3ds max, Revit, AutoCAD...), le choix de modéliser le bâtiment directement dans ECOTECT est plus opportun, car la forme du bâtiment n'été pas complexe et cela permet d'avoir une géométrie 3d compatible sans défauts de maillage.

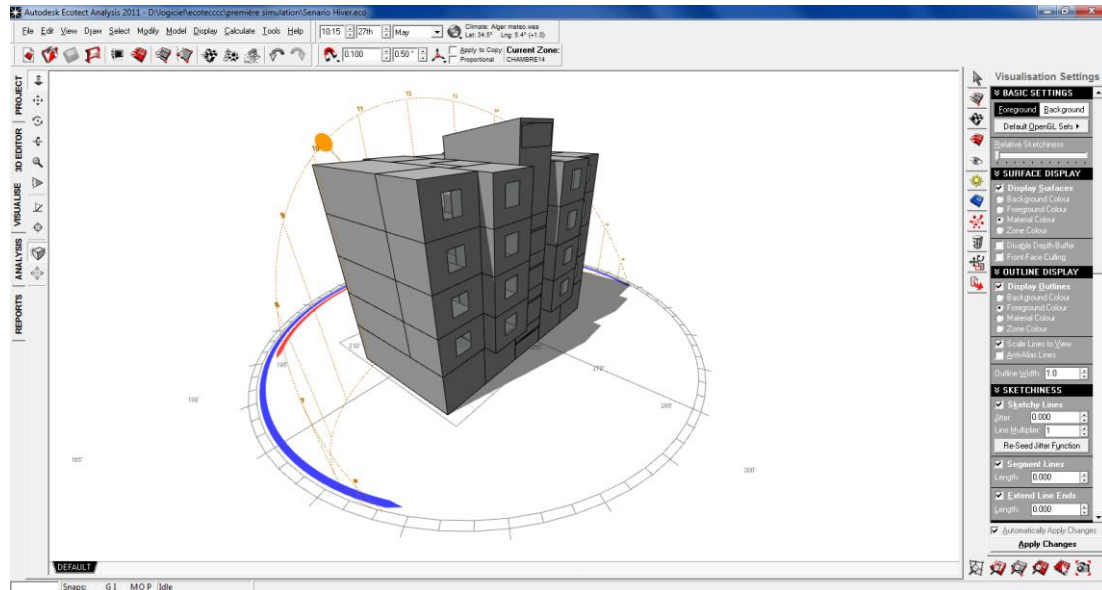


Figure 119: Capture écran sur la fenêtre de visualisation, ECOTECT (Source, Auteur)

II.5. Processus de simulation

La simulation s'est fait en trois étapes principales en sollicitant un deuxième logiciel nommé WINAIR4 (*ver 1.4e - Jun 2005*), car ce dernier permet de compléter ECOTECT ANALYSE 2011 qui n'est pas en mesure d'effectuer des analyses CFD, et cela en assurant le calcul des vitesses, des pressions et des températures des flux d'air à l'intérieur du bâtiment.

II.5.1. Configuration de la grille d'analyse CFD

Cette étape consiste à préparer la grille d'analyse d'ECOTECT qui recevra par la suite les données CFD calculées par le logiciel WINAIR 4. Ceci se fait en configurant :

- La taille de ses mailles afin de régler la précision de calcul, le nombre et la densité des nœuds que générera la simulation, autrement dit la quantité de données traitées et transmises à WINAIR4 pour être calculées.
- Les limites et la nature de la grille à fin de ne pas inclure les zones qui ne sont pas concernées par le calcul.

Ces deux paramètres ne doivent pas être surdimensionnés, car ils influent sur le temps de calcul de l'ordinateur. Des valeurs moyennes entre 40 et 50 mailles sont suffisantes pour l'objectif et la précision recherchés dans notre cas d'étude (*Figure 120*).

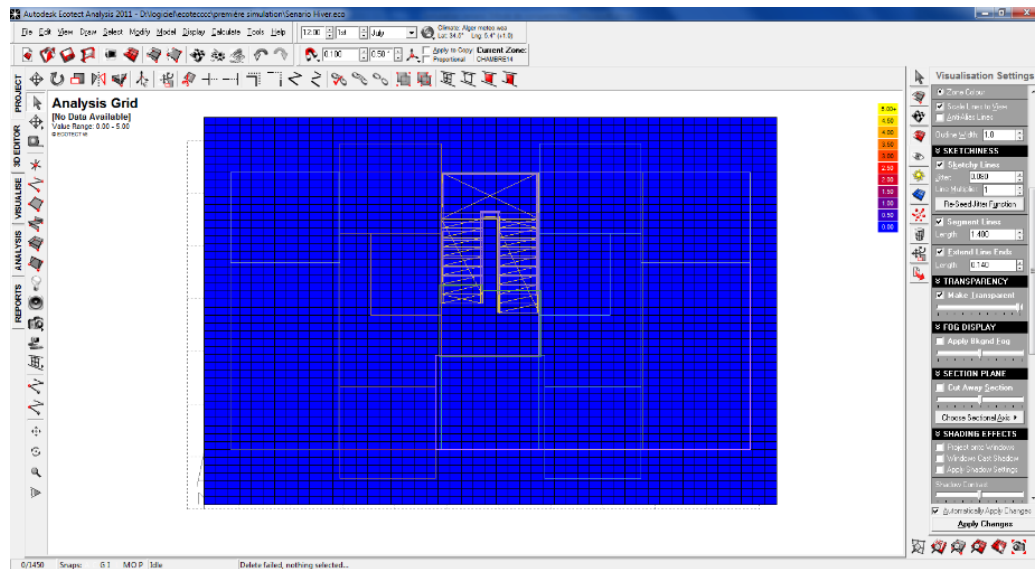


Figure 120: Capture d'écran sur la Grille d'analyse d'ECOTECT (Source, Auteur)

II.5.2. Exportation vers WINAIR4

Une fois la grille paramétrée, il faut l'exporter vers WINAIR4 pour la simulation aéraulique, après avoir configuré la boîte de dialogue d'exportation qui contient des informations primordiales pour la simulation comme la vitesse et la direction du vent, température intérieure et extérieure.

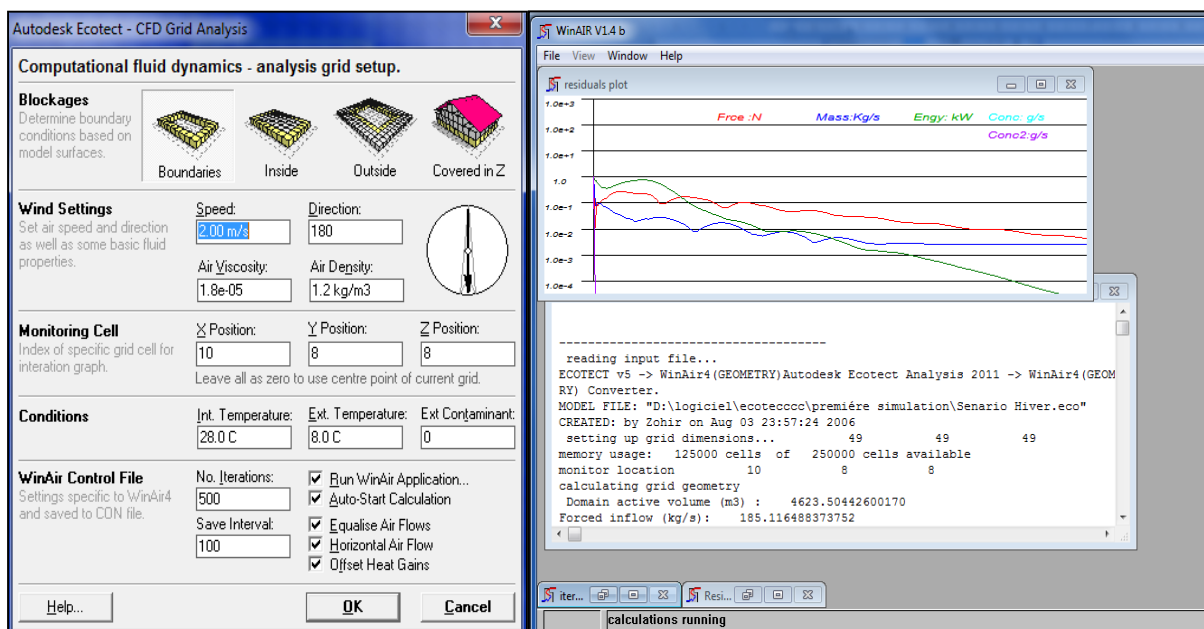


Figure 122 : Boîte de dialogue d'exportation vers WINAIR4 (Source : Auteur)

Figure 121: Fenêtre de calcul de WINAIR4 (Source : Auteur)

II.5.3. Chargement et visualisation des données CFD dans ECOTECT

C'est la dernière étape avant l'analyse et l'interprétation des résultats. Elle consiste en une projection des données calculées par WINAIR4 sur chaque nœud de la grille d'analyse CFD d'ECOTECT. Celle-ci permet de visualiser les différents paramètres calculés : température, vitesse, débits et pression de l'air.

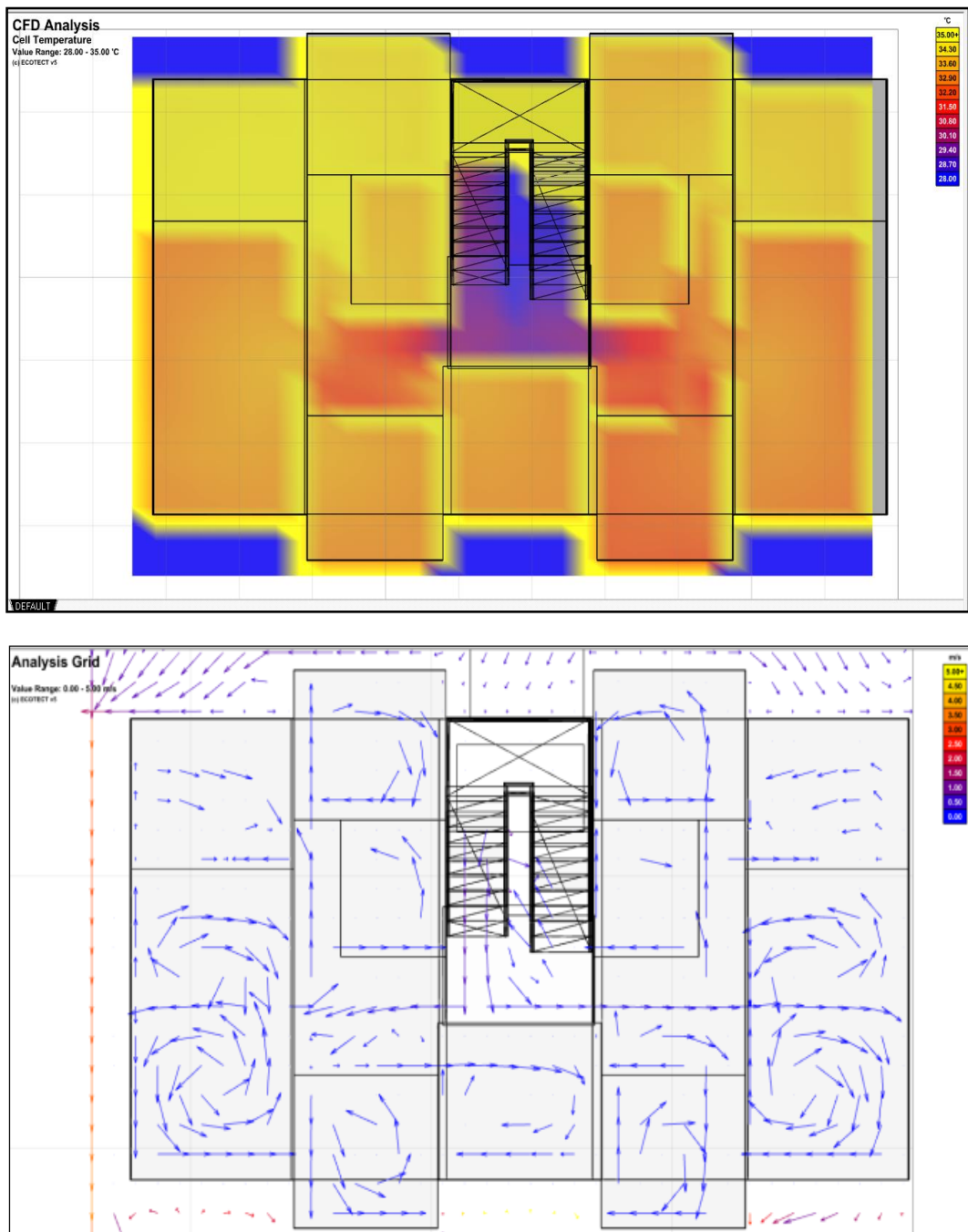


Figure 123: Visualisation des résultats de températures et de vitesses des flux d'air dans ECOTECT après chargement des données à partir de WINAIR4 (Source : auteur)

III. Les deux Scénarios de simulation choisis

Afin de vérifier notre hypothèse de base à savoir que "la cage d'escalier d'un bâtiment d'habitation collectif peut être utilisée pour améliorer la ventilation naturelle des logements ", nous avons effectué une série de simulations à l'aide d'ECOTECT et WINAIR4, qui vise principalement à évaluer l'apport de la cage d'escalier dans la ventilation naturelle des bâtiments. Pour cela nous avons établi différents scénarios visant à simuler des situations proches du contexte climatique algérien. Le but est d'évaluer le comportement thermo-aéraulique de la cage d'escalier avant et après son intégration dans une stratégie de ventilation naturelle.

Deux principaux scénarios de simulation ont été donc élaborés dans le but de comparer le comportement thermo-aéraulique de la cage d'escalier avant et après son intégration dans une stratégie de ventilation naturelle tout en s'inscrivant dans deux zones climatiques différentes. Le tableau 02 décrit les deux scénarios qui ont servi à l'élaboration des simulations.

Scénarios	Model	Systèmes passifs	Stratégies de ventilation	Contextes climatiques
01	Modèle 01 Bâtiment R+4 2 Logts par palier	Cage d'escalier "Tour à vent"	Rafrâichissement d'été.	<u>Climat semi-aride (Biskra)</u> Le mois le plus chaud : juillet $T_m = T_e = 34.4\text{ °C}$, $H_R = 26\%$, Vent frais nord : $V_m = 4.3\text{ m/s}$
		Cage d'escalier "Tour à vent / puits provençal"		
02	Modèle 02 Bâtiment R+6 4 Logts par palier	Cage d'escalier "Cheminée d'extraction"	Ventilation Hygiénique (hiver)	<u>Climat Méditerranéen (Alger)</u> Le mois le plus froid : février $T_{m\min} = T_e = 5\text{ °C}$, $H_R = 81\%$, Brise nord = 0.5 m/s
			Ventilation Traversante (été)	<u>Climat Méditerranéen (Alger)</u> Le mois le plus chaud : août $T_{m\max} = T_e = 32.7\text{ °C}$, $H_R = 69\%$, Brises de mer d'été = 0.1 m/s

Tableau 03 : Tableau des scénarios et du protocole de simulation (source : auteur)

IV. Évaluation de l'apport de la cage d'escalier en tant que dispositif de rafraîchissement passif (1er scénario)

A travers une série de simulations nous allons évaluer l'apport de la cage d'escalier en terme de rafraîchissement passif des logements dans un habitat collectif, situé dans un climat semi-aride (Biskra), comme solution au stress de l'été.

L'objectif de base de cette première simulation est de démontrer que la cage d'escalier peut contribuer considérablement au rafraîchissement des logements dans les périodes de surchauffe, ceci en lui associant d'abord un capteur à vent puis un puits provençal, afin de capter et de canaliser les vents frais, à l'image des **Badgir** Iranien.

La stratégie de ventilation recherchée est le **rafraîchissement d'été**, dans un climat chaud semi-aride pendant une journée d'été. Afin de simuler le contexte climatique d'un bâtiment d'habitation collectif dans la ville de Biskra nous avons introduit les données climatiques de Biskra⁴³ en format **wea** dans ECOTECT.

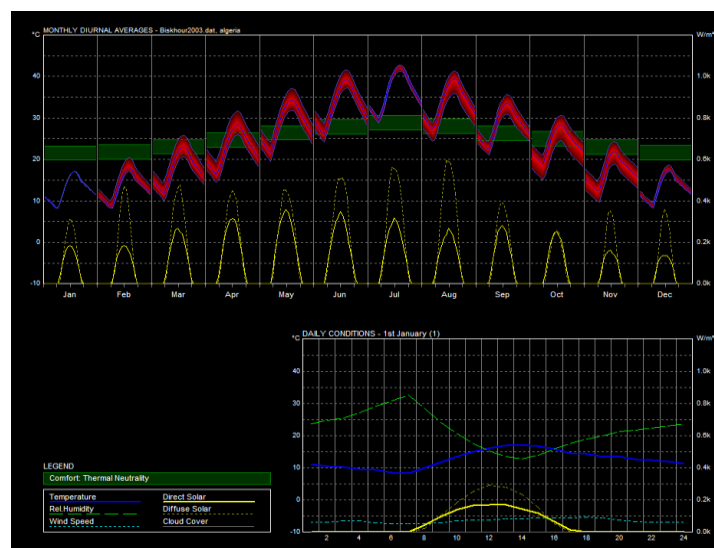


Figure 124 : Données climatiques de Biskra (1996-2005) sous format WEA affichées sur WEATHER TOOL, ECOTECT (source : auteur)

Pour le paramétrage de WINAIR 4, nous nous sommes basés sur les hypothèses suivantes :

⁴³ Source : données météo de l'ONM (Office National de Météorologie) de dar El Beida Alger (1996-2005).

- La température extérieure utilisée et celle d'une journée du mois de juillet ayant la température moyenne la plus élevée de l'année à savoir **34.4°C**, celle-ci est introduite dans le champ de la température de l'air intérieur de WINAIR 4 (Int. Température), afin de se mettre dans la situation la plus défavorable (résistance thermique des parois très faible). Humidité relative moyenne est de **26%**.
- Présence de vent Nord-ouest d'une vitesse de **4.3 m/ s** (vents dominants), la température de l'air entrant est fixée à **28 °C**, cette température est basée sur le potentiel du refroidissement de la tour à vent avec intégration d'un système d'humidification (Bouchahm, 2003).⁴⁴

IV.1. Description des variantes du modèle de simulation

Dans ce scénario, nous avons utilisé trois variantes du modèle 01 à savoir un bâtiment de R+4 avec deux logements par palier afin de comparer entre les cas suivants :

IV.1.1. Le bâtiment Témoin (Modèle 01/variante 01)

Dans ce cas de figure, la cage d'escalier ne possède aucune connexion aéraulique avec les logements, les portes d'entrées de ces derniers ne contiennent pas d'ouvertures sur les paliers. Le volume de la cage d'escalier déborde de 1,50 m sur la toiture avec une trappe d'accès de service fermée, une configuration classique dans l'habitat collectif en Algérie.

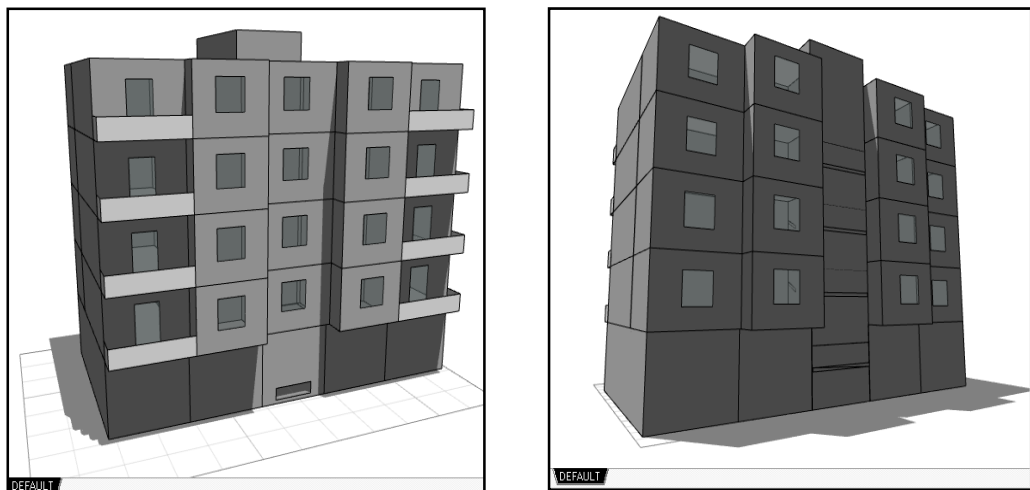


Figure 125: Modèle 01/variante 01, le bâtiment témoin (Source : auteur)

⁴⁴ Le potentiel du rafraîchissement évaporatif passif d'un capteur à vent dans les régions chaudes et arides (Ouargla) a été démontré par Y. Bouchahm dans sa thèse de doctorat. Dans les résultats de son expérience, une réduction de 22,1 °C, a été observée, grâce à un dispositif de capteur à vent avec système d'humidification, entre l'entrée de l'air du capteur 47,6 °C et la sortie de l'air 25,5 °C, avec une température extérieure de 42,8 °C le 31 juillet 2007 à 16 h.

IV.1.2. Le bâtiment avec la cage d'escalier intégrée dans un dispositif capteur à vent (Modèle 01/ variante 02)

Cette variante va servir à évaluer l'apport de la cage d'escalier associée à un capteur à vent, intégré sur son toit afin d'acheminer de l'air frais à l'intérieur des logements. Ce dispositif passif de rafraîchissement se présente comme suit :

- Le toit de la cage d'escalier est sous forme de capteur à vent à l'image du Malqaf égyptien, et débord de 3.5 m de la toiture et possède une ouverture orientée nord (vents frais). Afin de pouvoir capter des vents à une vitesse suffisante qui ne sont pas chargés de sable, car ce dispositif est adapté pour les climats arides et semi-arides comme dans le cas de Biskra.
- La porte d'entrée de chaque logement possède deux ouvertures sur le palier de la cage d'escalier, une dans la partie supérieure qui sert à évacuer l'air chaud et l'autre dans la partie basse pour faire pénétrer l'air frais, permettant ainsi un échange d'air optimal entre les deux espaces (*Figure 126*).
- Les ouvertures doivent être autoréglables afin d'éviter les phénomènes de refoulement en hiver. À cet effet, l'entrée d'air du capteur à vent doit être accessible afin de pouvoir la refermer en hiver. Un ventilateur d'extraction peut être intégré afin de pallier les insuffisances du tirage thermique et de la force du vent en hiver (voir le scénario 02).

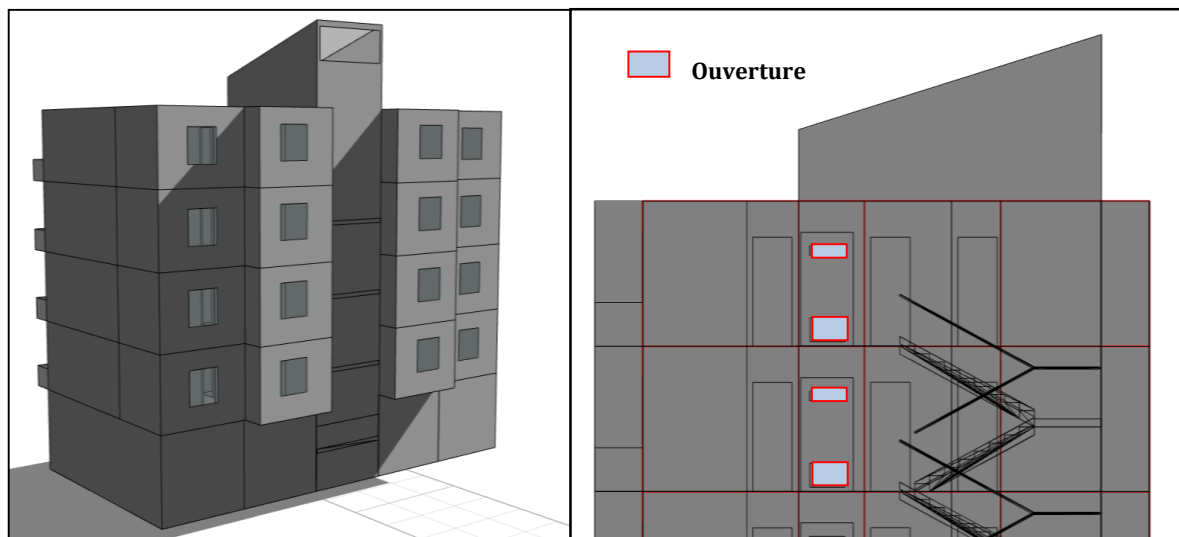


Figure 126: Modèle 01/variante 02, bâtiment avec la cage d'escalier en capteur à vent (Source : auteur)

IV.1.3. Le bâtiment avec la cage d'escalier en capteur à vent jumelé avec un puits provençal (Modèle 01/ variante 03)

C'est la dernière variante de ce scénario, elle vise à évaluer l'apport de la cage d'escalier associée à deux dispositifs passifs de ventilation naturelle, à savoir le capteur à vent et le puits provençal, dans le rafraîchissement des logements. Ce dispositif se présente comme suit :

- L'hypothèse de base de cette variante est que le puits provençal, modélisé dans ECOTECT, à une longueur de **20m** afin d'éviter les pertes de charges, une profondeur minimale de **1.5 m** (Mebarki , et al., 2012), et une section de **1m/1m** pour pouvoir installer un cours d'eau souterrain et permettre son entretien. Ce dernier permet d'humidifier l'air et de renforcer ainsi le rafraîchissement par l'inertie thermique de la terre à l'image de de la tour à vent avec rivière souterraine (Izard, 1993).
- L'entrée d'air doit être placée à une hauteur de **1.5m** du sol dans un endroit dégagé où la température de l'air est atténuée par un microclimat (présence de jardin avec bassin d'eau, rafraîchissement par évaporation de l'eau et par ombrage).
- L'aboutissement du puits peut être dans une cave ou un sous-sol, où l'on peut prévoir éventuellement un bassin d'eau afin d'augmenter le rafraîchissement par évaporation, à l'image du Badgir iranien ou du Malqaf égyptien (Izard, 1993).
- Au-dessus de cette cave, une ouverture est intégrée pour rafraîchir la cage qui servira à son tour de diffuseur d'air frais issu, à la fois, du capteur à vent et du puits provençal, vers l'intérieur des logements à travers des ouvertures intégrées dans la porte d'entrée.

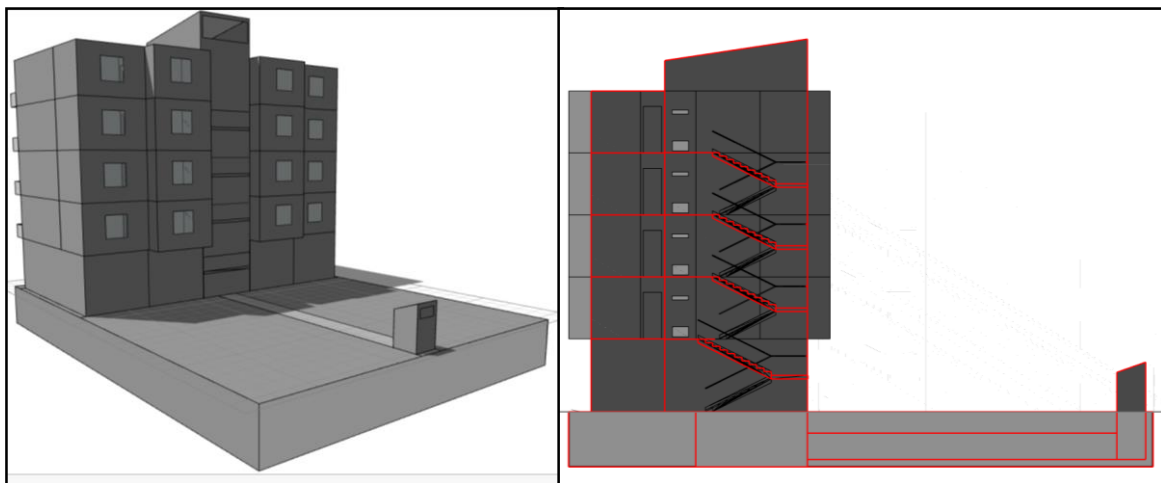


Figure 127: Modèle 01/ variante 03, Le bâtiment avec la cage d'escalier en capteur à vent jumelé avec un puits provençal (Source : auteur)

V. Lecture et interprétation des résultats

(Les résultats des simulations sous forme de captures d'écran sont joints en annexes)

Pour bien apprécier l'apport de la cage d'escalier dans le rafraîchissement passif des espaces intérieurs d'une manière concrète, nous allons comparer entre les résultats de la variante 01 (bâtiment témoin) et la variante 02 (cage d'escalier en capteur à vent). Ensuite, nous allons comparer la variante 02 et la variante 03 (cage d'escalier en capteur à vent associé à un puits provençal), et cela en visualisant les différents "Outputs" des simulations, en forme de captures d'écran, relatives aux paramètres suivants :

- Vitesse de l'air et profondeur de l'écoulement à l'intérieur des logements
- Le taux de rafraîchissement des espaces intérieurs.
- les débits d'air au niveau des portes d'entrée

Les captures d'écran sur les résultats des simulations en plan sont faites au niveau du premier étage, car a priori, c'est la situation la plus défavorable à cause de son éloignement de l'entrée d'air du capteur à vent. Les résultats sont illustrés sous forme de captures d'écrans illustrant les profils de vitesse et les directions des flux d'air ainsi que les profils de températures, une légende en couleurs est associée à chaque illustration afin d'apprécier les grandeurs.

V.1. Comparaison des résultats avant et après intégration d'un capteur à vent

V.1.1. Comparaison des profils de vitesse des flux d'air

Figure 128 illustre la vitesse et le sens des flux d'air dans le bâtiment témoin, l'air se déplace seulement à l'intérieur de la cage d'escalier, aucun mouvement d'air n'est enregistré à l'intérieur des logements, car leurs portes d'entrée n'ont pas d'ouvertures sur le palier.

Par contre, *Figure 129* montre bien que dans le cas de l'intégration d'un capteur à vent avec ouverture sur palier pour chaque porte d'entrée, on observe la pénétration des flux d'air à l'intérieur des logements, d'après la lecture du profil de vitesse des flux d'air, le séjour qui est sur le même axe que la porte d'entrée reçoit plus de volume d'air par rapport aux chambres éloignées.

Figure 131 et *Figure 132* qui sont des coupes au niveau de la cage d'escalier font apparaître le profil de l'écoulement d'air à travers le capteur à vent. On note une diminution de vitesse proportionnelle à éloignement de l'entrée d'air du capteur à l'intérieur de la cage d'escalier.

Toute fois, on ne retrouve plus cette logique au niveau des ouvertures des portes d'entrée des logements, les vitesses d'entrée de l'air fluctuent aléatoirement et n'obéit pas au principe observé à l'intérieur de la cage d'escalier (*Figure 132*).

Au premier étage, étant le plus éloigné du capteur à vent, la vitesse de l'air devrait être la plus faible, mais la simulation indique une vitesse d'entrée de l'air (**1.28 m/s**) supérieure à celle du deuxième étage (**1.04 m/s**), tandis que le troisième étage enregistre la vitesse la plus importante (**1.31 m/s**), alors que le dernier étage, le plus proche du capteur à vent, indique la vitesse la plus faible (**0.67m/s**) (*Figure 130*).

De telles valeurs reflètent le côté imprévisible de l'air et surtout la difficulté d'anticiper son mouvement. Cette fluctuation des vitesses de l'air au niveau des ouvertures situées sur les portes des logements est a priori " aléatoire", mais une étude aéraulique plus poussée de la configuration spatiale de la cage d'escalier et de son rapport avec celle des logements, peut éventuellement en déceler les causes de ce phénomène, car la distribution des pressions à l'intérieur est intimement liée à la forme des composants solides qui constituent et délimitent l'environnement intérieur.

Une marge d'erreur du logiciel peut aussi être à l'origine, c'est pour cela qu'une simulation sur des maquettes d'étude dans une soufflerie, ainsi qu'une campagne de mesure in-situ sur des bâtiments existants, serviront à corroborer ces données en recoupant les différents résultats, ce qui n'a pas été possible dans le cas de ce travail de recherche pour des raisons de temps et d'indisponibilité de moyens (instrument de mesure anémomètre à basse pression).

Profils de vitesse des flux d'air avant et après intégration d'un capteur à vent

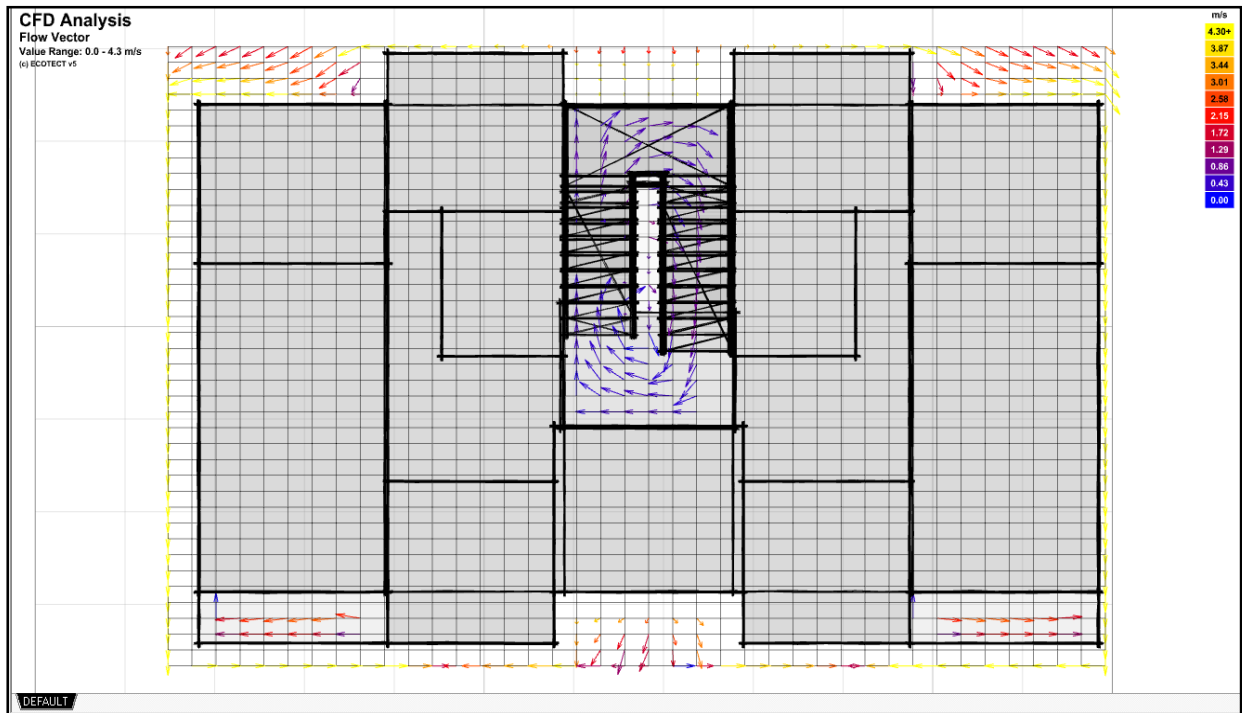


Figure 128: Vue en plan de la vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante01 (Source : auteur)

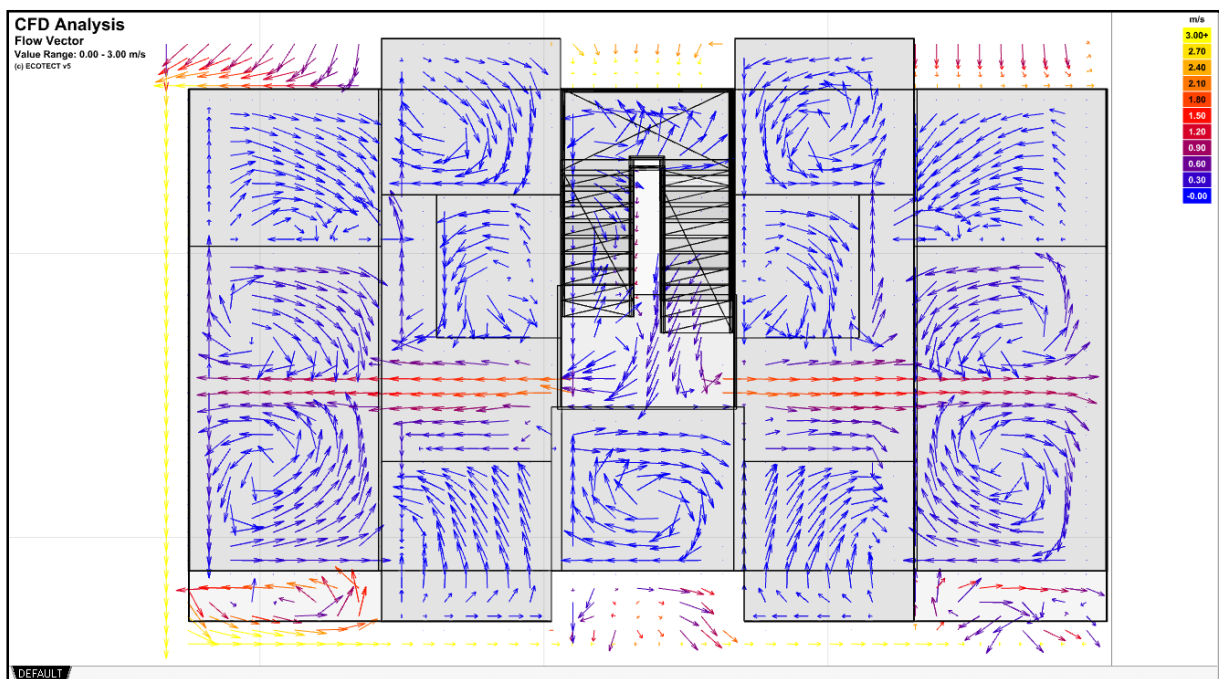


Figure 129: Vue en plan de la vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante02 (Source : auteur)

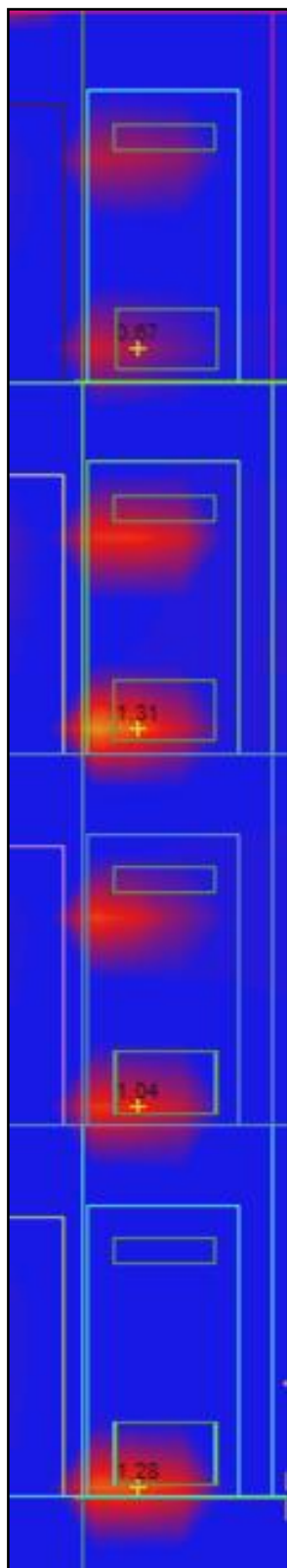


Figure 130: Vitesses de l'air au niveau des portes d'entrée des logements (Source : auteur)

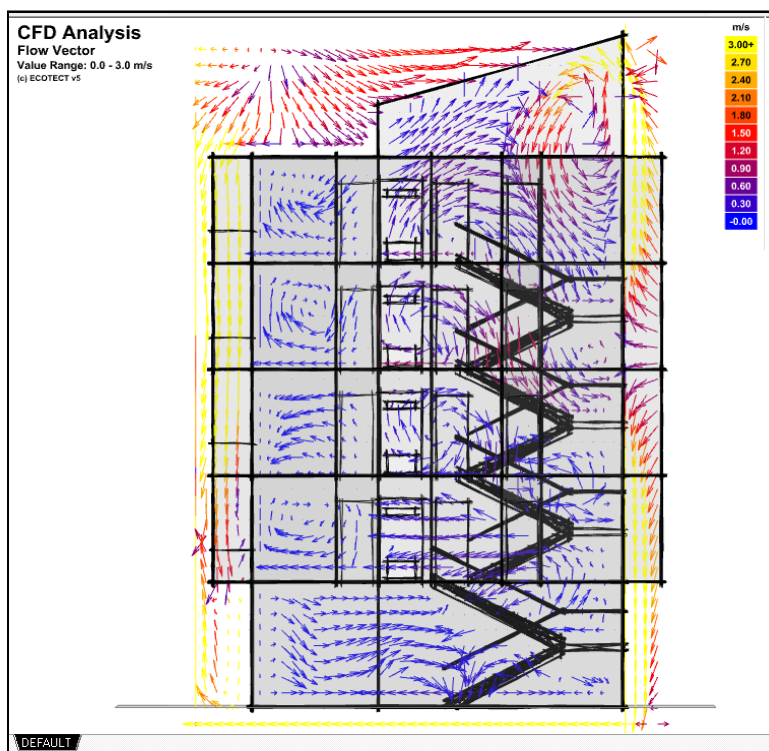


Figure 131: Vue en coupe du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle 01/Variante 02 (Source : auteur)

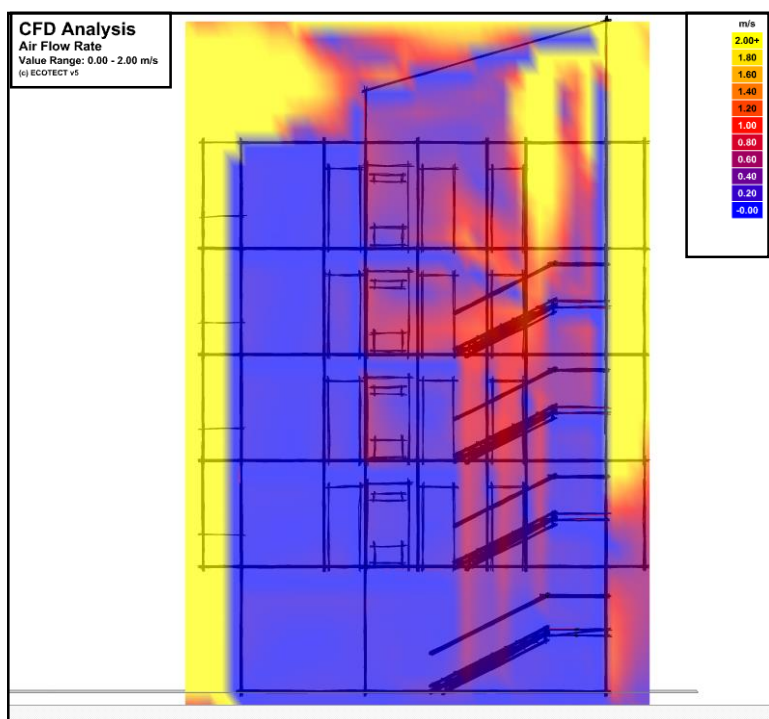


Figure 132: Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante 02 (Source : Auteur)

V.1.2. Comparaison des profils de températures intérieures (annexe 07)

Dans la *Figure 134*, l'absence de connexions aérauliques entre l'intérieur des logements et le volume d'air de la cage d'escalier a fait que les températures intérieures soient élevées et inconfortables (**34.55°C**). Car il n'y a pas eu de rafraîchissement à cause de l'absence d'ouvertures sur les portes d'entrée des logements et sur le capteur à vent.

La *Figure 133* illustre, à travers le profil des températures du premier étage, le potentiel considérable du dispositif "cage d'escalier associée à un capteur à vent" en termes de rafraîchissement passif. Les températures intérieures qui ont été réglées sur **34.4°C** (température moyenne du mois de juillet à Biskra) ont baissé jusqu'à **28.20°C**, avec l'introduction d'un air frais de **28°C** à l'intérieur des logements⁴⁵. Une température qui est relativement confortable dans ce genre de climat et qui permet de faire d'importantes économies d'énergie sur les systèmes actifs de climatisation, car ces derniers ne fonctionneront pas en plein régime pour atteindre des températures de confort. Il est important de préciser que ces résultats ne sont que des indicateurs sur l'efficacité de ce système, leur précision est limitée, car ces simulations ne se sont pas focalisées sur la nature et les caractéristiques des matériaux, ni sur le rôle de l'isolation et de l'inertie thermique des parois⁴⁶.

À travers cette première série de simulations, nous déduisons qu'un dispositif de rafraîchissement, basé sur la cage d'escalier en tant qu'espace de diffusion d'air et le capteur à vent comme une tourelle d'alimentation en air frais, peut être efficace voire même une des solutions bioclimatiques à la problématique de la ventilation naturelle de l'habitat collectif dans le climat semi-aride en Algérie. D'autres études plus approfondies de ce dispositif peuvent apporter plus de détails et d'information sur son dimensionnement, sa mise en œuvre, les caractéristiques des matériaux utilisés, son adaptation à d'autres contextes.

⁴⁵ Cette hypothèse d'une température de 28°C s'appuie sur plusieurs travaux de recherches qui ont démontré, sur la base d'expériences, le potentiel du rafraîchissement par humidification et inertie thermique d'un capteur à vent dans les climats arides et semi-arides, dont fait partie la thèse de doctorat de Y. Bouchahm sur le rafraîchissement passif à Ouargla cité précédemment.

⁴⁶ Les matériaux sont paramétrés à partir de la bibliothèque des matériaux d'ECOTECT comme suit : double paroi en briques sans isolation pour les murs extérieurs, et simple vitrage pour les ouvertures, et béton armé pour les planchers et les escaliers. Ces caractéristiques sont nécessaires pour le bon fonctionnement de la simulation.

Profils des températures intérieures avant et après intégration d'un capteur à vent

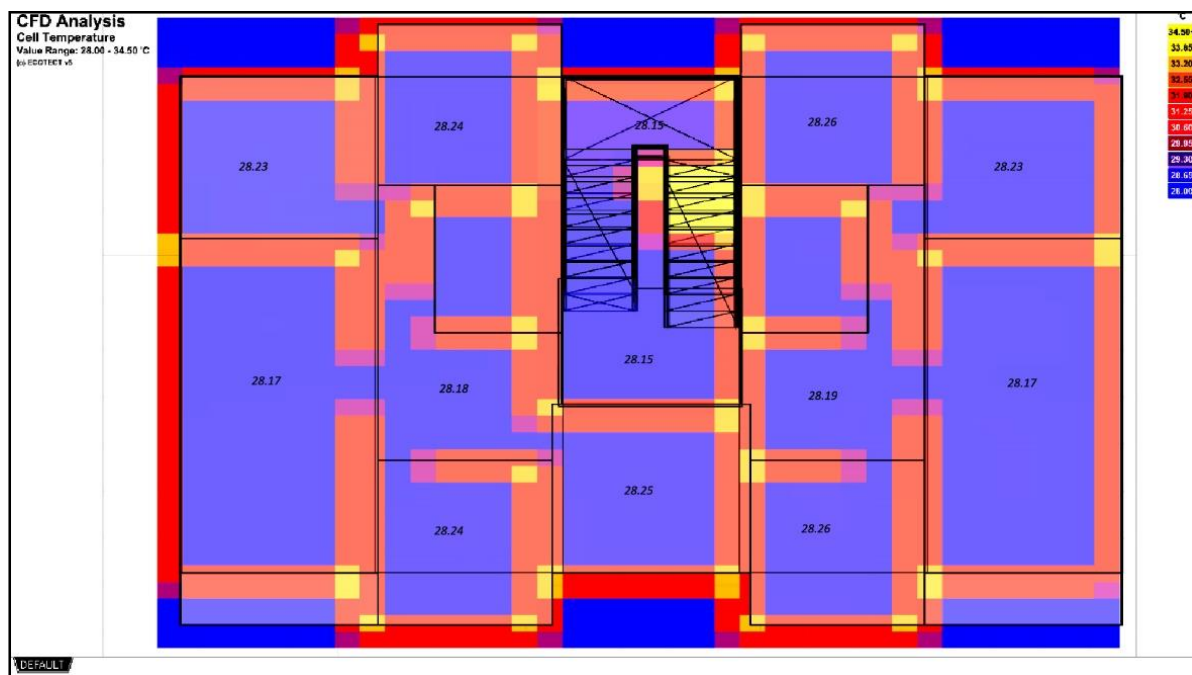


Figure 133: Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle 01/Variante 02 (Source : auteur)

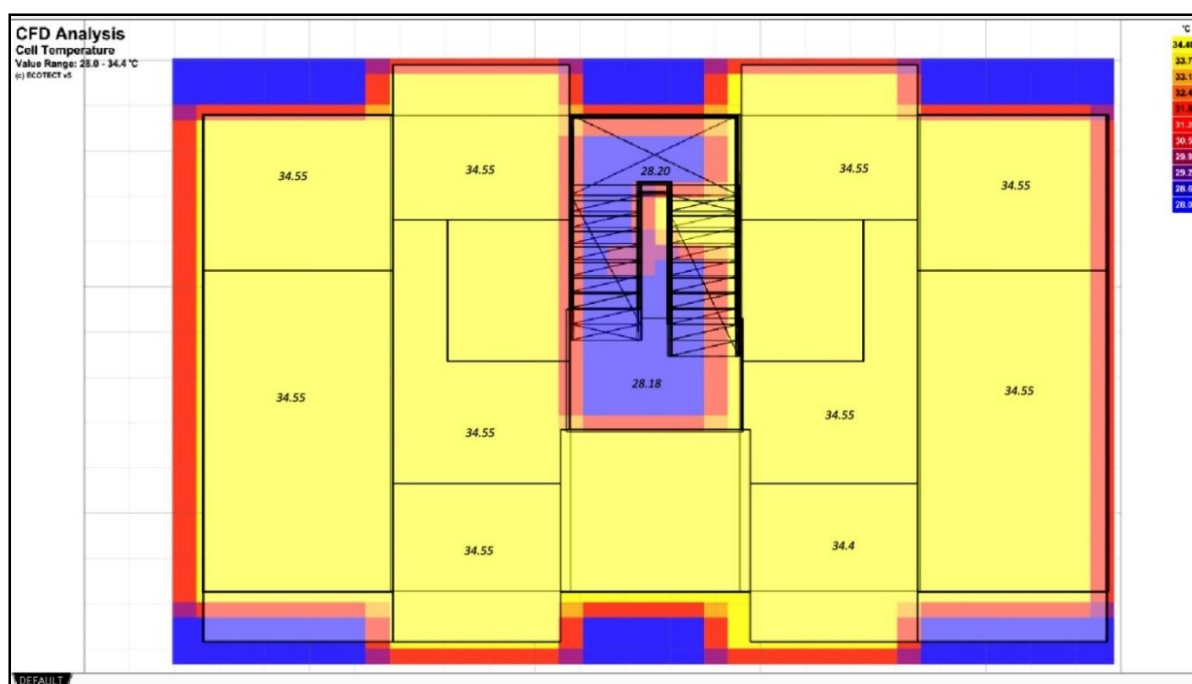


Figure 134: Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle 01/Variante 01 (Source : auteur)

V.2. Comparaison des résultats avant et après intégration du puits provençal

Cette variante 03 du modèle 01 a été modélisée dans le but d'évaluer l'apport que peut avoir le puits provençal dans l'augmentation des vitesses des flux d'air au niveau des ouvertures intégrées dans les portes d'entrée des logements. Il est nécessaire de rappeler que cette variante n'a pas pour objectif principal d'étudier le puits provençal en lui-même, mais beaucoup plus la possibilité de le connecter à une cage d'escalier et l'impact qu'il peut avoir sur l'écoulement d'air en termes de vitesse et sur le rafraîchissement des logements en termes de température.

Dans la *Figure 135*, qui montre les vitesses des flux d'air, nous avons relevé une nette augmentation de la vitesse de l'air (**2.77 m/s**) au niveau de l'ouverture située sur la porte d'entrée du premier étage, par rapport à celle relevée dans la variante 02 (**1.28 m/s**). Cette augmentation s'explique par l'apport en termes de flux d'air provenant de l'ouverture située au-dessous de l'escalier, celle-ci permet d'introduire l'air rafraîchi par le puits provençal dans la cage d'escalier (Mebarki , et al., 2012), ce qui augmente la pression d'air intérieur (*Figure 137*). L'apport en termes de flux d'air frais accentue la différence de pression entre la cage d'escalier et l'intérieur des logements augmentant ainsi la vitesse d'entrée des flux d'air (*Figure 138*).

La *Figure 136*, qui exprime le profil des températures, indique une température de **28.15 °C** à l'intérieur de toutes les pièces du logement. Même si la différence avec la variante 02 est très minime (température abaissée à **28.26 °C** dans une des chambres), cette différence est le reflet de l'augmentation de la vitesse de l'air (**v**) relevée dans la *Figure 135*, celle-ci a un impact direct sur les débits d'air (**q**) au niveau de la section de l'ouverture (**S**) ; suivant la formule (**q = v x S**) (Chatelet, et al., 1994). Nous insistons sur le fait que les données thermiques sont utilisées à titre indicatif pour vérifier la cohérence des résultats en termes de vitesse et de direction des flux d'air, leur précision est limitée dans le cadre de ce travail de recherche axé beaucoup plus sur l'apport de la cage d'escalier dans la ventilation naturelle d'une manière générale. Une étude plus ciblée sur le rafraîchissement passif avec un logiciel de simulation plus approprié peut apporter plus de précisions. (Annexes 08 et 09)

À travers cette simulation, nous avons pu constater qu'une cage d'escalier associée à un double dispositif de rafraîchissement passif, capteur à vent et puits provençal, augmente indéniablement la vitesse de l'air à l'intérieur des logements, ce qui renforce d'une manière considérable le rafraîchissement des espaces intérieurs. La cage d'escalier joue le rôle de collecteur et de diffuseur des flux d'air frais captés par les deux dispositifs.

Profils des températures intérieures avant et après intégration du puits provençal

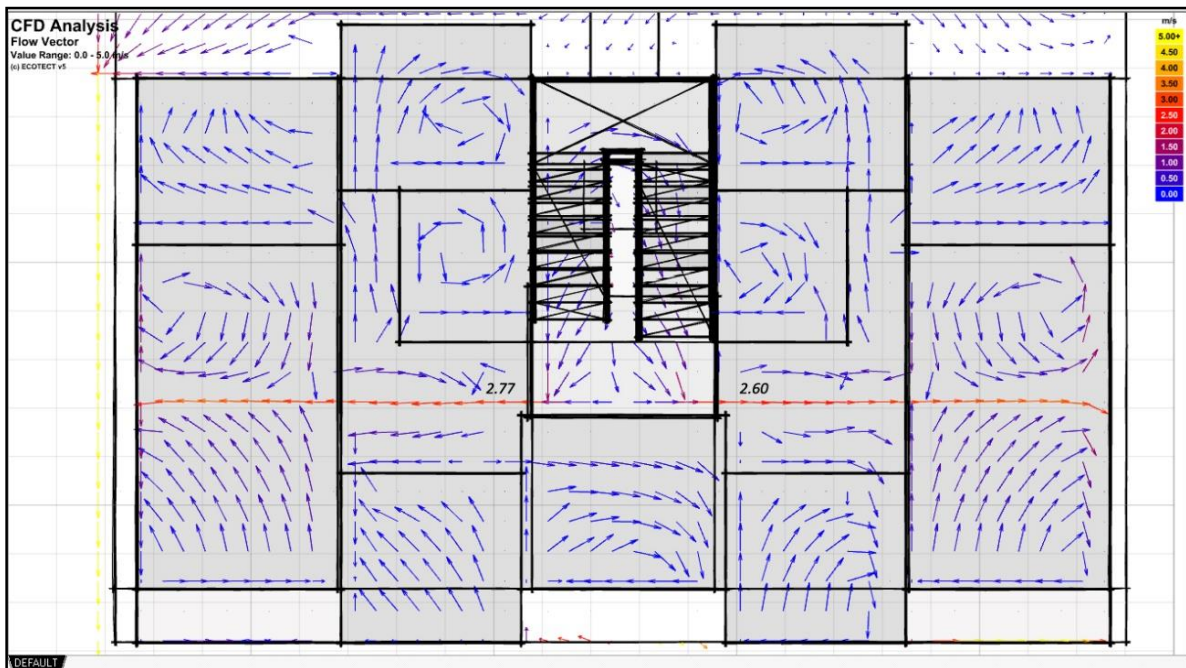


Figure 135: Vue sur plan du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle 01/Variante03 (Source : auteur)

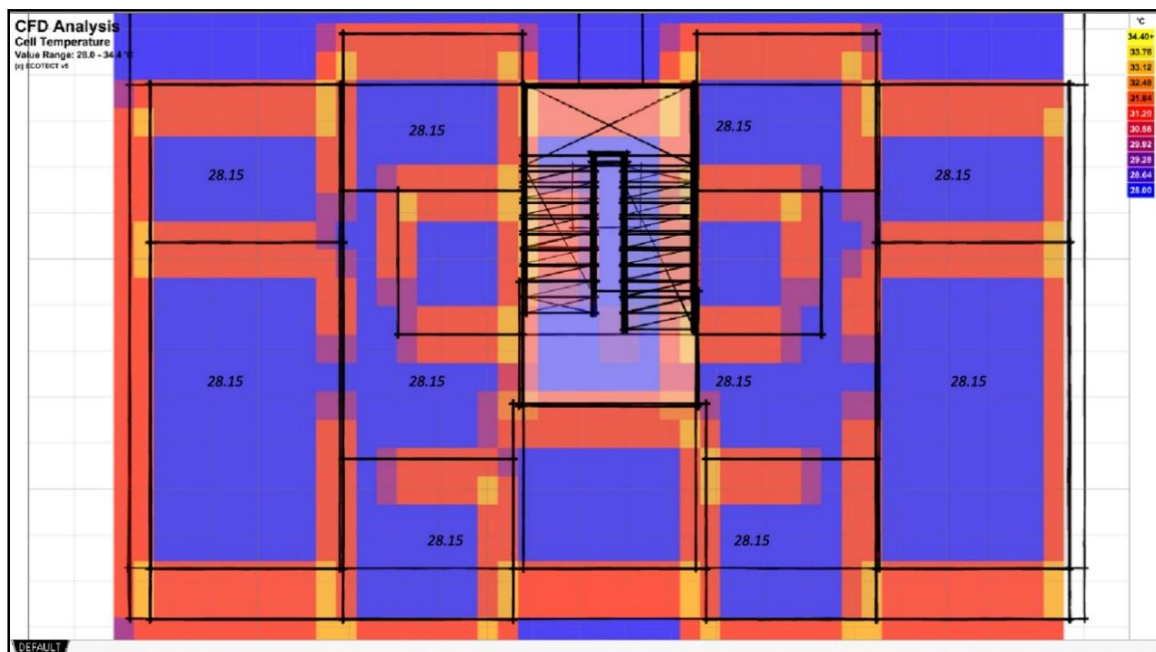


Figure 136: Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle 01/Variante03 (Source : auteur)

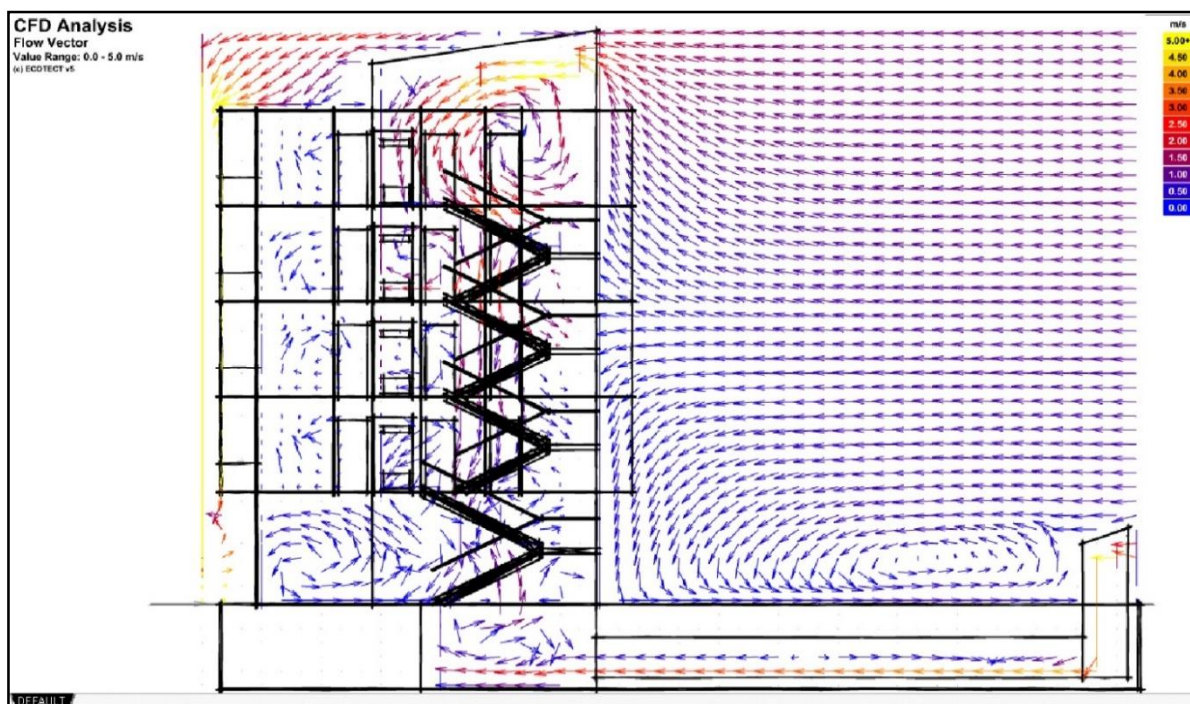
Résultats en coupe après intégration du puits provençal (modèle 01/variante 03)

Figure 137: Vue en coupe du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle 01/Variante03 (Source : auteur)

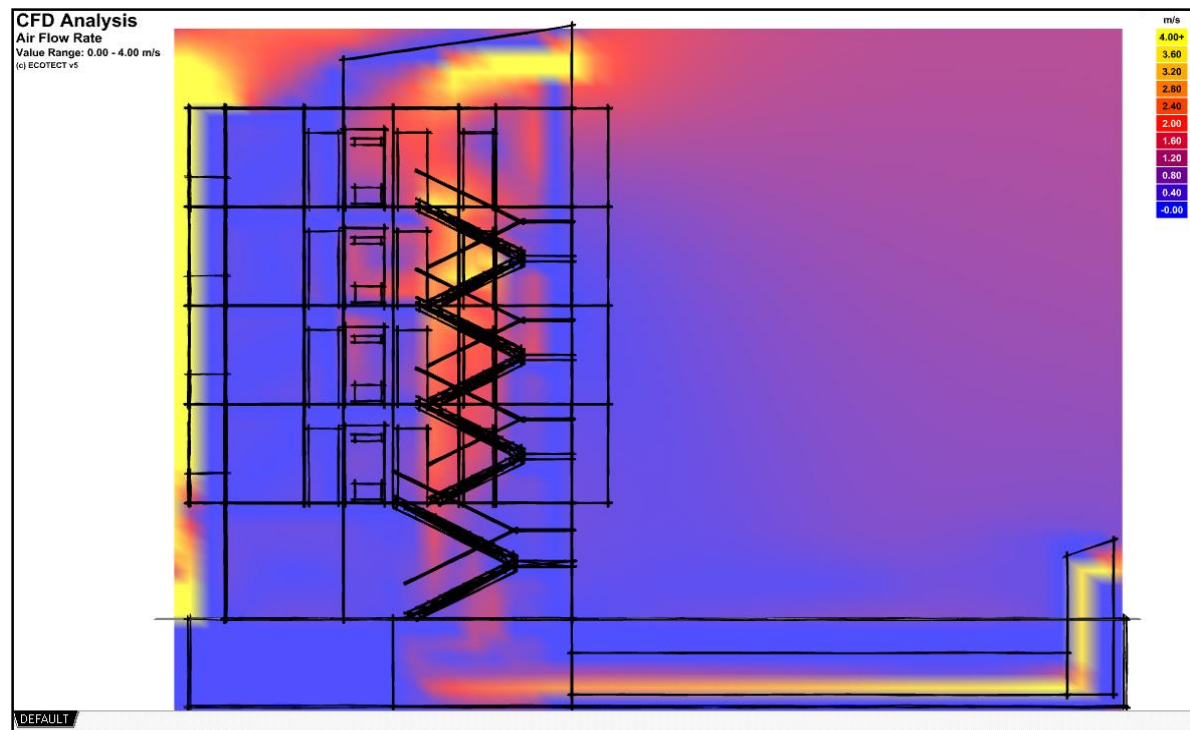


Figure 138 : Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, modèle 01/Variante 03 (Source : auteur)

VI. Évaluation de l'apport de la cage d'escalier comme cheminée d'extraction (scénario 02)

Ce scénario a été élaboré dans le but d'évaluer l'apport de la cage d'escalier comme cheminée d'extraction dans un système de ventilation naturelle dans l'habitat collectif en Algérie, dans un climat méditerranéen (Alger) en hiver.

L'objectif de base de cette simulation est d'évaluer le rôle de la cage d'escalier fonctionnant comme une grande cheminée d'extraction dans un bâtiment d'habitation collectif à quatre logements par palier, en s'appuyant en grande partie sur le tirage thermique (effet cheminée) ainsi que sur la force du vent, ce dispositif vise à explorer des solutions à travers la cage d'escalier aux deux situations suivantes :

- Augmenter le taux de renouvellement d'air dans une stratégie de ventilation hygiénique en hiver, dans le cas où toutes les fenêtres sont fermées (comportement des habitants pour se protéger du froid) (Givoni, 1978).
- Augmenter le rafraîchissement en été dans le cas d'une exposition mono-latérale en créant un flux traversant.

La stratégie recherchée est la ventilation hygiénique en hiver dans un climat méditerranéen. Afin de simuler le contexte climatique d'un bâtiment d'habitation collectif dans la ville d'Alger nous avons introduit les données climatiques d'Alger sous format **wea** dans ECOTECT.

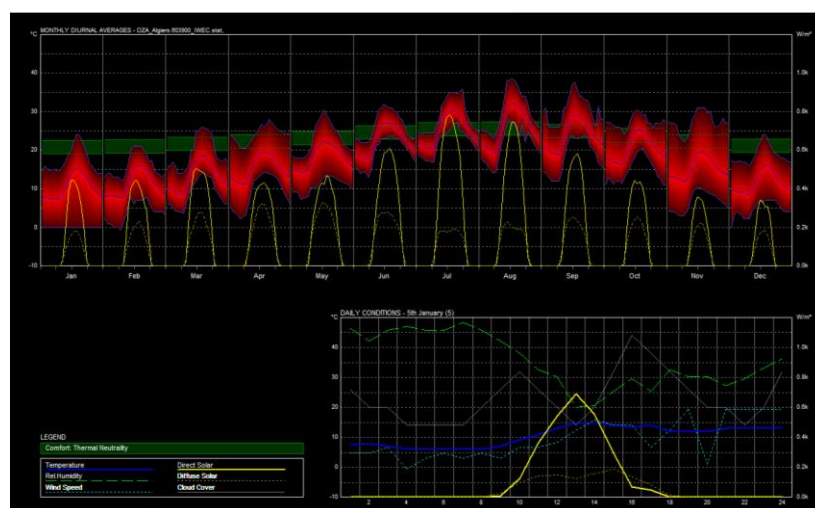


Figure 139 : Données climatiques d'Alger (1996-2005) sous format *WEA* affichées sur *WEATHER TOOL*, *ECOTECT* (source : auteur)

Pour le paramétrage de WINAIR 4 dans le cas de la ventilation naturelle hygiénique en hiver, nous nous sommes basés sur les hypothèses suivantes :

- *La température extérieure* utilisée et celle d'une journée de février ayant la température moyenne minimale le plus faible qui est de **5°C**, celle-ci est introduite dans le champ de la température de l'air extérieur de WINAIR 4 (*Ext. Température*), avec une humidité relative moyenne est de **81%**.(Donné climatique 1996-2005).
- *Présence d'une brise nord* de **0.5m/s**, la vitesse choisie est faible pour pourvoir cibler le tirage thermique dans ce cas de figure.
- *la température intérieure* est fixée à **28 °C** (*Int. Température*), cette température suppose la présence de chauffage conventionnel à l'intérieur des logements.

Dans le cas d'un rafraîchissement d'été par une ventilation traversante avec une exposition mono-latérale, nous nous sommes basés sur les hypothèses suivantes :

- *La température extérieure* utilisée et celle d'une journée d'août ayant la température maximale le plus élevée qui est de **32.7°C**, celle-ci est introduite dans le champ de la température de l'air intérieur de WINAIR 4 (*Int. Température*), afin de se mettre dans la situation la plus défavorable. l'humidité relative moyenne est de **69%**.
- *Présence d'une légère brise de mer* de **0.1m/s** (vents frais), avec une température intérieure de **28 °C** (*Ext. Température*), cette température est basée sur le potentiel de rafraîchissement de la mer dans les zones littorales en été.

VI.1. Description des variantes du modèle de simulation

Dans ce scénario, nous avons utilisé trois variantes du modèle 02 à savoir un bâtiment de R+6 avec quatre logements par palier afin de comparer entre les cas suivants :

VI.1.1. Le bâtiment Témoin (Modèle 02/variante 01)

Dans ce cas de figure, la cage d'escalier ne possède aucune connexion aéraulique avec les logements, les portes d'entrée de ces derniers ne contiennent pas d'ouvertures sur les paliers.

Le volume de la cage d'escalier déborde de **1,50 m** sur la toiture avec une trappe d'accès de service fermée, une configuration classique dans l'habitat collectif en Algérie (voir Figure 140).

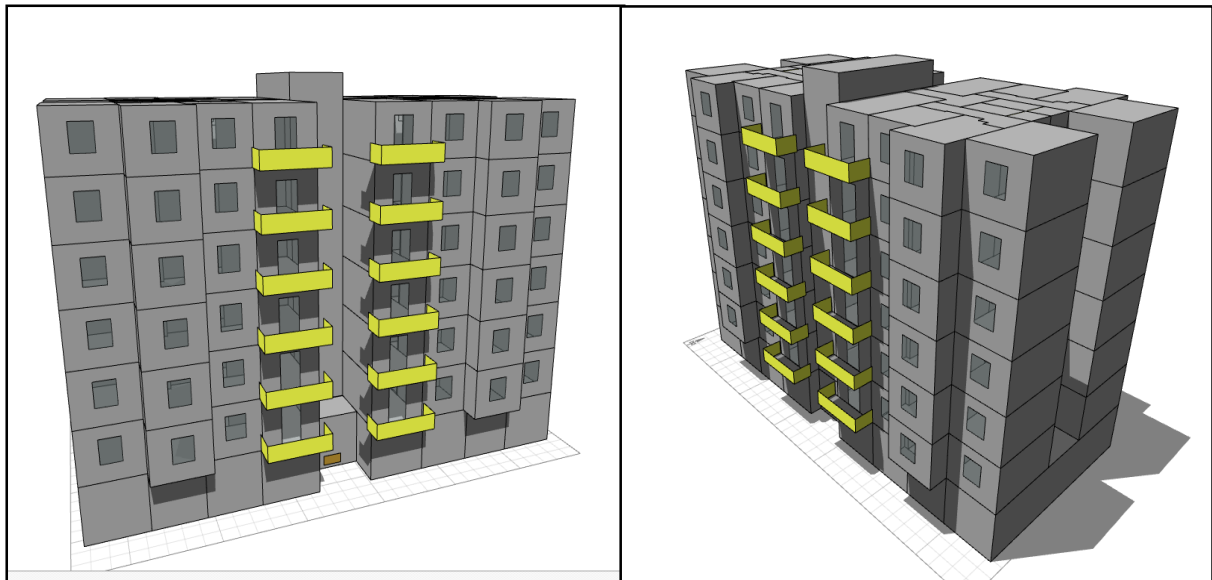


Figure 140: 3D ECOTECT du Modèle 02/variante 01, le bâtiment témoin (Source : auteur)

VI.1.2. La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de ventilation hygiénique en hiver (Modèle 02/variante 02)

Dans ce cas de figure, la cage d'escalier possède des connexions aérauliques avec les logements, les portes d'entrée de ces derniers contiennent des ouvertures sur les paliers. Les fenêtres sur façade sont toutes fermées.

Le volume de la cage d'escalier déborde de **3 m** sur la toiture avec une ouverture d'extraction orientée en plein Sud pour la mettre en dépression (engendré par les vents nord), afin d'évacuer l'air vicié collecté par la cage d'escalier (*Figure 141*).

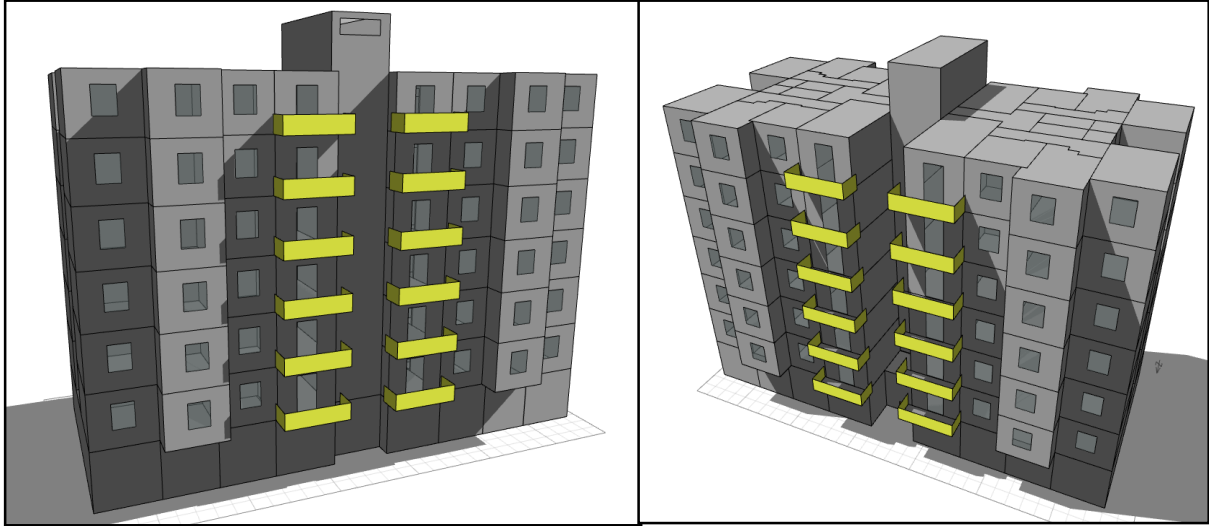


Figure 141: 3D ECOTECT du Modèle 02/variante 02, la cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une ventilation hygiénique en hiver (Source : auteur)

VI.1.3. La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de rafraîchissement d'été par ventilation traversante (Modèle 02/variante 03).

Dans ce cas de figure, la cage d'escalier possède des connexions aérauliques avec les logements, les porte d'entrées de ces derniers contiennent des ouvertures sur les paliers et les fenêtres sont ouvertes afin de canaliser les brises de mer nord.

Le volume de la cage d'escalier déborde de 3 m sur la toiture avec une ouverture d'extraction orientée en plein Sud pour la mettre en dépression (engendré par les brises de mer nord), afin de permettre l'évacuation de l'air chaud (poussé par l'air frais entrant par les fenêtres) à travers la cage d'escalier. Le modèle 02/ variante 02 servira pour cette simulation sauf que les fenêtres seront ouvertes (matériau "vide" (*Void*) à la place du matériau "double vitrage" (*Double Glazed*).Elle constitue la variantes03.

VI.2. Lecture et interprétation des résultats

(Les résultats de simulation d'ECOTECT en capture d'écran sont joints en annexes)

Dans ce cas de figure, nous allons dans un premier temps commenter les résultats de simulation de la cage d'escalier fonctionnant comme cheminée d'extraction dans une stratégie de ventilation naturelle d'extraction (variante 02). Puis nous allons procéder à la comparaison entre les résultats de la variante 01 qui est bâtiment témoin et la variante 03 à savoir la cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de rafraîchissement d'été par ventilation traversante avec une exposition mono-latérale. Cela se fera en visualisant les différents "Outputs" des simulations, en forme de capture d'écran, relatifs aux paramètres suivants :

- Vitesses de l'air à l'intérieur des logements.
- Le taux de rafraîchissement des espaces intérieurs.
- les débits d'air au niveau des portes d'entrée.

Les captures d'écran sur les résultats des simulations en plan sont faites au niveau du deuxième étage, car a priori c'est la situation moyenne à cause de son éloignement de l'ouverture d'extraction. Les résultats sont illustrés sous forme de captures d'écrans illustrant les profils de vitesses et les directions des flux d'air ainsi que les profils de températures, une légende en couleurs est associée à chaque illustration afin d'apprécier les grandeurs.

VI.2.1. La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de ventilation hygiénique en hiver (annexe 10)

Cette variante a été ajoutée pour apprécier le comportement thermo-aéraulique de la cage d'escalier conçue comme une cheminée d'extraction, et intégrée dans une stratégie de ventilation naturelle hygiénique en hiver.

L'objectif principal de cette simulation est d'évaluer le profil de vitesse et des directions des flux d'air soumis au tirage thermique de la cage d'escalier.

La Figure 143 qui montre les vitesses et les directions des flux d'air sur une coupe au niveau de la cage d'escalier, illustre bien le mouvement ascendant de l'air à l'intérieur de la cage d'escalier. Ce phénomène est une conséquence directe du tirage thermique dû :

- au gradient de température (Δp_s) entre l'intérieur ($T_o=28^\circ\text{C}$) et l'extérieur ($T_i=3.1^\circ\text{C}$), qui implique une différence entre les deux masses volumiques ($\rho_o - \rho_i$).
- à la différence de hauteur (ΔZ) entre l'entrée d'air placée sur la porte principale du bâtiment (+0.3m) et l'ouverture d'extraction située sur la cheminée placée sur le toit de la cage d'escalier (+24.4m).

Le concours de ces paramètres engendre une poussée proportionnelle à la différence de pression au niveau des deux ouvertures, basée sur les phénomènes physiques de l'hydrostatique, exprimée dans l'équation suivante (TAREB, 2004)⁴⁷ :

$$|\Delta p_s| = (\rho_o - \rho_i)g \cdot \Delta z = \left(\frac{352.6}{T_o} - \frac{352.6}{T_i} \right) g \cdot \Delta z$$

Figure 144 exprime bien l'impact de la hauteur sur la direction des flux d'air à l'intérieur du bâtiment. Le sens des flux d'air, des logements vers la cage d'escalier, s'inverse à partir du quatrième étage, ce phénomène est intimement lié à la hauteur Z des entrées d'air de chaque logement (IBGE, 2010). La zone d'inversion du sens des flux d'air correspond ainsi à celle du plan de pression neutre **PPN** (Figure 144) :

- Au-dessous du PPN, la pression d'air à l'intérieur des logements est supérieure à celle de la cage d'escalier, ce qui engendre un flux d'air vers l'intérieur de la cage d'escalier, qui va s'évacuer ensuite, dans un mouvement ascendant, par l'ouverture située sur le toit, cette situation est favorable car elle correspond au fonctionnement d'une cheminée d'extraction et permet d'augmenter le débit d'air vicié extrait de l'intérieur des logements.
- au-dessus de ce plan, le sens s'inverse et engendre une situation défavorable, car la pression au niveau de la cage d'escalier, qui dépasse celle de l'intérieur des logements, induit un flux d'air de la cage d'escalier vers les logements. Ce qui est contraire à l'objectif fixé par cette stratégie de ventilation naturelle, car au lieu d'augmenter les débits d'air extraits, ce phénomène d'inversion aggrave les déperditions thermiques par convection.

⁴⁷ TAREB : Projet européen pour l'enseignement de la conception de bâtiments à faible consommation énergétique, incluant les techniques de ventilation naturelle des bâtiments.

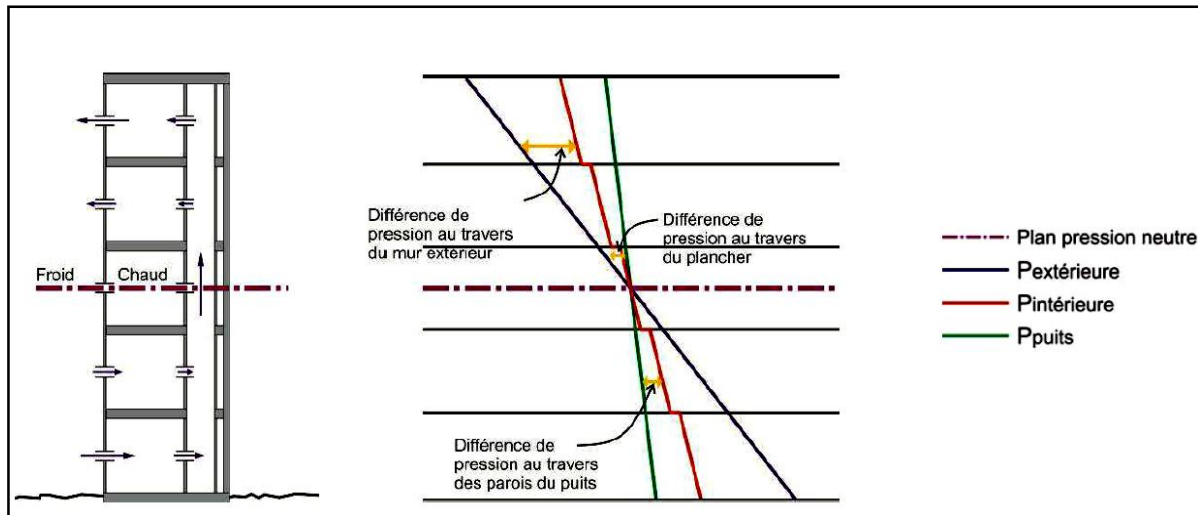


Figure 142: Répartition des pressions sous l'effet du tirage thermique par rapport au PPN. (IBGE, 2010)

Cette simulation a démontré que l'efficacité du dispositif "cage d'escalier/cheminée d'extraction", dans une stratégie de ventilation naturelle hygiénique, s'arrête à partir du plan de pression neutre **PPN**,

La Figure 144 montre que le dispositif fonctionne seulement au niveau des trois premiers étages, au-delà, son impact devient négatif sur le confort des habitants (déperditions thermiques par convection). Plusieurs solutions peuvent être explorées, voir même faire l'objet d'une étude approfondie, pour corriger ces défauts de fonctionnement, parmi l'action à mener dans ce sens :

- Décaler le PPN vers le haut, et ce en augmentant la différence de hauteur entre l'entrée et la sortie d'air au niveau de la cage d'escalier.
- Incrire ce dispositif dans une stratégie de ventilation naturelle assistée, en installant un dispositif d'extraction hybride sur le toit (tourelle à vent avec extracteur statomécanique) et en optant pour des sorties d'air autoréglables et/ou hygroréglables, afin d'éviter l'inversion des flux d'air vers l'intérieur des logements.

Résultats en coupe : la cage d'escalier "cheminée d'extraction" (modèle 01/variante 03)

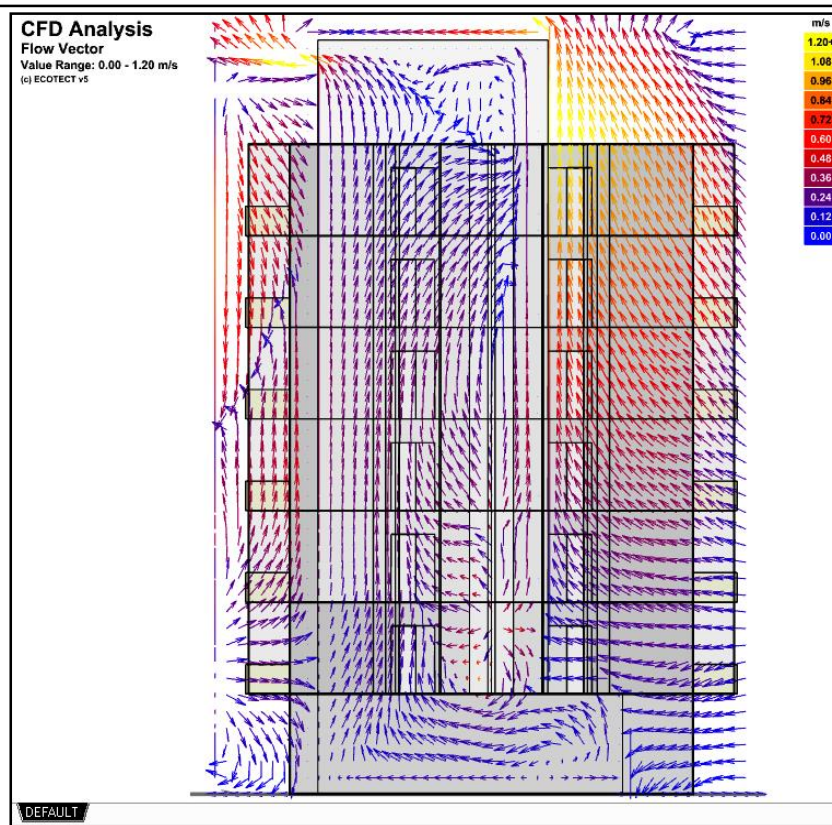


Figure 143: Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, Modèle 02/variante 02 (Source : auteur)

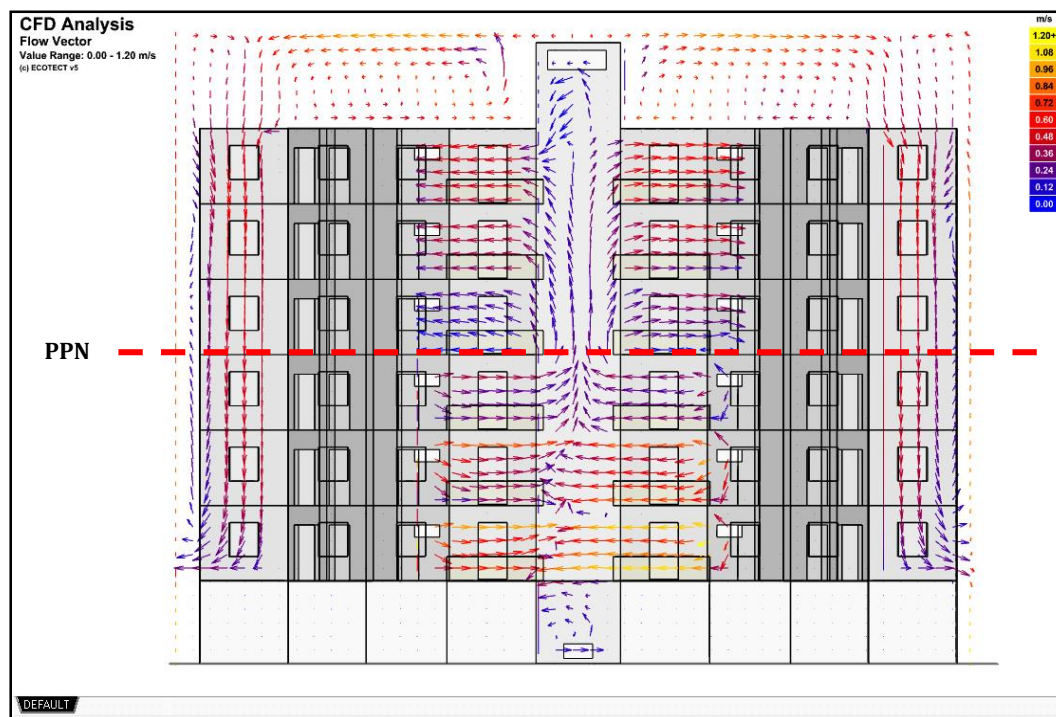


Figure 144: Vue en façade du profil de vitesse des flux d'air, Modèle 02/variante 02 (Source : auteur)

VI.2.2. La cage d'escalier "cheminée d'extraction" dans une stratégie de rafraîchissement d'été par ventilation traversante, cas d'une exposition mono-latérale.

Analyse des résultats de simulation sur le modèle 02 de la variante 03

Cette série de simulations a pour objectif de proposer une solution à la problématique de l'insuffisance de la ventilation mono-latérale en termes de débit et de vitesse de l'air. Cette situation est très fréquente dans les bâtiments à quatre logements par palier, agencés en bande linéaire (alignement sur un boulevard).

Dans ce cas de figure, la cage d'escalier contribue à créer des courants d'air en reliant le côté face aux brises de mer (vent) en surpression, avec le côté opposé en dépression, à travers un écoulement d'air ascendant poussé par la différence de pression. Il est clair que l'ouverture au-dessus de l'escalier doit être sous le vent (en dépression) afin de favoriser l'extraction de l'air chaud. La Figure 145 illustre le principe de cette stratégie de ventilation naturelle d'une manière très schématique

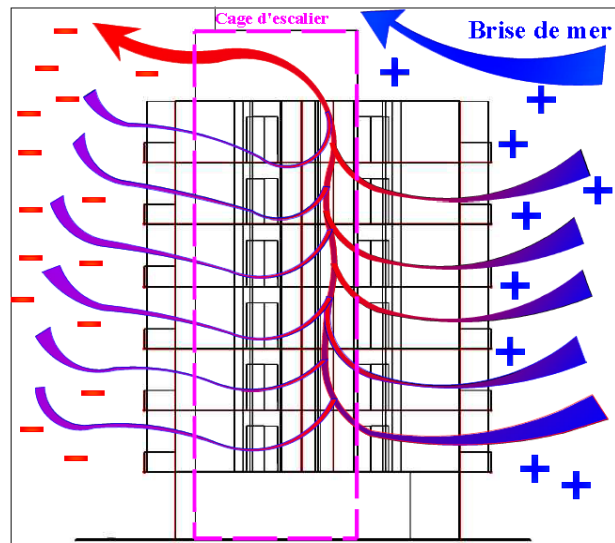


Figure 145: schématisation du principe de la ventilation naturelle traversante basée sur la cage d'escalier (Source : auteur)

La Figure 146 (modèle 02/ variante 01) montre clairement que dans le cas où il n'y a pas d'ouvertures sur l'escalier (ventilation mono-latérale), le balayage des espaces intérieurs est nettement moins efficace que dans le cas la Figure 147 (modèle 02/variante03).

La relation entre l'air intérieur des logements avec celui de la cage d'escalier, assurée par les ouvertures placées sur les portes d'entrée de chaque logement, a engendré un flux traversant à l'intérieur des logements, ce qui a augmenté les vitesses d'air au niveau des fenêtres (entrées d'air), par conséquent le balayage est plus efficace (voir Figure 147 le nombre de vecteurs a augmenté par rapport à celui de la Figure 146).

Cette différence de vitesse et de débits d'air entre la ventilation mono-latérale et la ventilation traversante a un impact direct sur le taux de rafraîchissement. Cet impact se lit clairement sur le profil des températures intérieures des deux variantes :

- dans la *Figure 148* les températures intérieures des logements gravitent autour d'une moyenne de **29.50 °C** et descendent jusqu'à **28.68 °C**, alors que celle de la cage d'escalier, étant isolée de l'extérieur (absence d'ouvertures), indique une température inconfortable de **35.15 °C**.
- par contre dans la *Figure 149* les températures intérieures des logements tournent autour des **28.90°C**, et la température minimale enregistrée est de **28.32 °C**, cependant la cage d'escalier affiche des températures moins importantes que celle de la *Figure 148*, ceci s'explique par le transit des flux d'air frais. Les températures les plus basses sont indiquées dans les deux cas du côté face à la brise de mer, ce qui est cohérent car les vitesses d'air y sont plus importantes que l'autre côté qui est en dépression.

Cette simulation a démontré clairement que la cage d'escalier conçue comme une cheminée d'extraction représente une solution efficace pour remédier aux insuffisances de la ventilation mono-latérale dans le cas des bâtiments à quatre logements par palier, d'autant plus que cette configuration devient de plus en plus très répandue dans l'habitat collectif en Algérie.

Cette solution démontre que la cage d'escalier peut avoir un apport considérable dans le rafraîchissement passif par ventilation traversante, et ce en assurant la connexion entre le côté en surpression face au vent et le côté opposé en dépression. Cette liaison aéraulique augmente le taux de rafraîchissement et surtout la vitesse de l'air à l'intérieur des logements, ce qui est très bénéfique dans les zones littorales où l'impact de l'humidité est conséquent en été, pour une ventilation de confort thermique (chapitre I). La *Figure 145* illustre le principe de cette stratégie de ventilation naturelle d'une manière très schématique.

Profil de vitesse et direction des flux d'air au niveau du 4^{ème} étage

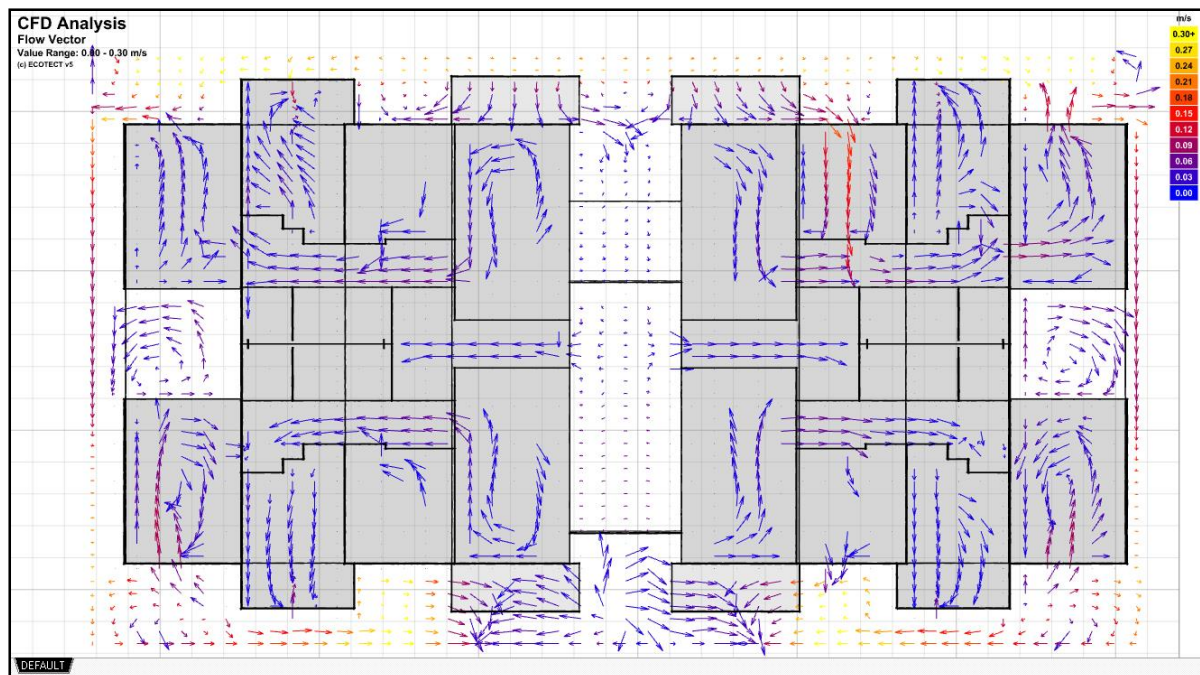


Figure 146: Vue en plan profil de vitesse et directions des flux d'air, modèle 02/variante 01 (Source : Auteur)

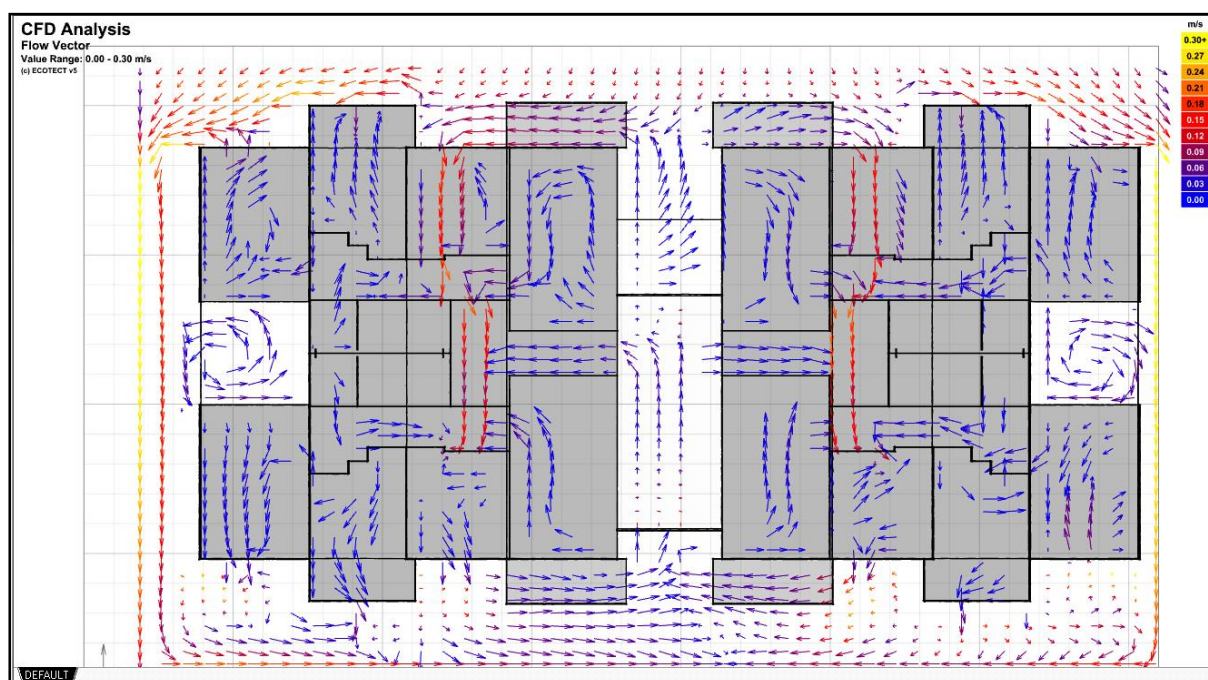


Figure 147 : Vue en plan profil de vitesse et directions des flux d'air, modèle 02/variante 03 (Source : Auteur)

Profil de températures intérieures au niveau du 4^{ème} étage



Figure 148: Vue en plan du profil de températures intérieures, modèle 02/variante 01 (Source : auteur)

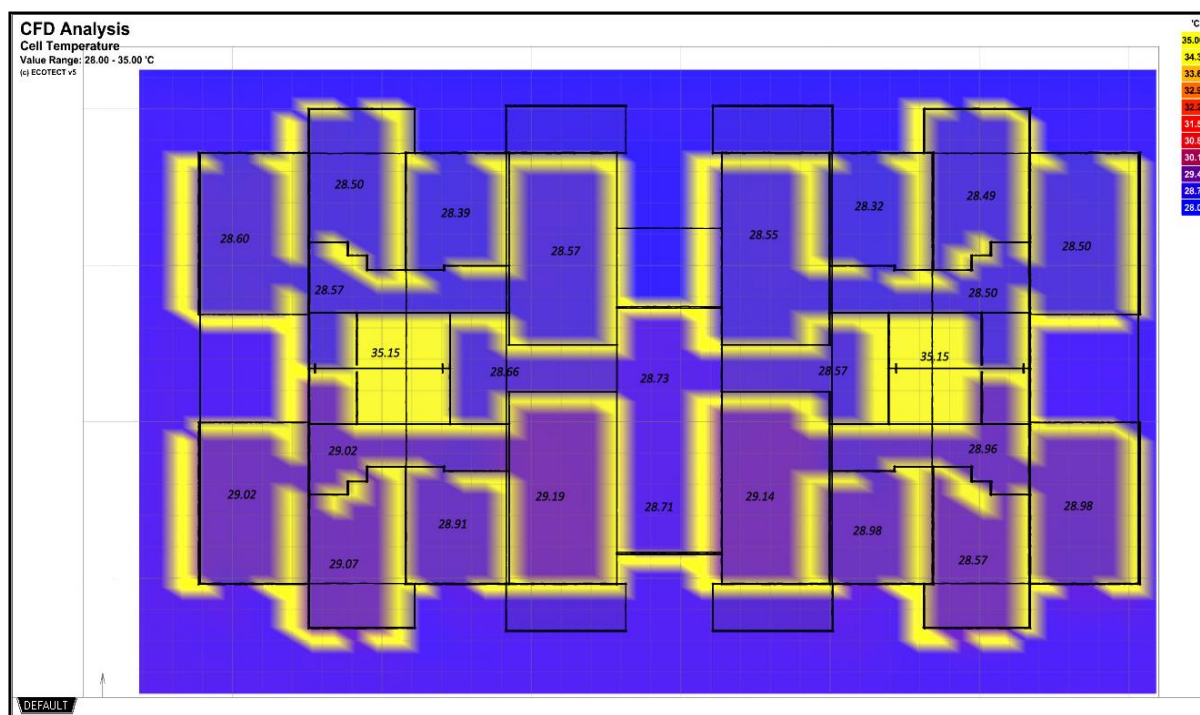


Figure 149: Vue en plan du profil de températures intérieures, modèle 02/variante 03 (Source : auteur)

VI.3. Synthèse

Les différentes simulations effectuées ont permis de mettre en valeur les potentialités que recèle la cage d'escalier en termes de solutions passives à la problématique de la ventilation naturelle dans l'habitat collectif en Algérie, ainsi que la spécificité de son comportement thermo-aéraulique dû à sa géométrie qui assure une liaison verticale entre les différents niveaux d'un bâtiment.

Les résultats obtenus à travers ces simulations ont démontré que la cage d'escalier constitue indéniablement une solution à explorer pour nous architectes dans l'élaboration des stratégies de ventilation naturelle dans l'habitat collectif en Algérie.

Après avoir procédé à une lecture des différents résultats dans les points précédents, nous avons résumé les enseignements en termes de conception tirés de chaque variantes de simulations suivant les stratégies de ventilation naturelle recherchée.

- la cage d'escalier associée à un capteur à vent (*modèle 02/variante 02*) peut être efficace voire même une des solutions bioclimatiques à la problématique du rafraîchissement passif de l'habitat collectif dans le climat semi-aride en Algérie.
- La cage d'escalier de par sa configuration spatiale joue le rôle de collecteur et de diffuseur d'air vers les différents niveaux du bâtiment, tel un grand conduit vertical de ventilation qui met en relation des zones de différentes pressions en provoquant un mouvement d'air ascendant et/ou descendant.
- La présence d'ouvertures intégrées dans les portes d'entrées des logements assure un apport considérable en air frais, celui-ci intercepté par le capteur à vent puis canalisé par la cage d'escalier, il est acheminé à travers ces ouvertures vers les espaces intérieurs.
- L'association d'un puits provençal au dispositif cage d'escalier /capteur à vent (*modèle 02/variante 03*) renforce la vitesse de l'air à l'intérieur des logements et augmente l'efficacité du rafraîchissement passif.

- la cage d'escalier permet d'augmenter les débits de renouvellement d'air en fonctionnant comme une grande cheminée d'extraction (*modèle 02/variante 02*) dans un bâtiment d'habitation collectif à quatre logements par palier.
- la position du PPN (plan de pression neutre) dans la cage d'escalier est déterminante dans l'efficacité de cette stratégie, car il permet de déterminer le sens des flux d'air à l'intérieur du bâtiment.
- Le recours à une assistance mécanique (tourelle d'extraction, ouvertures auto-réglables, ventilateurs...) permet d'éviter le phénomène de refoulement vers l'intérieur des logements (inversion de l'écoulement d'air). Une réflexion autour d'une ventilation naturelle assistée constitue une bonne perspective pour plus d'efficacité.
- La cage d'escalier s'avère une solution efficace pour remédier aux insuffisances d'une ventilation mono-latérale dans le cas des bâtiments à quatre logements par palier (*modèle 02/variante 02*).
- la cage d'escalier assure un apport considérable en termes de rafraîchissement passif par ventilation traversante en créant une connexion entre le côté en surpression face au vent et le côté opposé en dépression dans les logements à une seule façade (mono-exposition).
- Cette stratégie permet d'augmenter le taux de rafraîchissement et surtout la vitesse de l'air à l'intérieur des logements, celle-ci est très recherchée dans les zones littorales où l'impact de l'humidité est conséquent en été, pour une ventilation de confort thermique.

A travers, ces simulations, dont l'objectif n'est pas de dimensionner ces différents dispositifs passifs ni d'étudier l'habitat collectif en Algérie, nous ont permis de vérifier la faisabilité de l'élaboration de stratégies de ventilation naturelle basées sur la cage d'escalier.

Des études plus ciblées de chaque dispositif moyennant d'autres logiciels de simulation plus spécialisés peuvent apporter plus de détails en termes de dimensionnements et de conception.

Conclusion générale

A travers ce travail de recherche, qui a pour objectif initial d'explorer des solutions passives de ventilation naturelle dans l'habitat collectif en Algérie, nous avons essayé de reconsidérer la cage d'escalier, au-delà de sa fonction originelle de circulation verticale, en tant que composant principal d'un dispositif de ventilation naturelle.

Répondre à notre problématique a nécessité d'appréhender notre thème à travers un regard d'architecte tout en donnant une base scientifique aux éléments de réponse apportés.

L'état de l'art autour des stratégies de ventilation naturelle a montré clairement l'intérêt particulier que suscite la cage d'escalier chez les architectes et les ingénieurs, ceci est lié d'une part aux possibilités qu'offre cet espace en termes d'expressions architecturales et d'autre part à sa configuration spatiale et géométrique qui lui permet de relier verticalement tous les volumes d'air qui constituent l'intérieur d'un bâtiment. C'est dans cette optique que nous avons construit notre hypothèse qui consistait à considérer la cage d'escalier comme espace clé dans la ventilation naturelle de l'habitat collectif en Algérie.

Le recours à la simulation, qui est désormais un outil incontournable de la conception bioclimatique, a été motivé par les possibilités qu'offre l'association d'ECOTECT avec WINAR4 en matière de recherches de solutions passives de ventilation naturelle, dans le seul but de vérifier nos hypothèses.

Ainsi nous avons vu, à travers une première série de simulations, que la cage d'escalier associée d'abord à un capteur à vent puis à un puits provençal, constitue un dispositif de rafraîchissement passif efficace dans un climat semi-aride comme celui de Biskra, dont elle sera l'élément principal qui joue le rôle de capteur et de diffuseur d'air frais à l'intérieur des logements.

La deuxième série de simulations a démontré, dans un contexte climatique méditerranéen qui est celui d'Alger, l'apport considérable que peut avoir la cage d'escalier, conçue comme une cheminée d'extraction, dans la ventilation naturelle d'un bâtiment résidentiel à quatre logements par palier. D'une part dans une stratégie de ventilation naturelle hygiénique en hiver en augmentant le taux de renouvellement d'air, et d'autre part en améliorant le rafraîchissement passif en été, comme solution à une exposition mono-latérale basée sur une ventilation traversante.

A travers ces premiers éléments de réponses, nous avons constaté que la problématique de la ventilation naturelle est aussi riche que complexe à traiter, et ce qui a été avancé dans ce travail de recherche n'est qu'une première esquisse qui ne prétend qu'à déclencher une réflexion autour du rôle que peut revêtir la cage d'escalier dans les stratégies de ventilation naturelle.

Par conséquent, les résultats atteints dans le cadre de cette recherche représentent une base de lancement théorique qui vise à ouvrir la porte à d'autres études, à la quête d'un objectif ultime qui est celui d'aboutir à des solutions bioclimatiques concrètes et réalisables dans le contexte de l'habitat collectif en Algérie.

BIBLIOGRAPHIE

- ADEME**, *"Faites respirer votre maison avec la ventilation, l'habitat individuel"*, guide d'information sur la ventilation, ADEME, France, 2009.
- Al Awadhi M H**, *"Comfort Assessment of a Fully/Semi-enclosed Courtyard: Case Study of Bahrain Low Rise Villa Housing Model"*, Dissertation submitted in partial fulfillment of MSc in Sustainable Design of the Built Environment, the British university in Dubai 2011.
- Alexandri E, Jones P**, *"Sustainable Urban Future in Southern Europe - What about the Heat Island Effect?"*, ERS2006, 30/8-3/9/2006, Volos, Welsh School of Architecture, Cardiff University, Wales, United Kingdom, 2006.
- Allard F**, Natural ventilation of building, a design handbook, London, James & James Ltd, 1998, 356p.
- Altan H, Tabriz M.B.** *"Using Wind Catchers as a Passive Cooling System for Residential Buildings in Cyprus"*, 1st Asia Conference of International Building Performance Simulation (ASim 2012), Simulation for Real Performance Shanghai, Proceedings, China, 25th-27th November 2012.
- ARENE**, *«Guide Bio-tech : Ventilation naturelle et mécanique"*, ARENE Île-de-France et ICEB institut pour la conception environnementale du bâti, Février 2012.
- ASHRAE**, *"2009 ASHRAE Handbook - Fundamentals"*, Chapter 20, 21, 24, Atlanta, USA, 2009.
- AVEMS**, *"Guide de conception, de dimensionnement et de mise en place de la ventilation naturelle et hybride, Habitat collectif et individuel"*, Association professionnelle des industriels français pour la valorisation en ventilation de l'extraction mécanique-statique ou statique, Edition de septembre, 2010.
- AZIEZ A**, *"Outil d'évaluation des performances des systèmes de Ventilation Naturelle et Ventilation Hybride"*, Master 2 SDI spécialité MFE, CSTB, Année 2006/2007.

- Baker N, Steemers K.**, *Energy and Environment in Architecture*, E&FN Spon, London, 2000, 167p.
- Barroso-Krause C**, "*La climatisation naturelle : modelisation des objets architecturaux, aide à la conception en climat tropical*", thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines de Paris, Paris, 1995.
- Boivin H**, "*La ventilation naturelle. Développement d'un outil d'évaluation du potentiel de la climatisation passive et d'aide à la conception architecturale*", thèse de doctorat, Faculté d'aménagement, architecture et arts visuels université Laval, Québec, 2007.
- Bouchahm, Y**, "*La performance thermique du capteur à vent pour un rafraîchissement passif dans les régions chaudes et arides cas de Ouargla*», thèse de doctorat, Université de Constantine. Constantine, 2003.
- Bouchahm Y**, "*The experimentation of improved evaporative cooling wind tower in real office building*", PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October 2008.
- Bouffard É**, "*Conception de bâtiments solaires : méthodes et outils des architectes dans les phases initiales de conception*", Mémoire de maîtrise en sciences de l'architecture, Québec, Canada, 2013.
- Boyer H**, "*Conception thermo-aéraulique de bâtiments multizones. Proposition d'un outil à choix multiple des modèles*", thèse de doctorat, Ingénieur de l'Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, Montpellier 1993.
- Buhagiar V M, Calleja H**, "*Lighting and Thermal Performance of Innovative Shading Devices: New Insights into their Aesthetics and Control in a Mediterranean Climate*", PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Dublin, 22nd to 24th October, 2008.
- Cadoni G**, "*Les systèmes passifs de rafraîchissement, une alternative à la clim dans les bâtiments à usage d'habitation ou de bureaux ?*", Acte de Séminaire doctoral n°1, ENSA-Marseille, 18 juin 2009, p.83-88.
- Catalina T, Virgone J, Roux J, Blanco E**, « *Effet de l'inertie thermique, de la surface vitrée et du coefficient de forme sur les besoins en chauffage d'une habitation* ». IBPSA France. 2008.

- Chatelet A, Fernandez P, Brejon P,** "Architecture climatique : une contribution au développement durable", Tome 1 : bases physiques, ". Aix-en-Provence, Edisud. 1994,160p.
- Chatelet A, Fernandez P, Lavigne P,** "Architecture climatique : une contribution au développement durable", Tome 2 : concepts et dispositifs, Aix-en-Provence, Edisud. 1998, 190p.
- CIBSE.** "*AM10 Natural Ventilation in Non-Domestic Buildings*", CIBSE Applications Manual 10, London, 2005.
- CNERIB,** « DTR C3.31, Ventilation naturelle - Locaux à usage d'habitation », Alger, 2006.
- CSTB,** "*ventilation des bâtiments, réhabilitation dans l'habitat collectif*", Guide Réglementaire, 2003.
- Design Manual 11.02,** "*Natural ventilative cooling of building*", department of the navy, USA, 1986.
- Dhalluin A,** "*Etude de stratégies de ventilation pour améliorer la qualité environnementale intérieure et le confort des occupants en milieu scolaire*", thèse de doctorat université de la Rochelle, la Rochelle, France, 2013.
- El-Shorbagy A,** «*Design with Nature: Windcatcher as a Paradigm of Natural Ventilation Device in Buildings*», International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS Vol: 10 No: 03, 2010.
- Faure X, Flaman O,** "*Etude du confort au vent autour du projet de la Canopée des Halles à Paris*", CSTB, Paris, Octobre 2009.
- Fezzioui N, Benyamine M et al.** "*Performance énergétique d'une maison à patio dans le contexte maghrébin (Algérie, Maroc, Tunisie et Libye)*", Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°3 – 399 – 405, 2012.
- Fezzioui N, Droui B, Benyamine M, Larbi S.** "*Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien*". Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 25 – 34, 2008.

- Flory-Celini C**, "*Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel existant*". Thèse de doctorat, Université Lyon 1 Claude Bernard, 2008.
- Gezer N A**, "*The effects of construction materials on thermal comfort in residential buildings; an analysis using ECOTECH 5.0*", a thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of the Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2003.
- Givoni B**, *L'homme, l'architecture et le climat*. Paris. Edition du Moniteur.1978, 460 p.
- Haj Hussein M**, "*Investigation sur la qualité des ambiances hygrothermiques et lumineuses des habitats palestiniens. La cour : contribution environnementale et socioculturelle*", thèse de doctorat, Université Bordeaux 1, 1996.
- Handegord G.O**, «Ventilation des maisons» ; Regard 83 sur la Science du bâtiment : "Humidité, condensation et ventilation dans les maisons" Canada, 1983.
- Haraoubia I**, "*La qualité du logement social en Algérie. Regard sur les ouvrages de gros-œuvre*", thèse, Ecole nationale supérieure d'architecture de Marseille, 2011.
- Ho-fu Wu Hao-Yang Wei** et al. "*Natural ventilation applications in hot-humid climate: a preliminary design for the college of design at NTUST*", Proceedings of the 17th Symposium for Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Austin Texas, août 24-25, 2010.
- Hohotă R, Colda I, Enache D**, "*Etude numérique des « puits canadiens » pour la diminution des consommations énergétiques liées à la ventilation des bâtiments*", IBPSA France, 2008.
- IBGE** (institut bruxellois pour la gestion de l'environnement), "*fiche 1.1 : L'étanchéité à l'air : points d'attention récurrents en phase de conception*", rapport technique "bâtiments exemplaires , septembre ", 2010.
- Izard J L**, "*Archi bio*". Parenthèse, Marseille, 1979, 131 p.
- Izard J L**, *Architecture d'été, construire pour le confort*, Edisud, Marseille, 1993, 141 p.
- Izard J L**, *la ventilation naturelle des bâtiments*, PDF, EnviroBAT-Méditerranée, Août 2006.

- Kleiven T**, "*Natural Ventilation in Buildings Architectural concepts, consequences and possibilities*", thèse de doctorat, Norwegian University of Science and Technology, Norvège Mars 2003.
- Koffi J**, "*Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles*", thèse de doctorat, université de la Rochelle, la Rochelle, 2009.
- Lajoie P, Leclerc J M, Schnebelen M**, "*La ventilation des bâtiments d'habitation : impacts sur la santé respiratoire des occupants*", Institut national de santé publique du Québec, février 2006.
- Liébard. A, De Herde. A**, *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*, Ed. Observ'ER, Paris, France, 2005. 776p.
- Lopez Diaz M**, "*Maitrise des ambiances 3 thermiques* ", cours n°6, Ecole nationale supérieure d'architecture de Paris la Villette, Novembre 2012.
- Mansouri Y**, "*Conception des enveloppes de bâtiments pour le renouvellement d'air par ventilation naturelle en climats tempérés : proposition d'une méthodologie de conception*", thèse de doctorat, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, Nantes ,2003.
- Mansouri Y, Allard. F, Musy M**, "*Conceptual implementation of natural ventilation strategy*", IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands, August 11-14, 2003.
- Mebarki B, Draoui B, Abdessemed S**, "*Etude d'un système de climatisation intégrant un puits canadien dans les zones arides, cas de Béchar*", *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 15 N°3 (2012) 465 – 478, Algérie, 2012.
- Merzeg A**, "*La réhabilitation thermique de l'habitat contemporain en Algérie*", mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi ousou, 2010.
- Ministère de la Région wallonne**, Direction Générale des Technologies, de la Recherche et de l'Energie, "*Guide pratique de la ventilation naturelle des habitations*", 2002.
- Ministère de l'Énergie et des Mines**, "*Le bilan énergétique national 2011*", PDF, Alger, édition 2012.

- Mozaffarian R**, "*Natural ventilation in buildings and the tools for analysis*", a thesis presented to the graduate school of the University of Florida in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in building construction, University of Florida, 2009.
- Musy M**, "*Génération automatique de modèles zonaux pour l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments* ", thèse de doctorat université de la Rochelle, la Rochelle, France, 1999.
- Owen M**, "*Ecotect Presentation*", institute for advanced architecture of Catalonia, Espagne, 2010.
- Pacer**, "*Architecture climatique équilibrée Conception, démarche et dimensionnement*", Office fédéral des questions conjoncturelles, Berne, 1996.
- RAGE**, "*VMC simple flux en habitat collectif – rénovation*", Recommandations professionnelles. Règles de l'Art Grenelle Environnement 2012, février 2013.
- Raverau. A**, *Le M'Zab, une leçon d'architecture*, Ed. Sindbad, 1981, 221p.
- Regard M**, "*Contribution à l'étude des mouvements d'air dans le bâtiment à l'aide d'un code de champ : application à la ventilation naturelle d'un local par une ou deux grandes ouvertures*", thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 1996.
- Roux J, Gavan V, Muresan C**, "*Modélisation et simulation combinée des effets thermiques et visuels d'une façade de type double-peau sur une zone. Application à la commande optimale*", IBPSA France, 2008.
- Russel M, Sherman M, Rudd A**, "*Review of Residential Ventilation Technologies*", Lawrence Berkeley National Laboratory, LBNL 57730, août 2005.
- Sacré C, Millet J, Gandemer J, Barnaud G**, « Guide sur la climatisation naturelle de l'habitat en climat tropical humide ; Tome 1, CSTB, **1992**.
- Sami-Mécheri S, Semmar D, Hamid A**, "*Efficacité énergétique des logements à haute performance énergétique, 'HPE' : Application au site de Béchar*", Revue des Energies Renouvelables Vol. 15 N°2 (2012) 357 – 364, 2012.

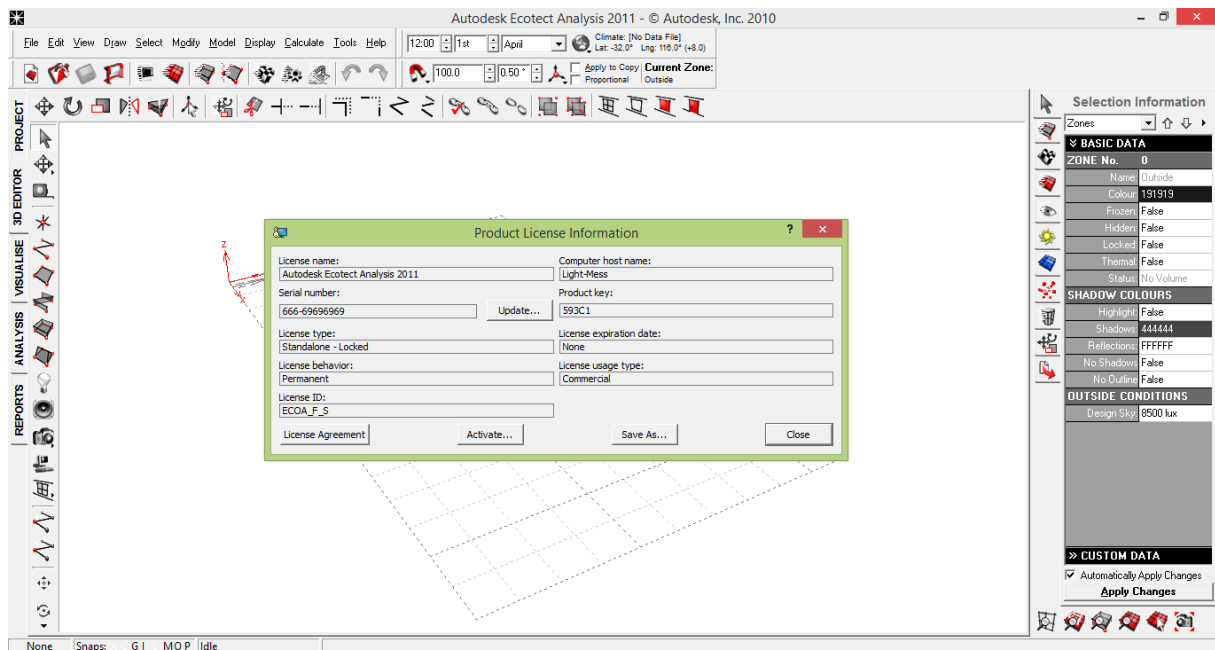
- Semahi S, Djebri B**, " *La conception des logements à haute performance énergétique (HPE) en Algérie - proposition d'un outil d'aide à la conception dans les zones arides et semi-arides*", Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 551 – 568, 2013.
- Suzanne et Pierre Déoux**, Le guide l'habitat sain, deuxième édition, Editions Medieco, Andorre, France, 2004, 537 p.
- Szokolay S V, Auliciems A**, "Thermal comfort", PLEA: Passive and Low Energy Architecture International in association with the university of Queensland dept. of Architecture, 1997.
- Szucs A, Moreau S**, "conception des ambiances climatiques lumineuses et acoustiques dans les stades, méthodologie et conseils pratique", Guide d'aide à la conception CSTB, 2007.
- TAREB**, "modules spécialisés sélectionnés du Mastereuropéen : Ventilation naturelle", Projet européen pour l'enseignement de la conception de bâtiments à faible consommation énergétique, 2004.
- Thellier, F**, "Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive", thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines de Paris, Paris, 2008.
- Trocmé M**, "Aide aux choix de conception de bâtiments économes en énergie ", thèse de doctorat, école nationale supérieure des mines de Paris, Paris, 2009.
- Twinn C**, " BedZed", the Arup journal PDF, 2003.
- William J.N. Turner & Iain S. Walker**, "Advanced Controls and Sustainable Systems for Residential Ventilation", Lawrence Berkeley National Laboratory, USA, December 2012.
- Woloszyn M**, "Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones proposition d'une stratégie de résolution du système couple", thèse de doctorat, institut national des sciences appliquées de Lyon, 1999.
- Zock JP, Jarvis D, Luczynska C, et al.** "Housing characteristics, reported mold exposure, and asthma in the European community respiratory health survey". *J Allergy Clin Immunol* 2002; 110: 285-92.

Webographie

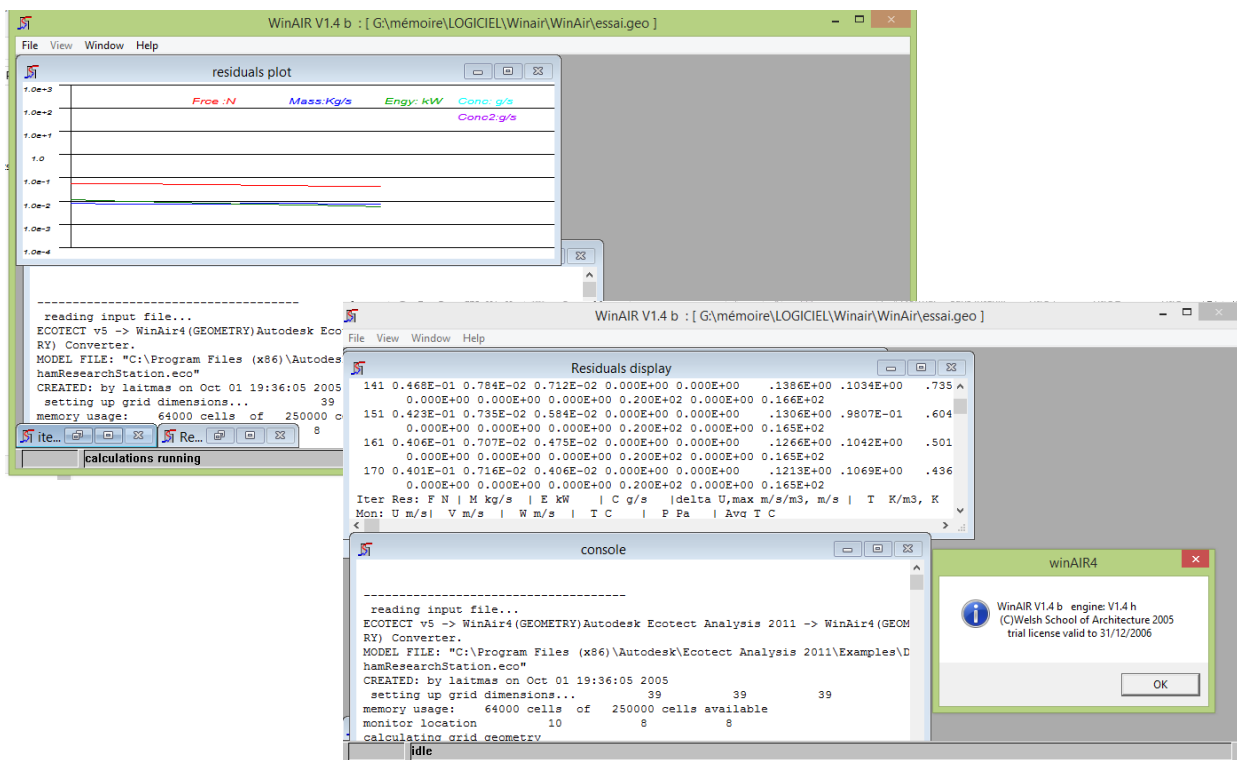
-  <http://www2.ademe.fr/>
-  http://wiki.naturalfrequency.com/wiki/Ecotect_Tutorials
-  www.energie.wallonie.be
-  <http://www.bruxellesenvironnement.be/>
-  www.richard-tolouie.com
-  <http://www.astato.com>
-  <http://ocw.mit.edu/index.htm>
-  <http://www.atelierphilippemadec.fr>
-  www.zedfactory.com/
-  www.flickr.com
-  <http://www.lausanne.ch>
-  www.personal-architecture.nl
-  www.opgi.dz
-  <http://www.dezeen.com>
-  <http://votrongnghia.com>
-  www.ieemaster.civil.aau.dk
-  <http://cmiserver.mit.edu>
-  <http://www.khr.dk/>
-  <http://www.cstb.fr/>

-  <http://www.astato.com/>
-  <http://usa.autodesk.com>
-  <http://www.new-learn.info/packages/tareb/fr/index.html>
-  <http://www.lausanne.ch>
-  <http://theses.ulaval.ca>
-  www.ieemaster.civil.aau.dk
-  http://www.proxyarch.com/wiki/index.php?title=Computational_Fluid_Dynamics
-  <http://www.cardiff.ac.uk/archi/cribe>

Annexes

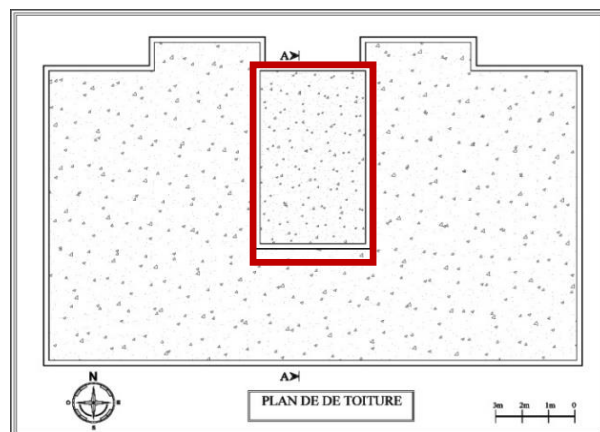
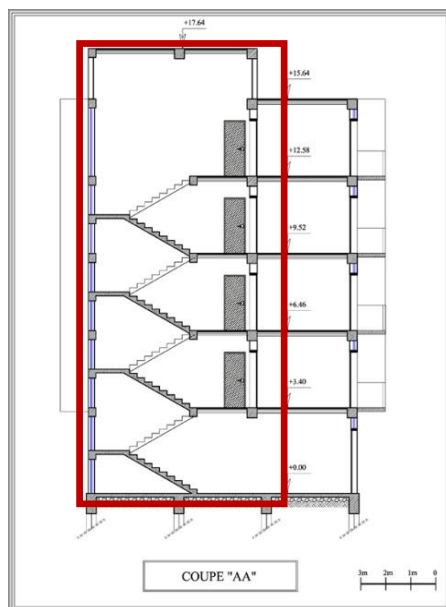
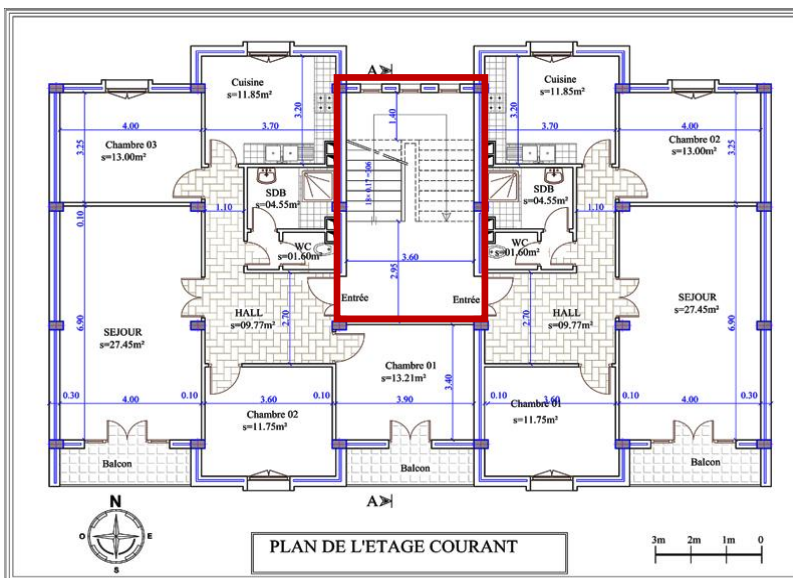
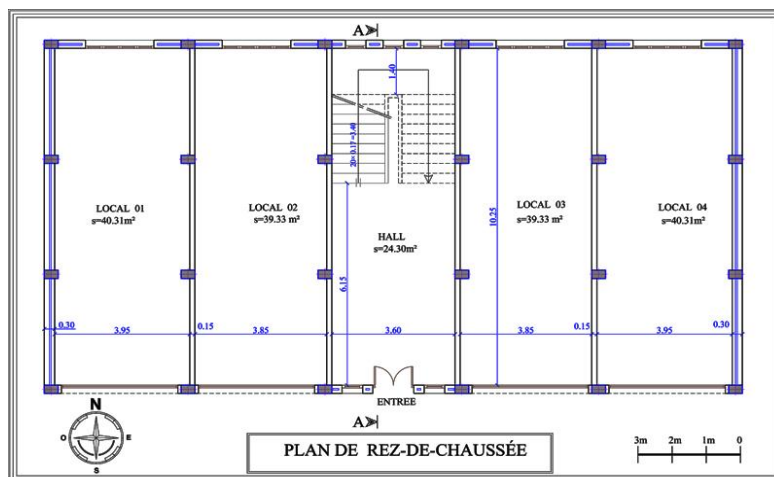


Annexe 01 : Information sur la licence d'Ecotect Analysis D 2011

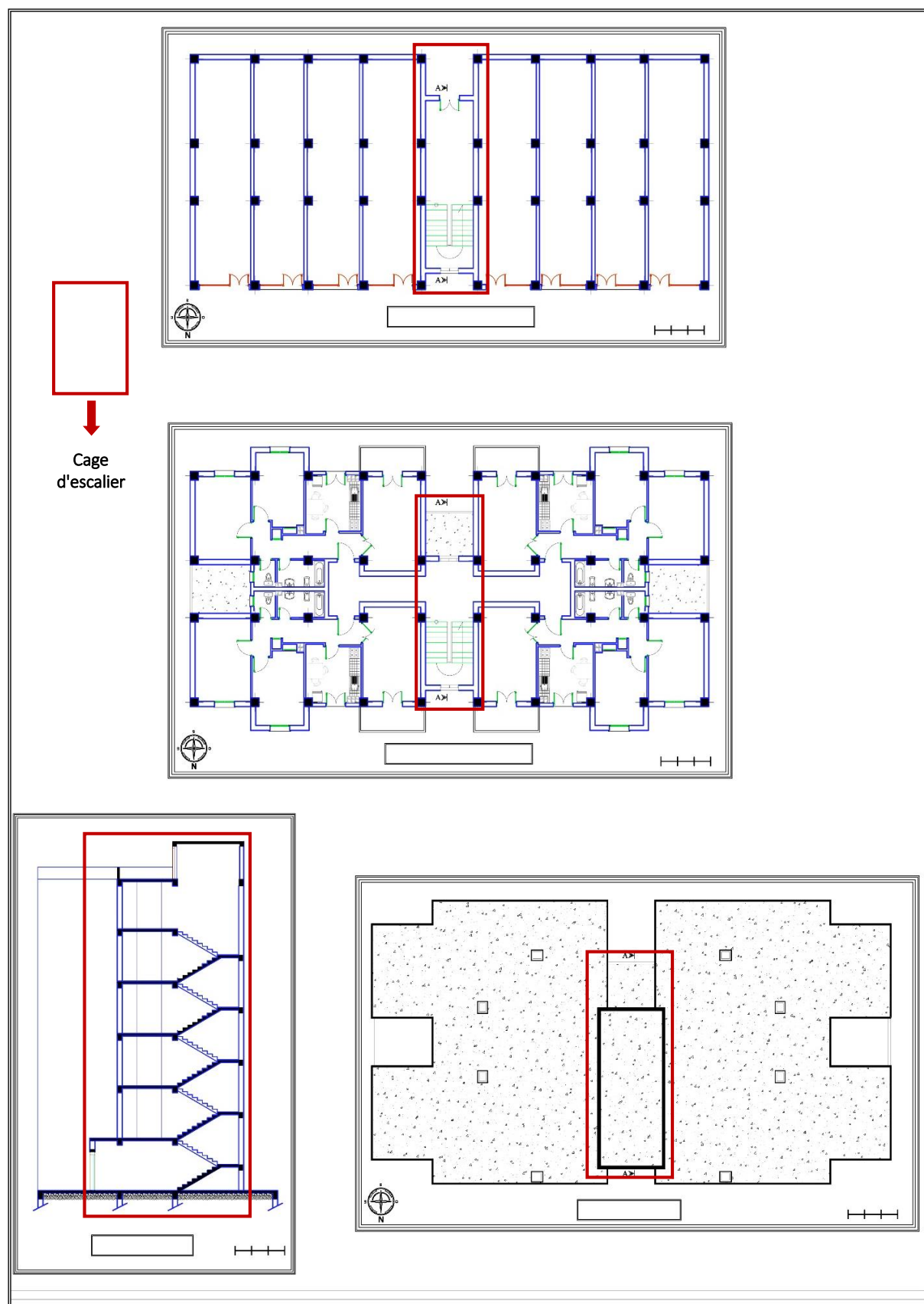


Annexe 02 : Information sur la licence de WinAir V1.4 b

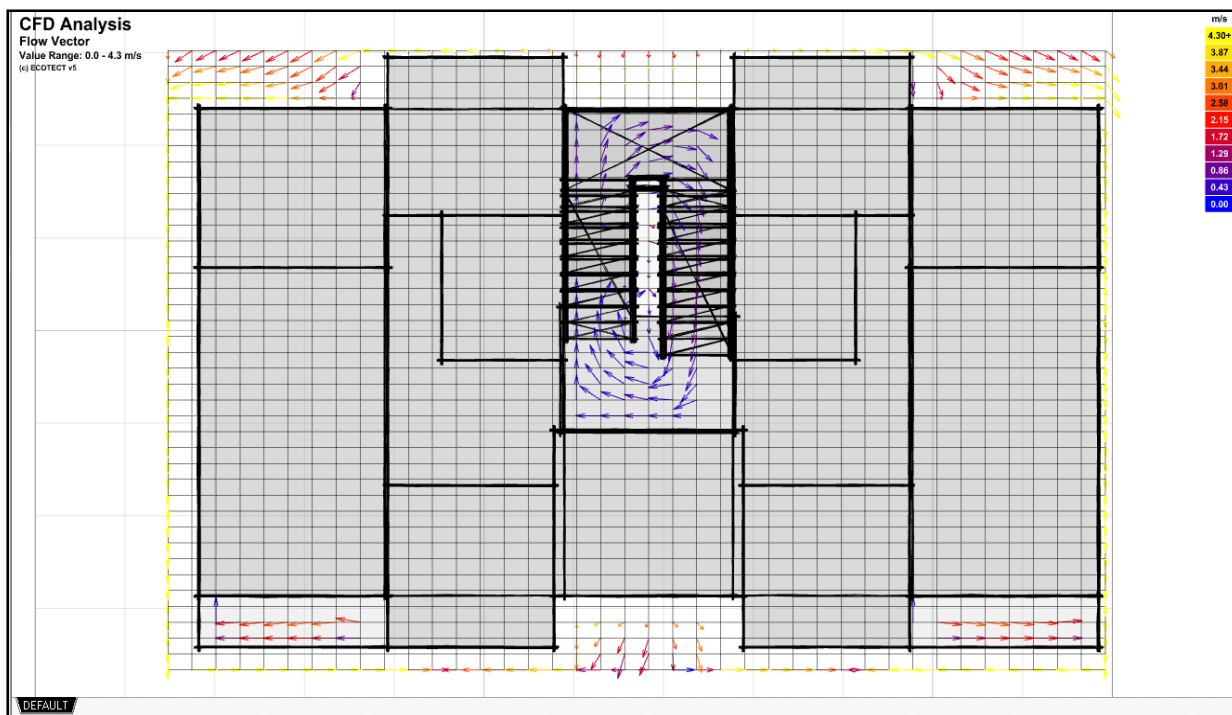

 ↓
 Cage
 d'escalier



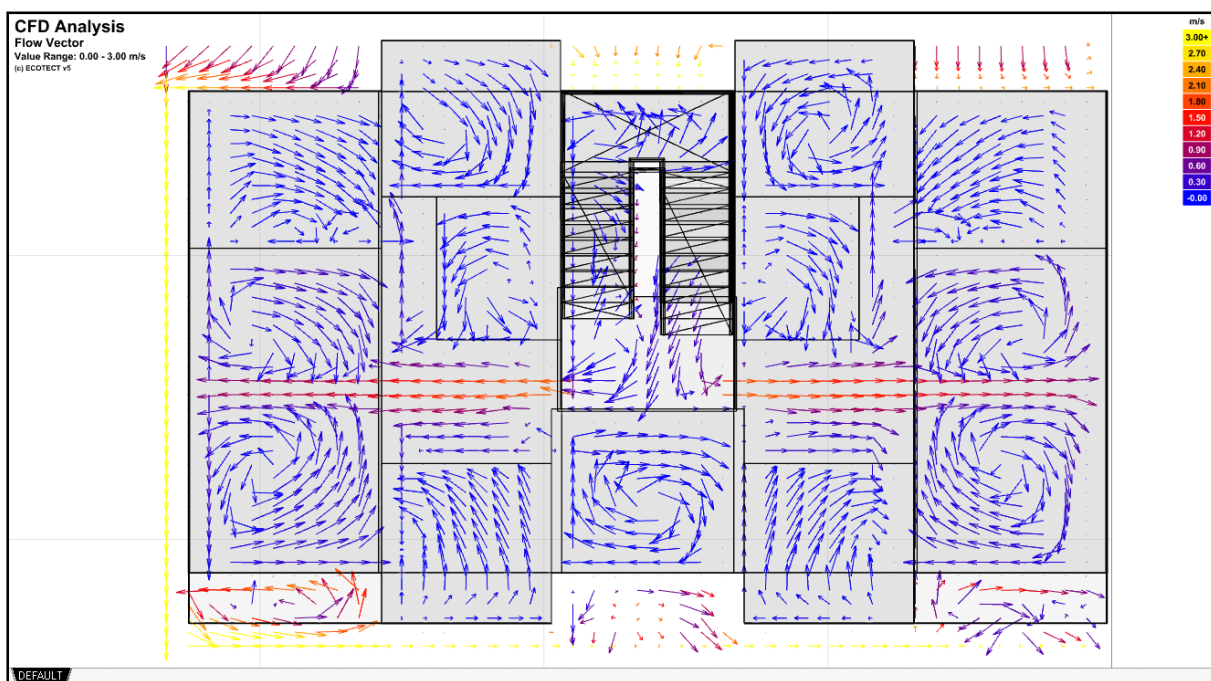
Annexe 03 : Représentation graphique du modèle 01 (source : auteur)



Annexe 04 : Représentation graphique du modèle 02 (source : auteur)

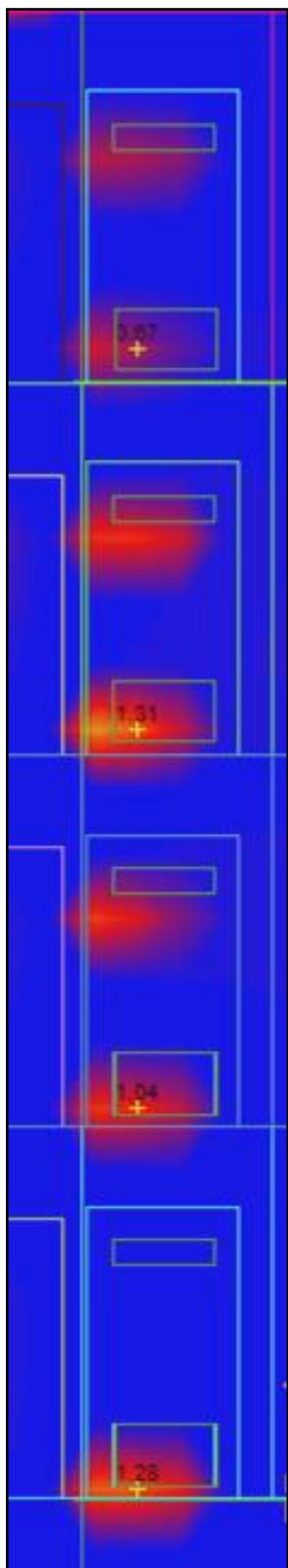


Vue en plan de la vitesse des flux d'air, modèle01/Variante01 (Source : auteur)

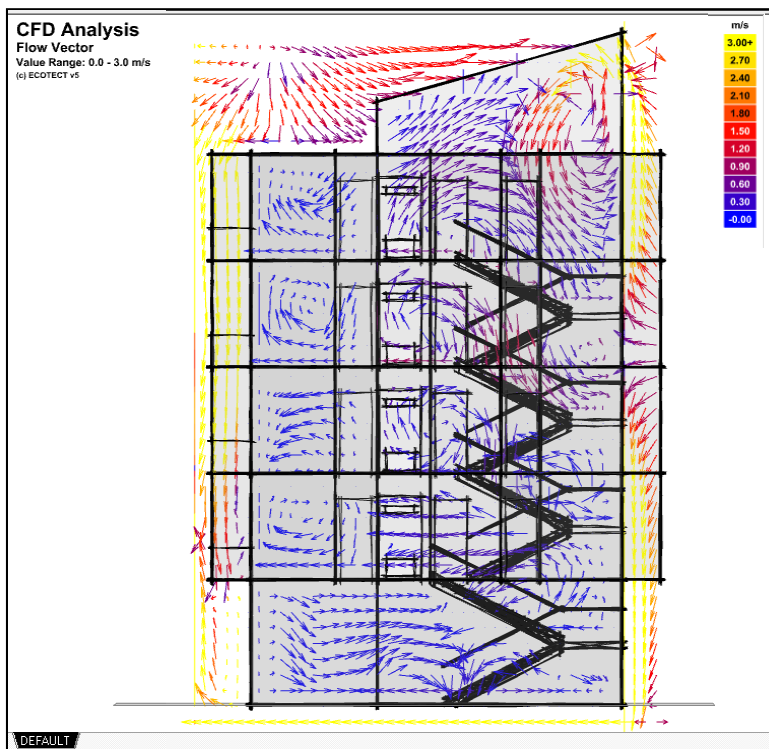


Vue en plan de la vitesse des flux d'air, modèle01/Variante02 (Source : auteur)

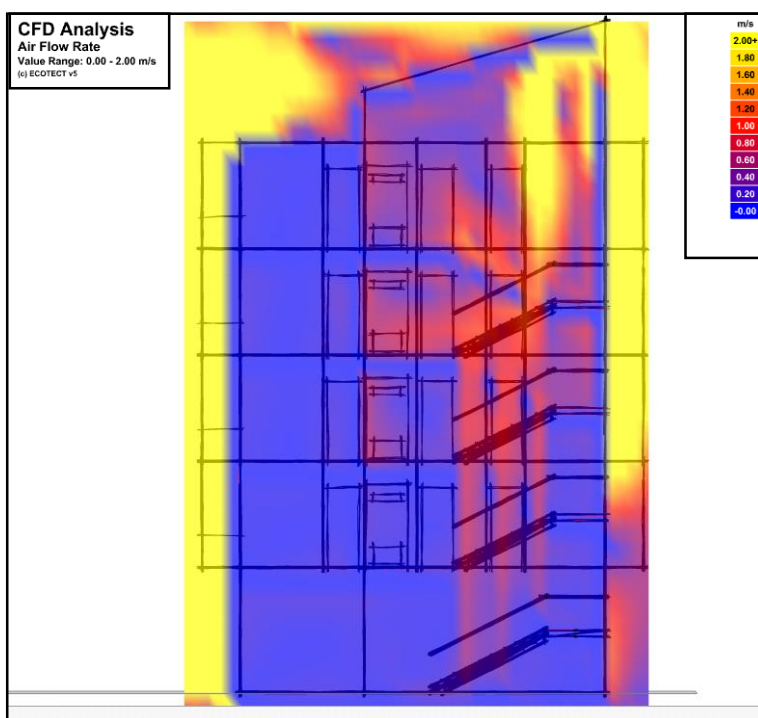
Annexe 05 : Profils de vitesse des flux d'air avant et après intégration d'un capteur à vent (vue en plan)



Vitesses de l'air au niveau des portes d'entrée des logements (Source : auteur)

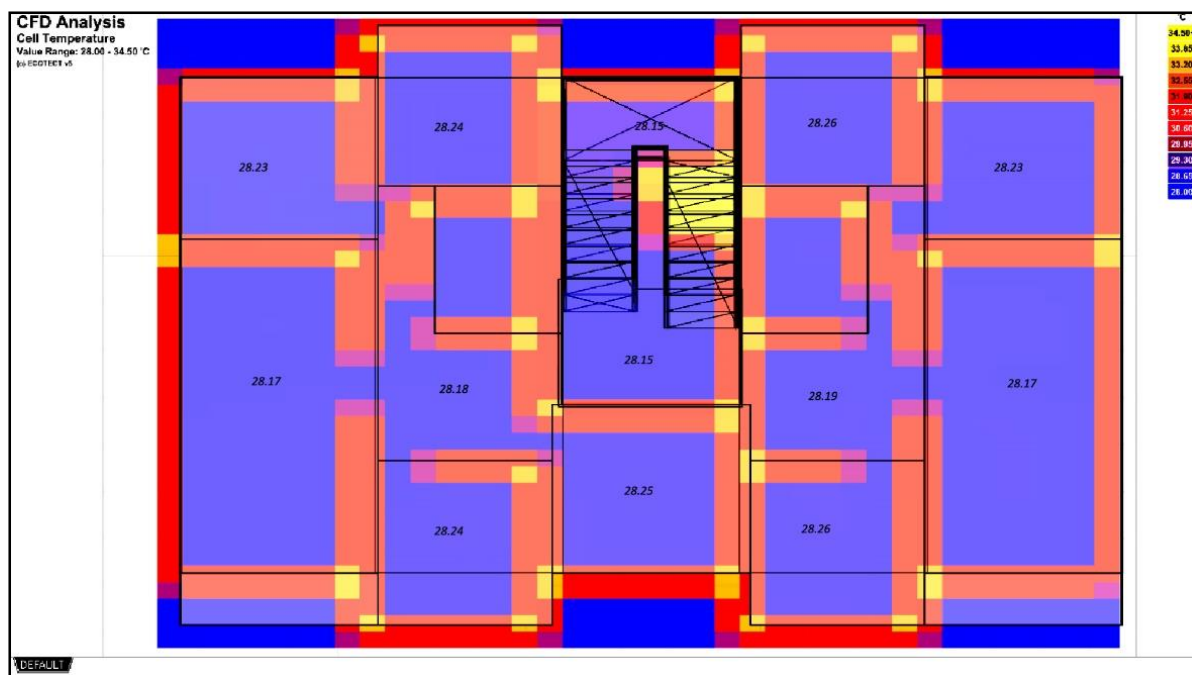


Vue en coupe du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle 01/Variante 02 (Source : auteur)

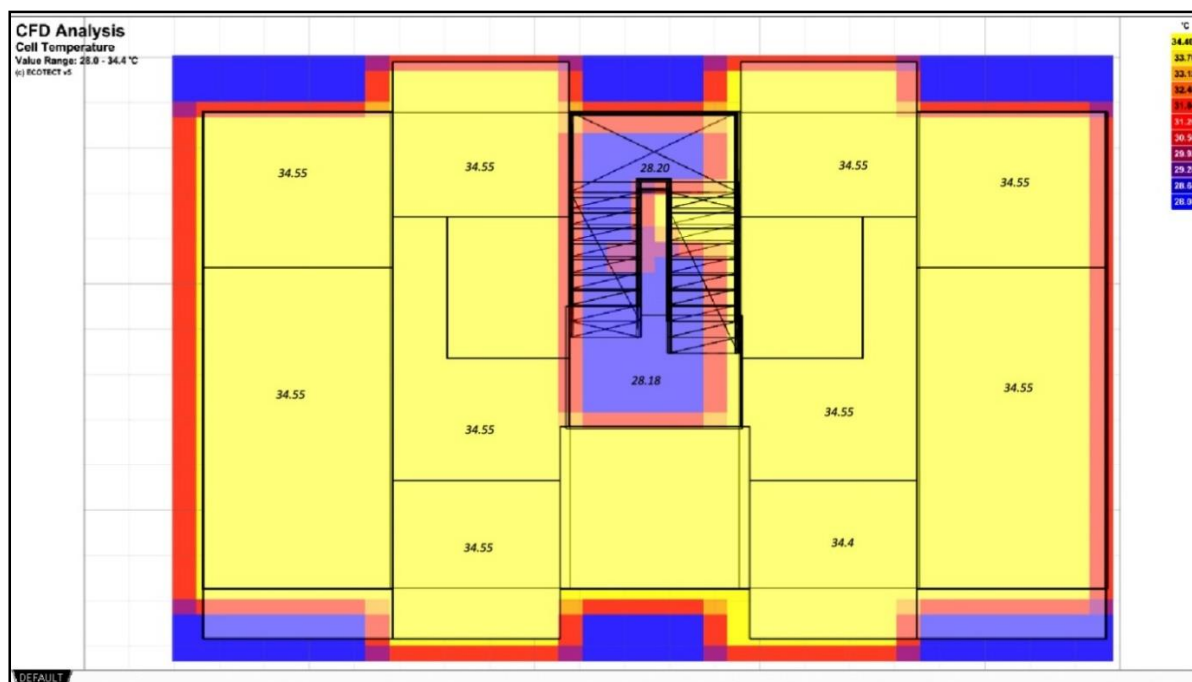


Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, modèle01/Variante02 (Source : Auteur)

Annexe 06 : Profils de vitesse des flux d'air en coupe avant et après intégration d'un capteur à vent (vue en coupe)

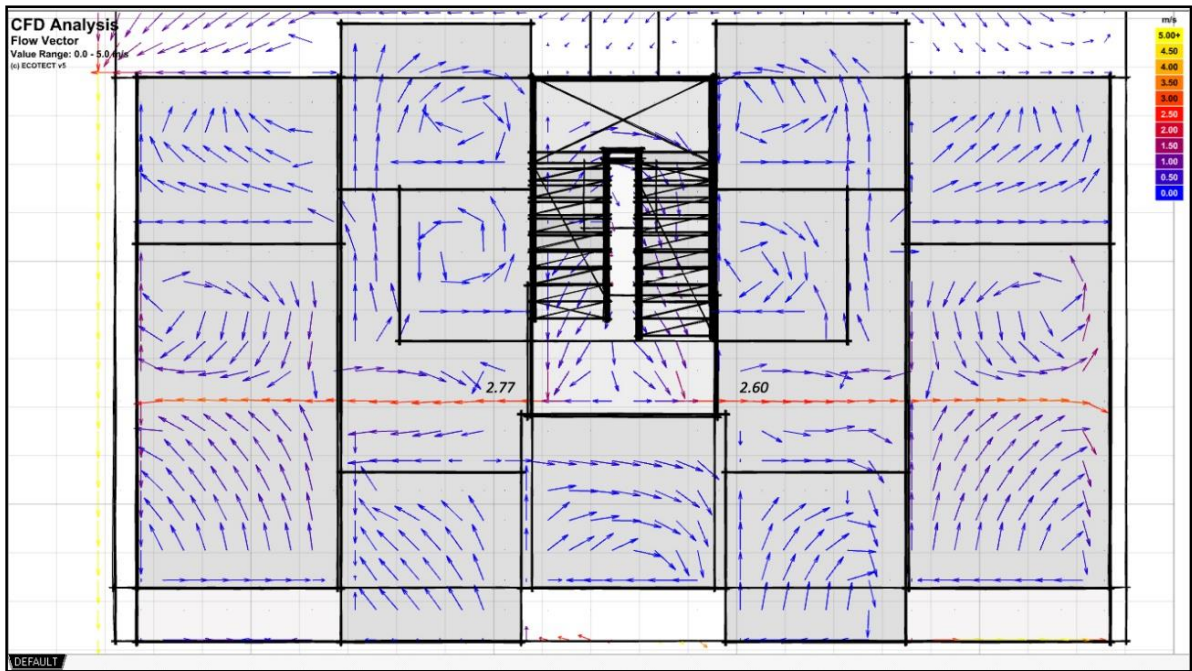


Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle01/Variante02 (Source : auteur)

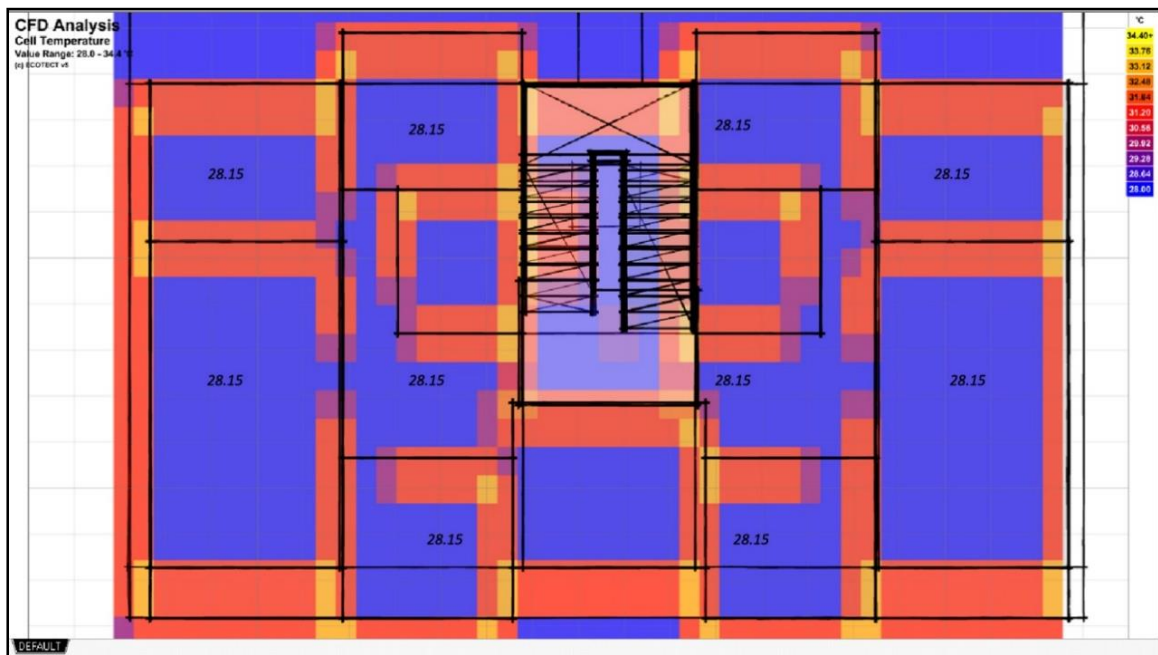


Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle01/Variante01 (Source : auteur)

Annexe 07 : Profils des températures intérieures avant et après intégration d'un capteur à vent (vue en plan)

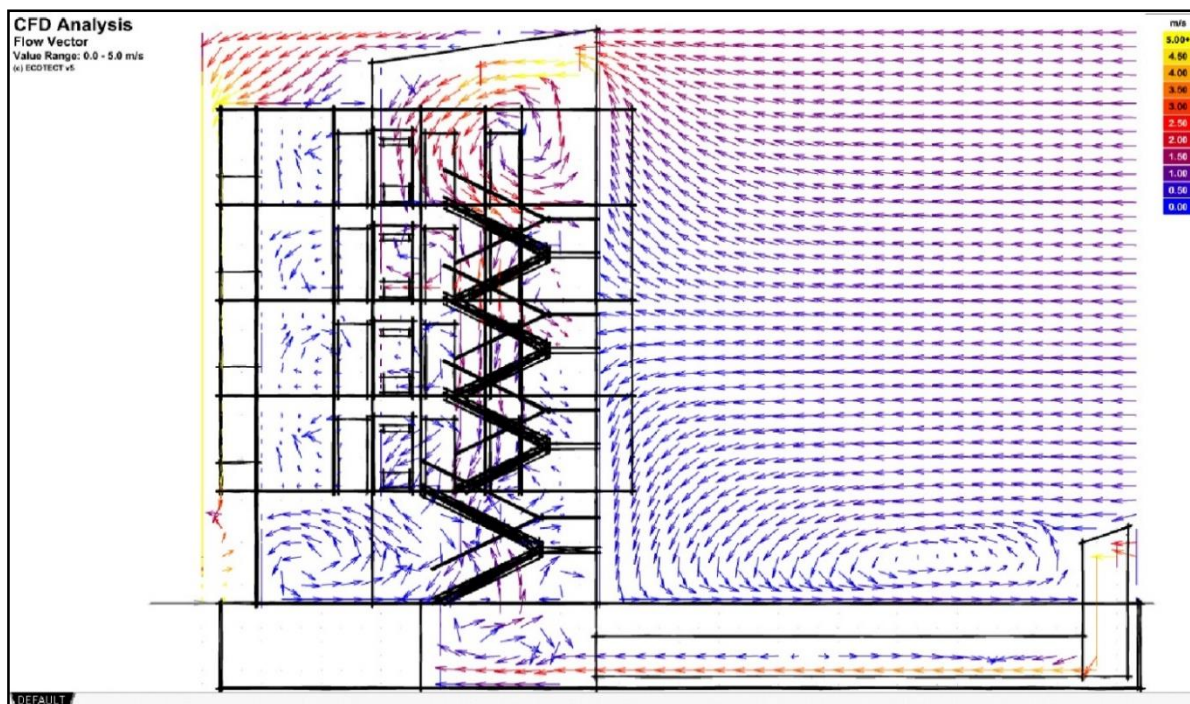


Vue sur plan du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle01/Variante03

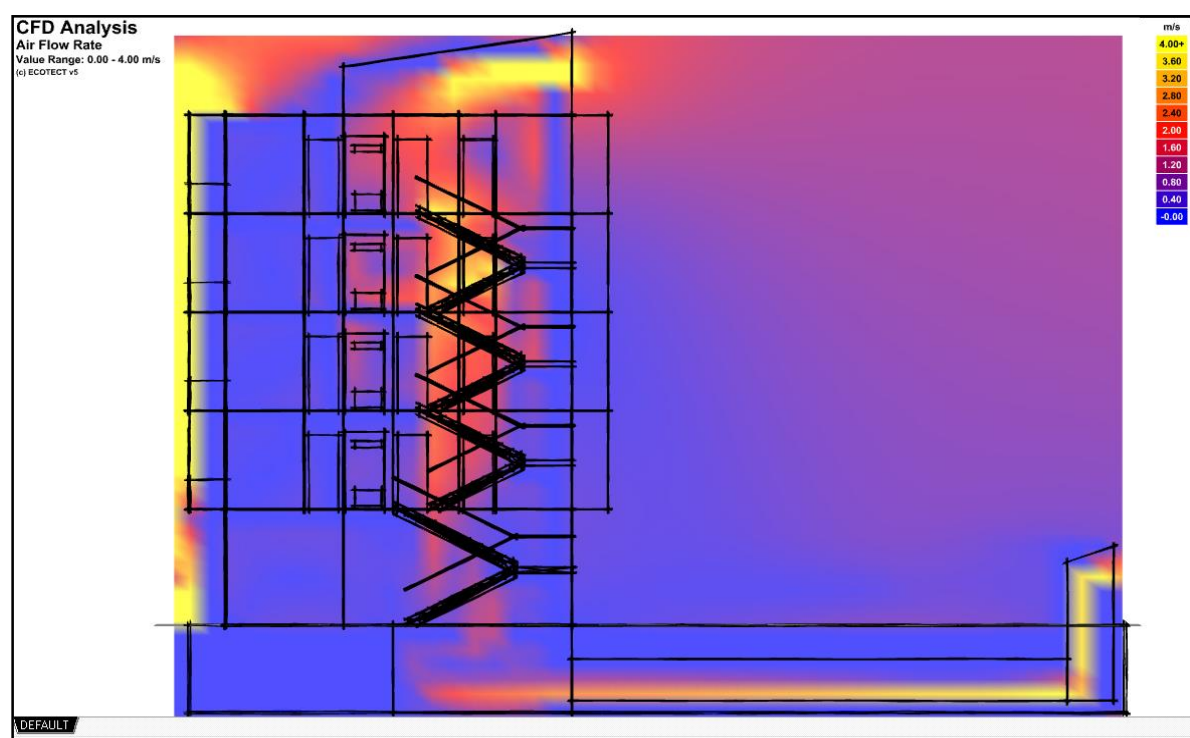


Vue en plan du profil des températures intérieures, modèle01/Variante03 (Source : auteur)

Annexe 08 : Profils des températures intérieures avant et après intégration du puits provençal

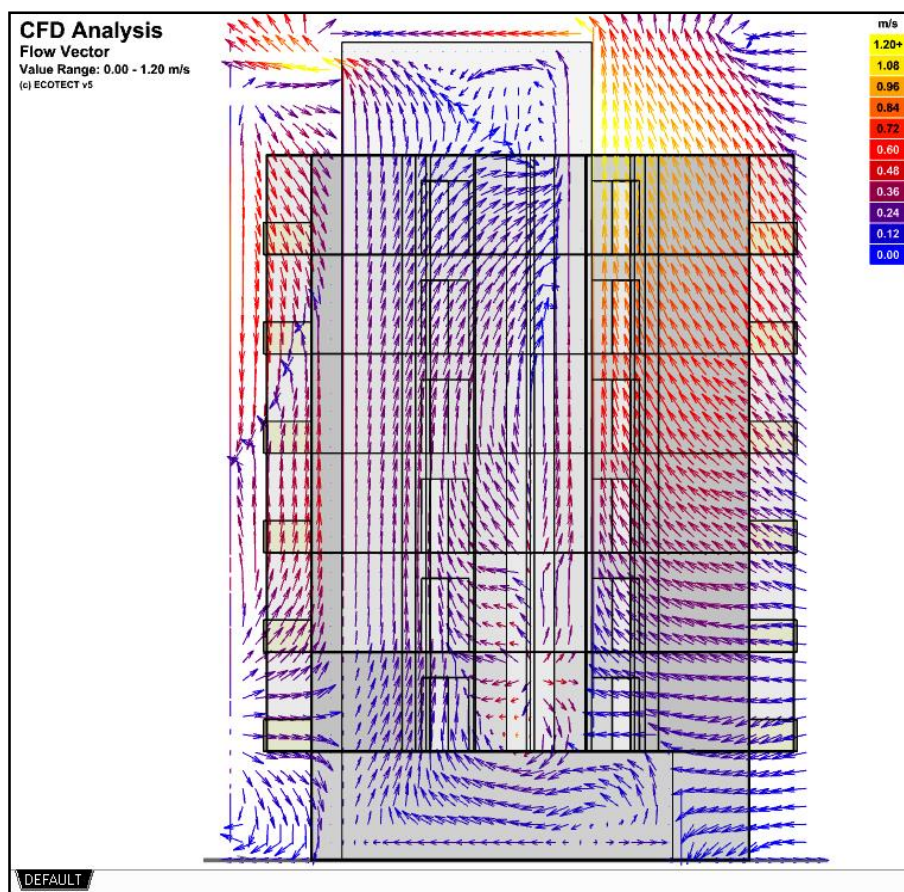


Vue en coupe du profil de vitesse et des directions des flux d'air, modèle01/Variante03 (Source : auteur)

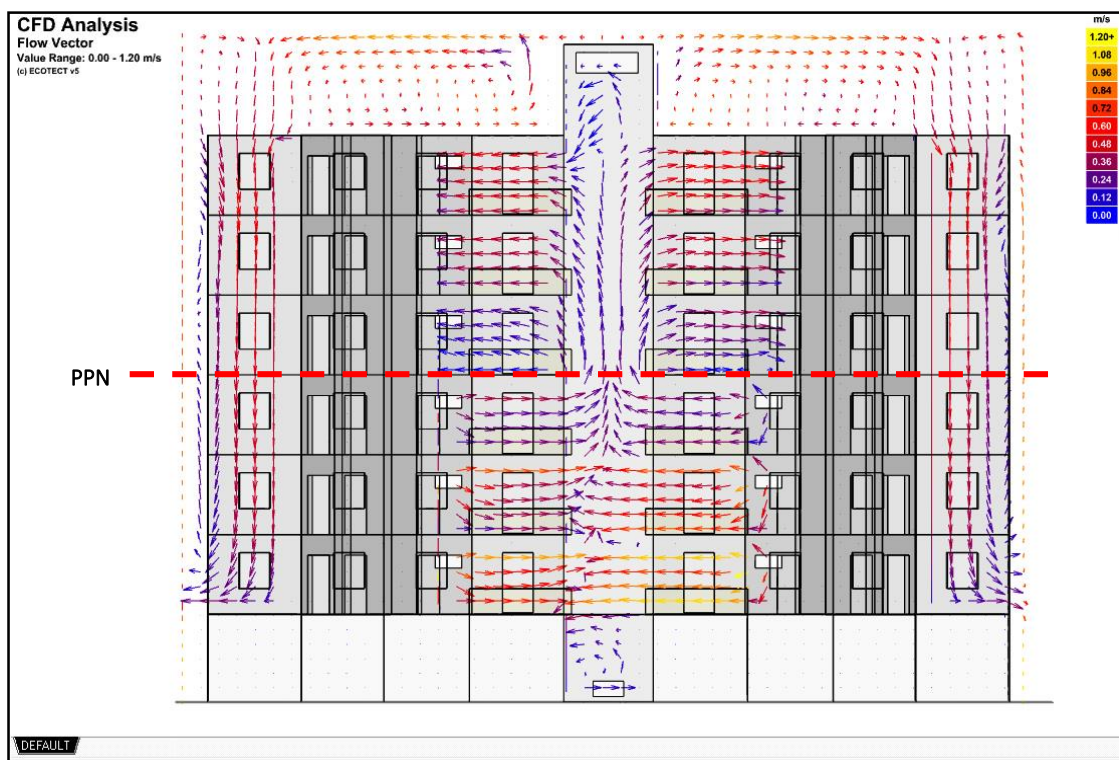


Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, modèle01/Variante03 (Source : auteur)

Annexes 09 : Résultats en coupe après intégration du puits provençal (modèle 01/variante 03)

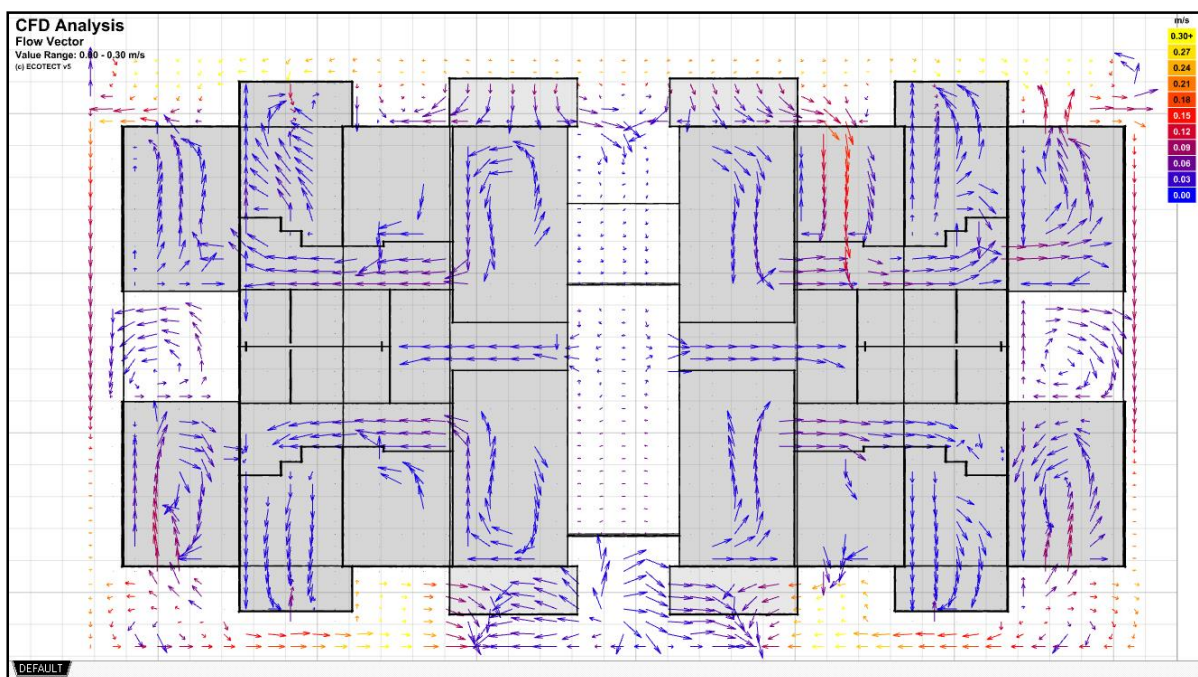


Vue en coupe du profil de vitesse des flux d'air, Modèle 02/variante02 (Source : auteur)

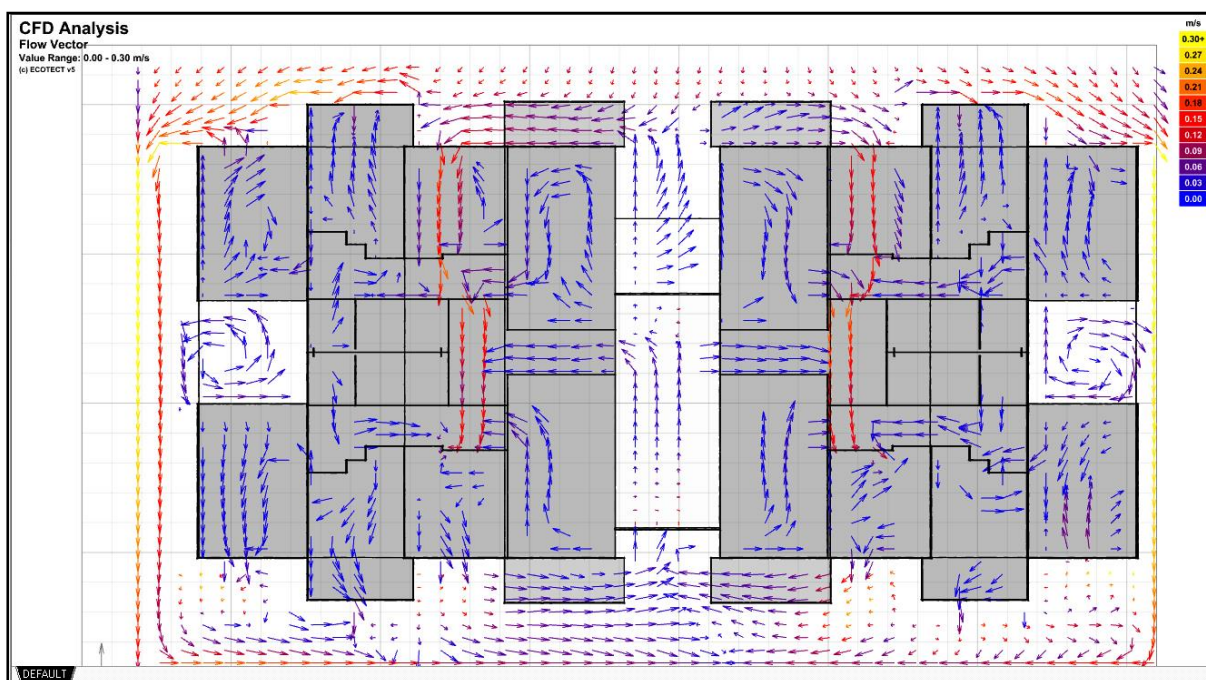


Vue en façade du profil de vitesse des flux d'air, Modèle 02/variante02 (Source : auteur)

Annexe 10 : Résultats en coupe : la cage d'escalier "cheminée d'extraction"
(modèle 01/variante 03)

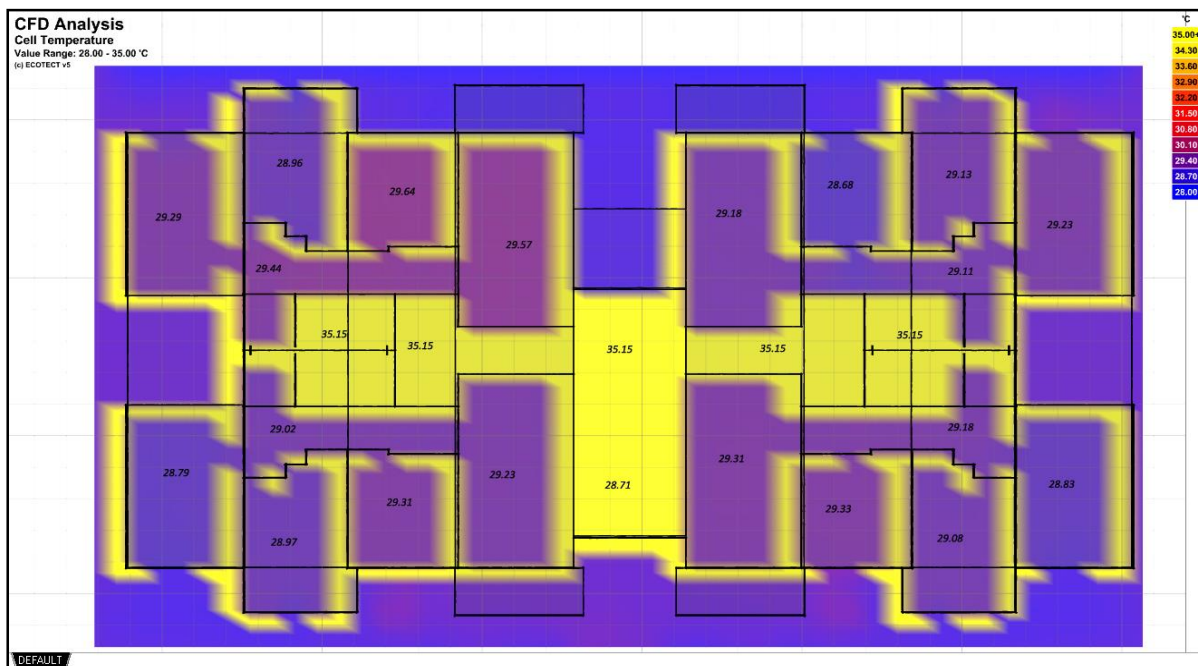


Vue en plan profil de vitesse et directions des flux d'air. modèle02/variante01 (Source : Auteur)

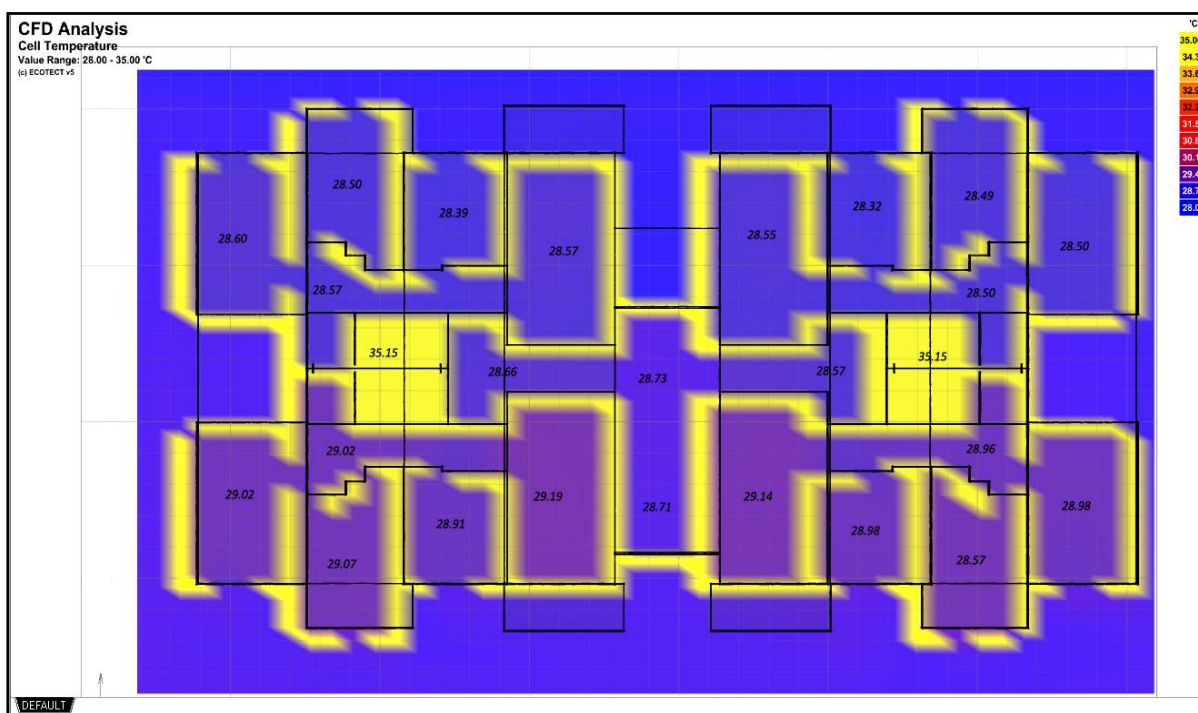


Vue en plan profil de vitesse et directions des flux d'air, modèle02/variante03 (Source : Auteur)

Annexe 11 : Profil de vitesse et direction des flux d'air au niveau du 4ème étage



Vue en plan du profil de températures intérieures, modèle 02/variante01 (Source : auteur)



Vue en plan du profil de températures intérieures, modèle 02/variante03 (Source : auteur)

Annexe 12 : Profil de températures intérieures au niveau du 4^{ème} étage