

La ventilation naturelle intensive des bâtiments et leur confort en été

Etude de systèmes inspirés par la stratégie de refroidissement des
termitières

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de Master
en Ingénieur Civil Architecte par Pauline LESAGE

Promotrice : Sigrid REITER

Membres du jury : Shady ATTIA
Bruno BUSCH
Tristan GILET

Année académique : 2014 – 2015



Je remercie Mme Sigrid Reiter, promotrice, pour son aide, son suivi et ses remarques constructives tout au long de l'élaboration de ce travail.

Je remercie également les membres de mon jury, MM. Shady Attia et Tristan Gilet, pour l'intérêt porté à ce mémoire, et plus particulièrement Mr Bruno Busch pour son soutien constant et pour m'avoir permis l'accès à de nombreuses données sur la cité administrative de Seraing.

Je remercie aussi ma famille et mes proches pour leur présence et leurs encouragements principalement pendant ces dernières semaines d'écriture.

« L'architecte du futur construira en imitant la nature ; parce que c'est la plus rationnelle, durable et économique des méthodes »

Antonio Gaudi

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	1
CONCEPTS DE BASE SUR LA VENTILATION	4
1. LA VENTILATION DANS LE BATIMENT	5
1.1 VENTILATION HYGIENIQUE	5
1.1.1 Pourquoi ventiler ?	5
1.1.2 Les moyens de ventilation	6
1.2 VENTILATION INTENSIVE	6
1.2.1 Pourquoi refroidir ?	7
1.2.2 Les types de ventilation naturelle	8
1.2.3 Les systèmes de ventilation naturelle	8
1.2.4 L'adaptation des surfaces vitrées	10
1.3 ALTERNATIVES AU 'FREE COOLING'	11
1.3.1 Puits provençal ou puits canadien : échangeur air/sol	11
1.3.2 Echangeur géothermique : échangeur eau/sol et air/eau	12
1.3.3 Géocooling : échangeur eau/sol	12
1.3.4 'Slab cooling'	12
1.3.5 Evaporation	13
2. QU'EST-CE QUE LE BIOMIMETISME ?	14
3. LA TERMITIERE : UNE SOURCE D'INSPIRATION POUR LE REFROIDISSEMENT DES BATIMENTS ?	16
3.1 LES TERMITES	16
3.2 LES TERMITIERES DES 'AMITERMES MERIDIONALIS'	17
3.3 LES TERMITIERES DES 'MACROTERMES BELlicosus'	17
3.4 LES TERMITIERES EN FORME DE DOME	19
3.5 UNE ETUDE PLUS RECENTE	20
3.5.1 L'effet du vent	22
3.5.2 Le mélange des flux dans la zone intermédiaire	24
4. REFLEXION : INNOVATIONS ARCHITECTURALES POTENTIELLES	26
QUELQUES CAS CONCRETS D'APPLICATION	28
5. BATIMENTS INSPIRES DE LA TERMITIERE	29
5.1 EASTGATE BUILDING – HARARE	30
5.1.1 Fiche technique	30
5.1.2 Situation	31
5.1.3 Composition du bâtiment	31
5.1.4 Fonctionnement	32
5.1.5 Résultats	34
5.1.6 Récompenses	34
5.2 QUEEN'S BUILDING – MONTFORT UNIVERSITY – LEICESTER	35
5.2.1 Fiche technique	35
5.2.2 Situation	36
5.2.3 Composition du bâtiment	36
5.2.4 Fonctionnement	37
5.2.5 Résultats	40
5.2.6 Récompense	41
5.3 CH2 (COUNCIL HOUSE 2) – MELBOURNE	42
5.3.1 Fiche technique	42
5.3.2 Situation	43
5.3.3 Composition du bâtiment	43
5.3.4 Fonctionnement	44

5.3.5	Résultats	47
5.3.6	Récompenses	47
5.4	DAVIES ALPINE HOUSE – KEW GARDEN – LONDON.....	48
5.4.1	Fiche technique.....	48
5.4.2	Situation.....	49
5.4.3	Composition du bâtiment.....	49
5.4.4	Fonctionnement	50
5.4.5	Résultats	51
5.4.6	Récompenses.....	51
5.5	STRATEGIES OBSERVEES	52
PARTIE PRATIQUE		54
6. CAS DE LA CITE ADMINISTRATIVE DE SERAING		56
6.1	FICHE TECHNIQUE	56
6.2	SITUATION	57
6.3	COMPOSITION DU BATIMENT.....	57
6.4	FONCTIONNEMENT.....	58
6.5	RESULTATS	59
7. DIMENSIONNEMENT DU NIGHT COOLING		60
7.1	LOGICIELS UTILISES.....	60
7.2	HYPOTHESES DE TRAVAIL	60
7.3	CALCUL DU TIRAGE THERMIQUE	62
7.4	CALCUL DES EFFETS DU VENT.....	64
7.5	CALCUL DU NOMBRE DE FENETRES	69
7.6	LIMITES DU DIMENSIONNEMENT SIMPLIFIE	73
8. MONITORING ET ANALYSE DES PERFORMANCES DU NIGHT COOLING		74
8.1	COLLECTE DES DONNEES.....	74
8.2	TEMPERATURES AMBIANTES MOYENNES.....	75
8.2.1	Données recueillies depuis le début de l’occupation.....	75
8.2.2	Une semaine type.....	77
8.2.3	Une journée type	77
8.2.4	Détails	79
9. RESSENTI DES OCCUPANTS		85
9.1	VENTILATION	85
9.2	TEMPERATURE.....	86
9.3	DOMOTIQUE.....	86
10. AMELIORATIONS DU SYSTEME DE VENTILATION NATURELLE		87
10.1	ADAPTATION AUX CLIMATS CHAUDS.....	87
10.2	DIFFERENTS COMPLEMENTS POSSIBLES AU NIGHT COOLING	93
10.2.1	Refroidissement adiabatique	93
10.2.2	Extension des surfaces d’échanges thermique.....	95
10.2.3	Brassage de l’air	96
CONCLUSION		98
TABLE DES FIGURES		101
TABLE DES TABLEAUX		102
ANNEXES		103
BIBLIOGRAPHIE.....		109

INTRODUCTION

La nature a toujours été une source d'inspiration pour l'homme.

Il existe actuellement un renouveau de cette tendance à chercher dans la nature des pistes d'amélioration pour nos techniques et pratiques. Cette tendance que l'on nomme 'biomimétisme' s'applique aussi bien à la recherche sur de nouveaux matériaux dits fonctionnels (matériaux capables de remplir une fonction de façon plus performante) qu'à l'étude de processus économes en matière et en énergie.

Ces innovations débordent sur le champ économique et social en invitant à repenser nos modes d'organisation pour produire mieux avec moins. Le concept s'applique donc aussi à l'architecte qui est amené à modifier sa vision de l'urbanisme et du bâtiment.

Ce travail porte sur la ventilation naturelle intensive.

Les systèmes de conditionnement d'air sont très consommateurs d'énergie. La possibilité de réguler le climat intérieur d'un bâtiment en utilisant uniquement les déplacements naturels de l'air, sans apport d'énergie, représente donc un enjeu environnemental et économique considérable, particulièrement dans des pays au climat chaud.

Même dans nos pays au climat tempéré, l'isolation poussée des bâtiments conduit de plus en plus à des risques de surchauffe en été. Ce phénomène doit être pris en considération au moment de la conception, par une réflexion également poussée sur la ventilation.

Existe-t-il dans la nature des mécanismes dont l'architecte pourrait s'inspirer afin d'améliorer les systèmes de ventilation des bâtiments ?

Le travail est divisé en trois grandes parties.

La première partie traite, de façon théorique, des différentes techniques de ventilation naturelle utilisées dans un bâtiment. La circulation d'air dans les termitières est ensuite analysée pour tenter de mettre en évidence les mécanismes naturels qui pourraient être adaptés à la conception des bâtiments.

La deuxième partie décrit quatre bâtiments. Leurs concepteurs se sont notamment inspirés du fonctionnement des termitières pour y assurer le refroidissement naturel en période estivale.

La nouvelle cité administrative de la ville de Seraing est l'aboutissement d'une étude très poussée de différentes stratégies de refroidissement naturel de nuit (night cooling). Dans la continuité des quatre cas précédents, la troisième partie décrit le système de night cooling mis en œuvre à Seraing et tente d'évaluer ses performances par l'analyse de données issues du monitoring du bâtiment.

L'objectif initial du travail est de vérifier si la transposition de ce système est réalisable dans un climat plus chaud. Ceci fera l'objet du dernier chapitre et de la conclusion.

Ce travail a la caractéristique d'être axé principalement sur des développements plutôt théoriques. Ils sont néanmoins rassemblés avec une perspective d'application à des cas concrets. La dynamique des fluides et les transferts d'énergie sont des domaines très complexes ; il n'a pas été possible de maîtriser les logiciels de modélisation dans le cadre de ce travail de fin d'études. Les résultats élaborés pour la conception du bâtiment de Seraing ont donc été utilisés, mais sans pouvoir en modifier les paramètres.

En outre, comme il sera expliqué au début de la troisième partie, les données du monitoring telles qu'elles sont enregistrées à Seraing ne suffisent malheureusement pas à identifier correctement les relations entre les différentes températures observées ou bien entre ces températures et les actions sur le système (température du béton, ouvertures/fermetures des stores, fenêtres ou portes de transfert, etc.).

Les visites du bâtiment étudié et la discussion avec quelques occupants permettent de compléter l'information et d'apporter un point de vue sur le confort d'occupation, que ne pourrait pas détecter l'informatique seule.

Enfin, les études les plus récentes sur les constructions de certains termites permettent d'identifier un mécanisme d'échange de gaz par résonance acoustique qui permettrait peut-être d'améliorer le fonctionnement de systèmes de ventilation naturelle, là où elle est moins efficace.

CONCEPTS DE BASE SUR LA VENTILATION

1. LA VENTILATION DANS LE BATIMENT

Dans un bâtiment, le renouvellement d'air est nécessaire pour le confort et la santé des occupants. Il existe deux types de ventilation : la ventilation hygiénique et la ventilation intensive.

1.1 Ventilation hygiénique

La ventilation hygiénique est indispensable tout au long de l'année et consiste à remplacer l'air vicié par de l'air neuf. De façon permanente et à faible débit, cette ventilation permet de garder un air de qualité dans les bâtiments.

1.1.1 Pourquoi ventiler ?

L'abondance de certains éléments peut provoquer une diminution de la qualité de l'air : il est important d'y porter attention :

- *L'excès de CO₂*

La ventilation hygiénique permet de remplacer le CO₂ provenant de la respiration par l'oxygène de l'air frais. En effet, une concentration excessive en CO₂ peut provoquer de l'inconfort pour les occupants, une diminution de la concentration, des maux de tête, etc. Le taux de CO₂ idéal est de 300 ppm (partie par million) et l'Organisation mondiale de la santé conseille de ne pas dépasser les 1 000 ppm (Heukmes & Poskin, 2014).

- *L'humidité*

En excès dans le bâtiment, l'humidité peut provoquer des moisissures. Les occupants (l'air que l'homme expire contient 6,2% de vapeur d'eau, ce qui correspond à 50g/h (André, 2010)), les plantes ainsi que l'activité humaine (cuisiner, se laver...) produisent de la vapeur d'eau au sein du bâtiment. Pour réduire le risque de condensation, il est indispensable de ventiler. En effet, la combinaison du chauffage pour augmenter la température de surface et de la ventilation pour réduire le taux d'humidité diminue la température de rosée (température à laquelle la vapeur d'eau commence à se condenser).

Pour donner une idée chiffrée :

- pièce non ventilée : $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=70\%$ $\rightarrow t^{\circ}_{\text{rosée}}=14^{\circ}\text{C}$,
- pièce bien ventilée : $t^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=50\%$ $\rightarrow t^{\circ}_{\text{rosée}}=10^{\circ}\text{C}$.

(Etude Resolo, octobre 2009 cité par Heukmes & Poskin, 2014)

- *Les impuretés de l'air*

Outre le CO₂ rejeté par les occupants et l'excès d'humidité, les impuretés peuvent aussi provenir des odeurs émises, des acariens cachés dans les tapis, les matelas ou les tentures, des peintures, meubles, produits de nettoyage ou autres éléments pouvant contenir du radon ou encore d'autres matières synthétiques dont certains composants peuvent être dangereux pour la santé (Heukmes & Poskin, 2014).

1.1.2 Les moyens de ventilation

L'air entre par les locaux de vie (séjour, chambre, bureau...) et sort par les locaux humides (salle de bain, toilette, cuisine, buanderie...). Le passage d'une pièce à l'autre se fait par des ouvertures de transfert. Il existe plusieurs systèmes de ventilation, qu'ils soient naturel (A) ou mécaniques (B, C, D et hybride), pour améliorer l'ambiance interne :

- A : entrée et sortie naturelles de l'air

Ce système naturel est sûrement le moins énergivore mais aussi le plus difficile à contrôler. Il est efficace seulement lorsque le vent le permet. Des grilles doivent être placées dans les châssis pour permettre à l'air de s'infiltrer et la mise en place de conduits verticaux ou cheminées est nécessaire afin que l'air vicié soit évacué en toiture. Les déplacements de l'air sont provoqués par la différence de pression entre les façades ainsi que par l'écart de température, ce qui engendre des différences de masse volumique au sein de l'air (Nélis et al., 2002). Lorsque l'extraction naturelle est complétée par des ventilateurs, pour améliorer l'évacuation de l'air par les conduits verticaux dans le cas de conditions météorologiques défavorables, cette ventilation est appelée 'hybride'.

- B : entrée mécanique et sortie naturelle de l'air

Ce système est très rarement utilisé de nos jours car il provoque une mise en pression du bâtiment et donc un sentiment d'inconfort (Heukmes & Poskin, 2014).

- C : entrée naturelle et sortie mécanique de l'air

L'extraction mécanique effectuée à l'aide de ventilateurs met le bâtiment en dépression, ce qui provoque un écart de pression entre l'extérieur et l'intérieur du bâtiment et favorise ainsi l'entrée de l'air frais de façon naturelle à travers des grilles.

- D : entrée et sortie mécaniques de l'air

L'entrée d'air doit être contrôlée afin d'apporter uniquement les quantités adéquates à l'amélioration de l'hygiène. Des récupérateurs hygroscopiques peuvent être utilisés pour humidifier l'air frais en récupérant l'humidité de l'air vicié. Les pièces humides doivent être équipées d'un extracteur d'air afin d'éviter la formation des moisissures (Brandt, 2012). Dans l'optique de réduire les besoins énergétiques, un système de ventilation mécanique double flux avec récupérateur de chaleur peut être utilisé : l'air frais entrant est réchauffé dans un échangeur de chaleur, par l'air vicié qui est évacué, sans qu'un mélange n'ait lieu entre les deux flux (Heukmes & Poskin, 2014).

1.2 Ventilation intensive

La ventilation intensive peut être naturelle ou mécanique lorsqu'elle est améliorée par des ventilateurs. Elle permet de refroidir l'ambiance intérieure du bâtiment lorsque la température y est trop élevée et provoque un sentiment d'inconfort.

Le refroidissement consiste en effet à remplacer l'air chaud par de l'air frais et à décharger la chaleur accumulée dans la masse thermique du bâtiment, en utilisant des débits d'air plus importants que pour la ventilation hygiénique. Cette ventilation peut être mise en œuvre de jour comme de nuit.

1.2.1 Pourquoi refroidir ?

L'air à l'intérieur d'un bâtiment est réchauffé par l'occupation et les installations internes. En hiver, ces apports de chaleur peuvent être utiles afin de réduire les demandes de chaud. Par contre, en été et à la mi-saison, il est nécessaire de refroidir le bâtiment afin d'éviter les surchauffes et l'inconfort des occupants. Les immeubles de bureaux doivent être d'autant plus refroidis, en raison de leur occupation élevée et des charges internes importantes (équipements, lumière artificielle, etc.) (Hannequart & Schamp, 2010, fiche 3.3).

La température de confort, également appelée opérative, représente la température ressentie par l'occupant :

$$T_{\text{confort}} = \frac{T_{\text{air}} + T_{\text{paroi}}}{2}$$

« Dans la norme européenne EN 13779 (nov 2004) (Ventilation des bâtiments non résidentiels – Spécifications des performances pour les systèmes de ventilation et de climatisation), la température de confort est fixée à 21°C en hiver et à 26°C en été pour une activité de type bureau dans un local chauffé ou refroidi » (Architecture et climat, 2015).

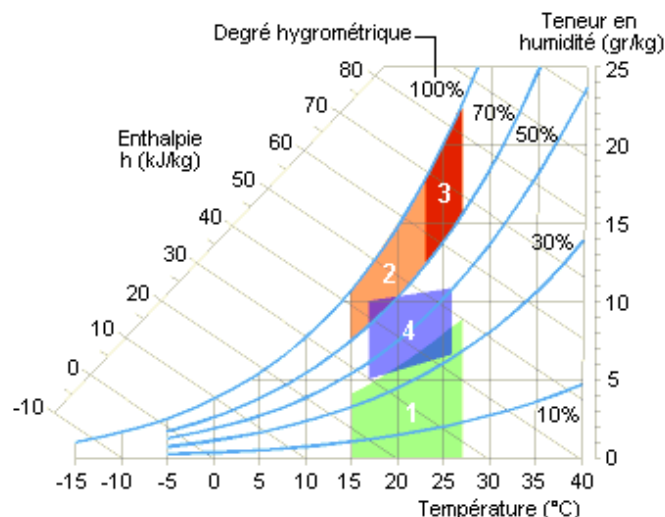


Fig. 1 : Diagramme de Mollier

1. Problèmes de sécheresse ; 2. Développement de bactéries et de micro-champignons ;
3. Développement d'acariens ; 4. Polygone de confort hygrothermique.

[Diagramme de Mollier repris par Architecture et climat, 2015]

1.2.2 Les types de ventilation naturelle

Il existe trois types de ventilation naturelle au sein du bâtiment, provoquée par les différences de température ou par l'effet du vent :

- L'effet de cheminée ou tirage thermique :

Les déplacements de l'air sont provoqués par les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment et donc par les différences de pression qu'elles engendrent. L'air frais entre par la façade au vent, là où la pression est importante. L'air vicié monte par convection dans la cheminée et est ensuite évacué par les ouvertures en toiture étant donné que la toiture est en dépression (Avems, 2010). Nous verrons plus tard que ce déplacement d'air correspond à celui de la termitière.

- La ventilation unilatérale

Les flux d'air sont également mis en mouvement grâce aux différences de température qui engendrent des différences de masse volumique. Pour rafraîchir une pièce, l'air entre et sort par des fenêtres disposées sur une même façade : l'air frais entre par le bas et lorsque sa densité diminue en se réchauffant, il est évacué par le haut de cette même façade.

- La ventilation transversale

Les flux d'air, de débit assez important, sont possibles grâce à l'énergie du vent et à la différence de pression qui existe entre deux façades opposées. L'ouverture des fenêtres permet à l'air d'entrer par la façade au vent et de sortir par la façade opposée qui est en dépression, tout en refroidissant l'air intérieur (Nélis et al., 2002).

1.2.3 Les systèmes de ventilation naturelle

On dénomme refroidissement naturel ou '*free cooling*' les différentes stratégies passives de ventilation intensive qui utilisent l'énergie gratuite de l'air pour rafraîchir le bâtiment, par opposition aux climatisations qui utilisent des systèmes techniques consommateurs d'énergie. Cette technique peut ainsi réduire l'impact environnemental et limiter les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, des études de dimensionnement doivent être réalisées pour optimiser l'efficacité de cette stratégie (Hannequart & Schamp, 2010, fiche 3.1).

- 'Free cooling diurne'

Les débits doivent être importants afin d'assurer le renouvellement d'air. Il faut veiller à ne pas provoquer des courants d'air dans le bâtiment. Ceux-ci seraient ressentis par les occupants comme source d'inconfort. De plus, une fois que l'air extérieur se réchauffe, il faut penser à refermer les fenêtres. En effet, l'augmentation de sa température diminue son humidité relative : cela risque d'assécher l'ambiance interne d'une pièce. Le diagramme de *Mollier*, sur la figure 1, indique bien qu'en dessous de 30% d'humidité relative, la sécheresse devient inconfortable (Brandt, 2012).

- 'Free cooling nocturne' ou 'night cooling'

Lorsque les journées sont chaudes ($t^{\circ} \text{ ext} > t^{\circ} \text{ int}$), l'efficacité de la ventilation naturelle intensive diurne est nettement réduite. Le refroidissement du bâtiment peut donc être assuré pendant la nuit, lorsque la capacité frigorifique de l'air extérieur est plus élevée (Simon & Hauglustaine, 2001).

D'après Mme Brandt (2012), l'ouverture des fenêtres peut avoir lieu pendant la nuit suivant certaines conditions : « si la T_{ext} en journée $> 24^{\circ}\text{C}$, si T_{int} en journée $> T_{\text{conf}}$ ou si $T_{\text{int}} > T_{\text{ext}} + 2$ ». Par contre, il est préférable de fermer les fenêtres « si $T_{\text{int}} < (T_{\text{conf, min}} - 1)$ ou $T_{\text{int}} < 19^{\circ}\text{C}$, si HR $> 70\%$ ou si la vitesse du vent $> 10 \text{ m/s}$ ».

Cette ventilation intensive nocturne est notamment utilisée pour refroidir la masse thermique en évacuant la chaleur emmagasinée pendant la journée. Cette masse est constituée par les matériaux de construction lourds comme le béton par exemple. Les matériaux à forte inertie thermique ont la capacité d'absorber la chaleur de l'air en journée afin d'éviter les surchauffes et la restituer, pendant la nuit, lorsque la température de l'air diminue. Pour un bon fonctionnement du système, la masse thermique doit être accessible à l'air, qu'elle soit apparente (plafond, mur, sol...) ou non (labyrinthe en sous-sol, dalle creuse, etc). Les faux-plafonds et faux-planchers sont donc à éviter (Architecture et climat, 2015).

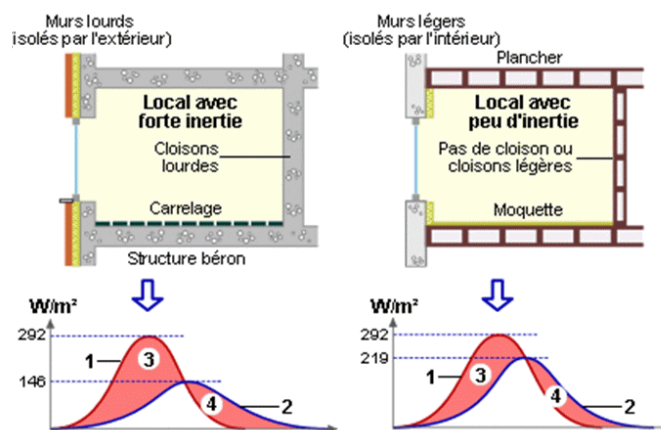


Fig. 2 : Evolution dans le temps de l'apport de chaleur dû à l'ensoleillement dans un local avec ou sans inertie thermique : comparaison entre la chaleur instantanée transmise au travers du vitrage et la chaleur restituée au local.

1. Apports instantanés ; 2. Charge réelle retardée ; 3. Chaleur emmagasinée ; 4. Chaleur restituée
[Architecture et climat, 2015]

Le comportement des matériaux à forte inertie thermique est directement lié à leur masse volumique, leur conductivité thermique et leur chaleur massique.

« La diffusivité thermique (α) détermine la vitesse avec laquelle la température d'un matériau va évoluer en fonction des sollicitations thermiques extérieures » (Architecture et climat, 2015)

$$\alpha = \lambda / (\rho c) \text{ [m}^2/\text{s]}$$

« L'effusivité (E) d'un matériau est sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement » (Architecture et climat, 2015)

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \text{ [J / K . m}^2 \text{ . s}^{1/2}\text{]}$$

Où :

λ est la conductivité thermique du matériau [W/K.m],

ρ est la masse volumique du matériau [kg/m³] et

c est la chaleur spécifique du matériau [J/kg.K].

Ainsi, pour maximiser le confort des bâtiments en été, il faut privilégier les matériaux à faible diffusivité et à effusivité élevée. Il faut donc opter pour des matériaux denses avec une grande chaleur spécifique pour augmenter ρ et c .

1.2.4 L'adaptation des surfaces vitrées

Comme expliqué précédemment, ouvrir les fenêtres pendant la nuit est une stratégie de froid efficace : un appel d'air se fait en toiture ou sur une autre façade afin de laisser entrer le maximum de fraîcheur. Cependant, en journée, les vitrages peuvent être une source de surchauffe ; il est souvent plus adéquat de fermer les fenêtres pour créer un réservoir d'air frais à l'intérieur et de les protéger par des stores amovibles ou fixes selon leurs orientations (Bruxelles environnement, 2015).

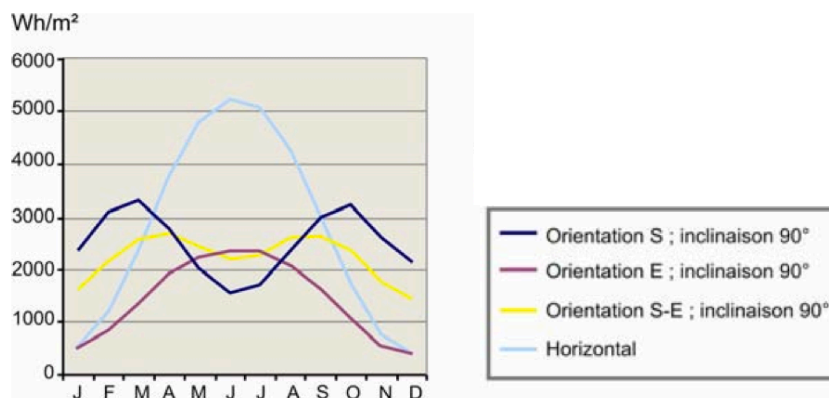


Fig. 3 : Exposition énergétique (Wh/m²) pour une année type et gains solaires moyens sur une journée sous ciel serein suivant les différentes orientations [Architecture et climat, 2015]

Sur le graphique ci-dessus, on peut observer que les surfaces horizontales en toiture ne sont pas favorables dans le bâtiment : elles laissent entrer peu de rayonnement en hiver, car le soleil est bas, et doivent être protégées en été pour éviter les surchauffes.

Quant aux surfaces verticales, l'orientation sud est intéressante car les vitrages amènent un rayonnement solaire important à la mi-saison et en hiver, alors qu'il est réduit en été. Par contre, l'est n'est pas l'orientation adéquate étant donné que les valeurs énergétiques évoluent de façon inverse aux besoins du bâtiment, tout comme les surfaces horizontales.

Les schémas ci-dessous confirment le graphique avec des pourcentages de rayonnement solaire. On peut ajouter qu'en été, les apports solaires sont les plus élevés à l'est le matin et à l'ouest en fin de journée.

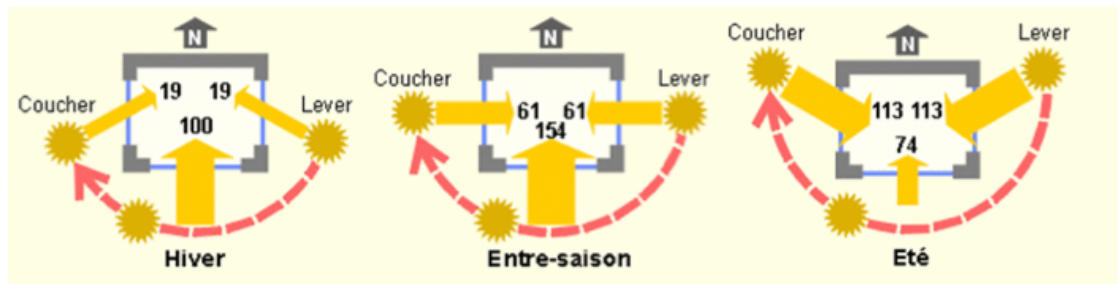


Fig. 4 : Rayonnement solaire traversant un double vitrage par ciel serein (%)
[Architecture et climat, 2015]

Il est important de noter que ces valeurs correspondent à la Belgique. Les chiffres et l'orientation idéale vont varier avec la localisation et le climat.

1.3 Alternatives au 'free cooling'

Le free cooling utilise l'énergie gratuite du vent pour rafraîchir les immeubles. Il existe d'autres sources naturelles de fraîcheur qui peuvent être utilisées à des fins identiques telles que le sol ou l'eau.

1.3.1 Puits provençal ou puits canadien : échangeur air/sol

Le puits provençal permet d'aller chercher la fraîcheur des profondeurs et ainsi utiliser l'inertie du sol pour ventiler un bâtiment. En effet, « la température de l'air extérieur, dans la plupart des pays européens, peut varier de -20°C à +40°C tout au long de l'année, alors que la température du sol à quelques mètres de profondeur reste plus stable, entre 5 et 15°C en moyenne suivant les saisons » (Heintz, 2008). Un réseau de conduits placés horizontalement en sous-sol permet à l'air qui y circule d'être refroidi avant d'être pulsé, en journée, de façon mécanique dans le bâtiment. L'efficacité du puits provençal dépend des caractéristiques du sol. De plus, il est préférable que la longueur des conduits soit comprise entre 30 et 50 mètres et qu'ils soient enterrés de 1,5 à 3 mètres.

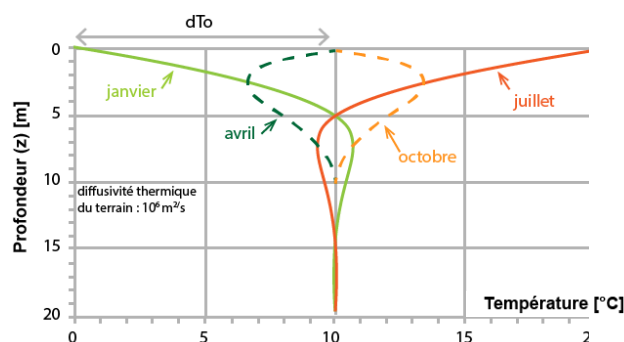


Fig. 5 : Températures du sol
[Heintz, 2008]

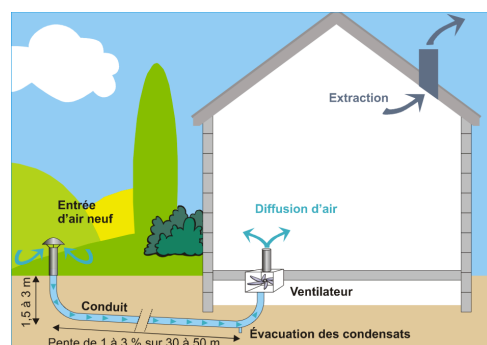


Fig. 6 : Puits provençal/canadien
[Architecture et climat, 2015]

Certes la pose d'un puits canadien permet de faire des économies en été puisque la fraîcheur provient du sol et non pas d'une machine de froid mais, à la mi-saison, lorsque les températures extérieures varient entre 10 et 20°C en journée, le puits devient inutile étant donné que l'écart de température entre le sol et l'air est très faible ou inexistant (Heintz, 2008). C'est pourquoi il est intéressant d'envisager cette solution seulement si les autres méthodes de refroidissement naturel ne peuvent être mises en œuvre.

Il existe d'autres méthodes d'échange air/sol telles que les 'labyrinthes de béton' enterrés qui utilisent également l'inertie thermique du béton.

1.3.2 Echangeur géothermique : échangeur eau/sol et air/eau

Ce système est proche du puits provençal, à la différence que c'est un liquide qui est en mouvement dans un circuit fermé et non pas de l'air dans un circuit ouvert. Un conduit d'une longueur importante, placé dans le sol, permet à l'eau d'être refroidie pour transmettre sa fraîcheur à l'air qui sera ensuite pulsé dans le bâtiment (Hannequart & Schamp, 2010, fiche 2.1).

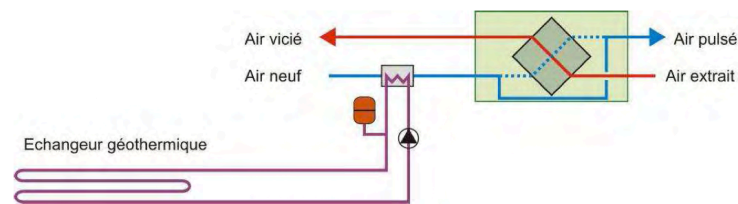


Fig. 7 : Echangeur géothermique
[Hannequart & Schamp, 2010, fiche 2.1]

1.3.3 Géocooling : échangeur eau/sol

Le géocooling permet d'aller chercher la fraîcheur des profondeurs sans l'utilisation d'une pompe à chaleur. En effet, on peut observer sur la **figure 7** qu'à partir de dix mètres de profondeur, la température du sol devient relativement constante en toutes saisons et s'établit à environ 10°C (Architecture et climat, 2015). Des sondes géothermiques placées verticalement dans le sol peuvent être installées pour aller chercher la fraîcheur à une profondeur importante. Ce mécanisme est peu énergivore puisque la seule consommation d'énergie provient des pompes de circulation qui permettent le mouvement du fluide caloporteur. Une fois refroidi, ce fluide est envoyé dans les planchers, plafonds ou poutres ventilées afin de refroidir la masse thermique de ces éléments de construction (Ademe & brgm, 2014).

1.3.4 'Slab cooling'

Le 'slab cooling' est un exemple de système passif dans lequel l'eau est refroidie gratuitement grâce au géocooling.

Les dalles sont traversées par un réseau de conduits et pendant la nuit, le fluide caloporteur, refroidi par l'inertie du sol, est envoyé dans les dalles afin d'évacuer la chaleur emmagasinée dans leur masse thermique. Ce système permet la diminution des températures opératives des locaux en journée (Busch, 2009).

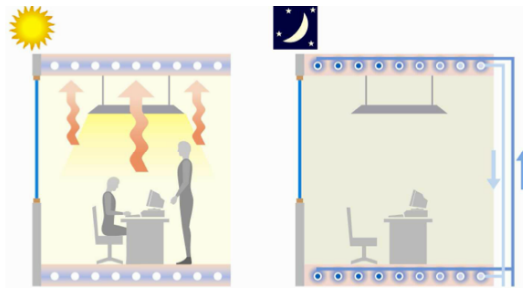


Fig. 8 : Slab cooling
[Busch, 2009]

1.3.5 Evaporation

Le principe d'évaporation consiste en un passage de l'air chaud et sec à travers un échangeur humide provoquant le refroidissement naturel de l'air. En effet, pour s'évaporer, l'eau puise l'énergie de l'air qui, par conséquent, se refroidit et peut alors être distribué dans le bâtiment (Noé21, 2012).

Par exemple, on voit sur la figure 10 que « de l'air à 20°C et 30 % d'humidité relative qui traverse un nuage d'eau voit sa température atteindre 12°C en se chargeant d'humidité » (Architecture et climat, 2015).

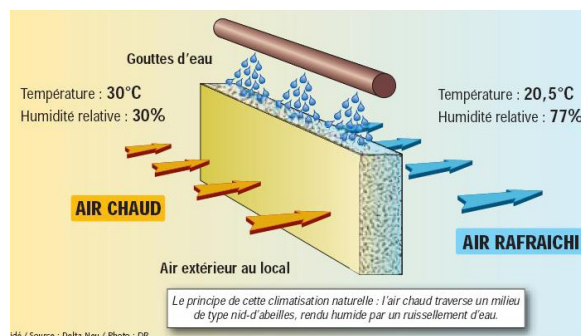


Fig. 9 : Ventilation par évaporation
[Delta New, cité par Busch, 2009]

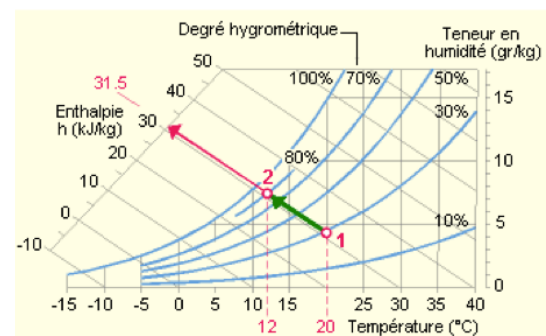


Fig. 10 : Diminution de la température de l'air après son passage à travers un nuage d'eau
[Architecture et climat, 2015]

« Plus l'air est chaud, plus la bio climatisation est efficace » (Coolea, 2015). En effet, dans nos régions, l'humidité relative est plus faible par temps chaud, ce qui permet une ventilation par évaporation plus efficace.

On peut encore évoquer les matériaux à changement de phase, capables d'emmagasiner et de restituer la chaleur. Cette méthode sera développée davantage dans la description de bâtiments exemplaires en deuxième partie.

2. QU'EST-CE QUE LE BIOMIMÉTISME ?

« Du grec *bios*, vie, et *mimesis*, imitation » (Benyus, 2011). En anglais, le terme 'biomimicry' a été utilisé pour la première fois dans la littérature en 1962. Mais c'est seulement depuis une dizaine d'années que le concept est au cœur d'une recherche systématique visant à puiser dans la nature les idées pour des solutions technologiques innovantes. Aujourd'hui, le nombre de chercheurs intéressés par le biomimétisme et par le fonctionnement de la nature est en augmentation (Pawlyn, 2011). Pourtant l'imitation de la nature existe depuis toujours : ainsi, déjà au 16^{ème} siècle, Léonard de Vinci avait observé l'envol et l'atterrissage des oiseaux pour dessiner la première machine volante.

Ce regain d'attention actuel répond aux défis du changement climatique, à la pollution engendrée par les activités humaines et à l'épuisement des ressources : le génie de la nature peut apporter des solutions économiques et nous aider à adapter nos modes de vie à notre environnement, tout en limitant les dégâts causés sur la planète. Bien avant nous, les animaux ont dû développer des moyens de survie, construire leur habitat, le tempérer en fonction du climat, se protéger contre les bactéries, se nourrir en toutes circonstances, etc. La nature est peu énergivore ; elle évite le gaspillage en trouvant une seconde vie aux déchets : elle utilise l'énergie du soleil et vit sur les seuls nutriments locaux. Même les formes s'adaptent et découlent de fonctionnements intelligemment mis en œuvre.

Le biomimétisme est ainsi un moyen d'innover, dans bon nombre de discipline, en s'inspirant de la nature dans le but de développer des projets économiques et stables dans le temps. « Contrairement à la révolution industrielle, la révolution biomimétique s'ouvre sur une ère qui ne repose pas sur ce que nous pouvons *prendre* dans la nature, mais sur ce que nous pouvons en *apprendre* » (Benyus, 2011).

Le biomimétisme s'inspire de la nature à trois niveaux : la forme, le processus et l'écosystème.

1- La forme

Copier la forme d'un élément de la nature est l'imitation la plus fréquente.

Prenons l'exemple du martin-pêcheur qui a l'incroyable capacité de plonger à toute allure dans l'eau sans provoquer la moindre éclaboussure. La forme aérodynamique de son bec a inspiré la conception d'un train japonais à grande vitesse. Ainsi, l'entrée dans les tunnels se fait plus silencieusement et de façon plus confortable pour les passagers. Cette silhouette permet d'augmenter la vitesse du train tout en réduisant sa consommation électrique de 15%.

On peut également parler de la feuille de lotus dont la surface est faite de micro-bosses et est recouverte de cire, ce qui crée un angle de contact important et diminue fortement la mouillabilité. Les gouttes d'eau ruissellent sur la feuille en emportant les crasses avec elles. Ce concept a été repris pour donner des propriétés hydrophobes à des vitrages autonettoyants (Benyus, 2009).



Fig. 11 : TGV japonais Shinkansen inspiré par le bec du martin-pêcheur (gauche) et vitrage autonettoyant inspiré par feuille de lotus (droite)
[tpe-biomimetisme-chimie.e-monsite.com]

Il existe également une entreprise canadienne, *WhalePower*, qui étudie les nageoires cannelées des baleines à bosse pour concevoir des éoliennes avec une meilleure production énergétique même avec des faibles vents (Ceebios, 2013).

Enfin, les scarabées vivant dans le désert de Namibie ont développé un système pour trouver de l'eau en pleine sécheresse. Ils sortent pendant la nuit en haut des dunes et se mettent face au vent pour capter l'humidité de la brise matinale. Des gouttes d'eau se forment sur leur carapace et le profil de leurs élytres permet à l'eau de couler jusqu'à leur bouche. Des couvertures de bâtiments inspirés de cette technique pourraient récolter l'eau du brouillard (Benyus, 2009).

2- Le processus

Dans le monde animal et végétal, les matériaux sont fabriqués à température et pression ambiante et sans recours à des produits toxiques ou en très faible quantité. Ainsi, l'araignée a la capacité de fabriquer un fil incroyablement résistant produit à partir de six types de soie tissés ensemble (Pawlyn, 2010). En effet, « à diamètre égal, il est 5 fois plus résistant que l'acier et 3 fois plus résistant que les meilleures fibres synthétiques » (Ceebios, 2013). Contrairement aux arachnides, l'homme a besoin de pressions et températures importantes pour réaliser une fibre aux propriétés identiques.

3- L'écosystème

On peut aussi s'inspirer du fonctionnement et de l'organisation des organismes vivants et utiliser leurs interactions pour faciliter la régulation et la stabilité de nos systèmes techniques en permettant leur auto-adaptation. C'est le cas par exemple dans certaines stations d'épuration (comme à Saint-Just en France) qui purifient l'eau grâce à la nature. En effet, certaines plantes ont le pouvoir d'éliminer les impuretés et polluants des eaux usées : il est alors possible de filtrer l'eau de façon écologique (Ceebios, 2013).

En architecture, il est indispensable de réduire l'impact environnemental des constructions. Pour construire de façon plus durable, il est possible aussi de s'inspirer de la nature.

3. LA TERMITIERE : UNE SOURCE D'INSPIRATION POUR LE REFROIDISSEMENT DES BATIMENTS ?

Nous allons nous intéresser plus particulièrement au cas de la termitière, dont la forme peut inspirer la conception de bâtiments peu énergivores.

3.1 Les termites

Depuis 150 millions d'années, les termites se développent sur tous les continents, à l'exception de l'Antarctique. De la famille des blattes, cet insecte végétarien est le seul capable de digérer le bois grâce à son tube digestif qui peut assimiler la cellulose et la lignine. Egalement appelé fourmi blanche, il s'oppose pourtant à celle-ci, qui est omnivore et descend de la guêpe. Le terme a également une carapace moins dure que celle de la fourmi et donc moins résistante aux rayons du soleil. C'est pourquoi, il vit dans des galeries souterraines, à l'abri de la lumière (Mayer, 2014). En effet, ces petits insectes d'environ quatre millimètres de longueur sont aveugles et vivent dans les endroits chauds et sombres. Il existe plus de 2 000 espèces différentes de termites pour lesquelles les habitats diffèrent : les arbres, les termitières qu'ils construisent dans les zones arides et humides ou encore les habitations humaines en bois où les conditions sont idéales pour leur développement (température, hygrométrie, nourriture). Il existe également des termites nomades qui n'ont pas de territoire précis (Bezelle, 2002).

Les termites s'organisent en société et vivent en colonie mixte. Ils sont divisés en castes, c'est à dire qu'ils font la distinction entre les individus stériles et ceux qui s'occupent de la reproduction (Quivrin, 2008). La colonie est dirigée par la reine, incapable de bouger en raison de son volume imposant : elle passe ses journées à pondre des œufs, en compagnie de son roi, afin d'assurer le renouvellement de la colonie. La répartition des rôles parmi des termites permet une bonne organisation de la société.

On retrouve tout d'abord les soldats qui protègent la termitière : de grande taille et avec une tête rouge, ils sont pourvus de mandibules leur permettant de projeter une substance toxique lorsqu'un intrus veut envahir leur territoire. Les soldats représentent 3% de la colonie.

Ensuite, il y a les ouvriers, termites de très petite taille, qui exécutent les autres tâches :

- Les infirmiers transportent les œufs dans des loges d'éclosion,
- les maçons assurent l'entretien de la termitière,
- les jardiniers prennent soin du champignon développé par diverses espèces afin de rendre le bois plus digeste et
- les aventuriers qui sortent de la termitière à la recherche de nourriture pour alimenter les larves, le couple royal et les soldats.

Certaines espèces construisent d'impressionnantes termitières, en forme de dôme ou de cathédrale, pouvant atteindre des hauteurs imposantes. Il faut cependant plusieurs années pour que ce monticule prenne forme. Faites de terre, de bois et de fragments végétaux, liaisonnées par la salive des termites, les parois sont très solides (Bezelle, 2002).

D'un point de vue architectural, trois types de termitières peuvent nous intéresser :

3.2 Les termitières des 'Amitermes Meridionalis'



Fig. 12 : Termitières '*Amitermes Meridionalis*' vue de profil (gauche) et de face (droite)
[arkive.org]

Ces termites vivent en Australie et orientent leur habitat en fonction de la course du soleil. Alignée sur l'axe nord/sud, la construction haute et large a une forme aplatie. Ainsi, le côté le plus étroit fait face aux rayons du soleil aux heures les plus chaudes pour minimiser l'absorption de chaleur. Cette disposition est intéressante pour l'orientation des immeubles lorsque le site le permet (Pawlyn, 2011).

3.3 Les termitières des 'Macrotermes bellicosus'

L'entomologiste Maximilien Quivrin (2008) a étudié les termites *Macrotermes* d'Afrique. Ces insectes construisent d'imposantes termitières cathédrales dans lesquelles la survie de la colonie et du champignon qu'elle cultive dépend de la qualité de thermorégulation de leur habitat. On retrouve ce type de termitière plutôt dans les régions chaudes et sèches comme la savane.

Le monticule comprend plusieurs dizaines de mètres cubes de terre et est constitué d'une cheminée centrale pouvant atteindre jusqu'à six mètres de haut. La majorité de la population vit dans la zone située dans le prolongement de la cheminée, en dessous du niveau du sol, appelée habitacle. Cette zone, d'environ un mètre de haut, est composée de différentes loges qui abritent les termites et contiennent les meules à champignons (Girard & Lepage, 1991). La meule est composée d'un substrat à base de bois prédigéré par les termites dans lequel des champignons microscopiques se propagent et sur lequel le mycélium de ce champignon se développe. Le métabolisme de ce champignon concentre l'azote dans les tissus. Après un rapide passage par le tube digestif du termite, la cellulose du bois n'est pas totalement digérée. Les champignons vont donc se charger de terminer cette digestion en transformant la cellulose en une substance sucrée que les ouvriers prélèvent pour se nourrir et pour nourrir tous les membres de la termitière. C'est pourquoi le champignon est indispensable à la survie de la colonie. Par contre, la culture de celui-ci doit se faire dans un climat précis (Mayer, 2014).



Fig. 13 : Termitière cathédrale au Mali
[Quivrin, 2008]

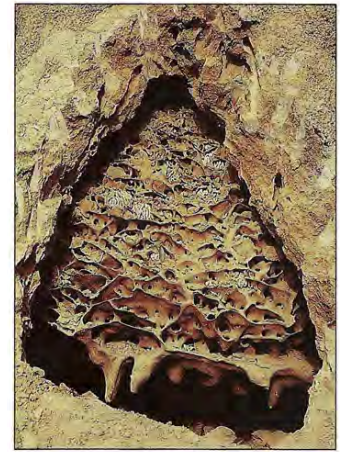


Fig. 14 : Nid de Macrotermes
[Girard & Lepage, 1991]

Au centre de l'habitacle, la loge royale est la zone où la reine pond environ 30 œufs par minute. Une lame d'air sur le pourtour permet l'aération du nid et, ainsi, participe à la protection des champignons contre les changements de température. De cette manière, le nid des termites peut conserver une température interne constante et idéale pour la culture des champignons, une humidité relative presque saturée et une concentration en dioxyde de carbone élevée (Girard & Lepage, 1991).

En Afrique, les températures extérieures varient de 0°C pour les nuits les plus froides à 40°C en journée. Malgré ces changements thermiques, les termites parviennent à garder une température interne constante d'environ 30°C dans le nid et un taux d'humidité proche de la saturation. Certains chercheurs ont réalisé des études à propos de cette climatisation naturelle afin d'y trouver une application possible aux bâtiments (Quivrin, 2008).

Comment fonctionne la circulation d'air dans ce type de termitière ?

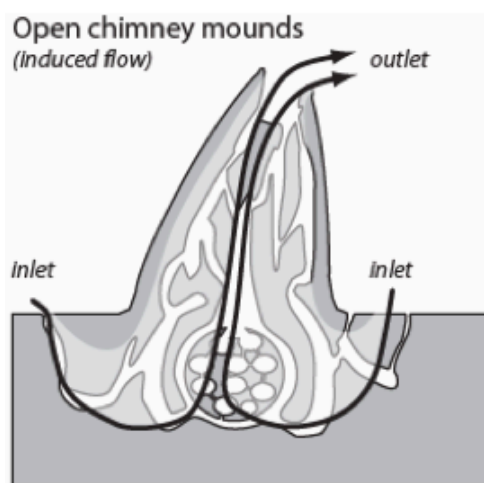


Fig. 15 : Flux induit
[Turner & Soar, 2008]

Dans les termitières cathédrales, l'air circule grâce au principe des flux induits, également appelé 'effet cheminée'. Le monticule est exposé aux vents rapides et le long conduit central au-dessus du nid permet à l'air chaud de s'extraire par le sommet (Quivrin, 2008). Dans ce modèle, les flux sont unidirectionnels et l'air circule grâce à l'effet 'Venturi'. En effet, « lors d'un rétrécissement, il y a une chute de pression, au bénéfice d'une élévation de la vitesse » (Caudrelier, 2014). De plus, l'accélération du vent engendre une diminution de la température : c'est la décompression adiabatique.

Lorsque l'air quitte le monticule par le conduit central, il crée une dépression dans la partie inférieure du nid. L'air extérieur est alors aspiré à travers des petites ouvertures au niveau du sol. Cet air circule sous terre jusqu'à la nappe phréatique à travers des galeries souterraines pour ensuite remonter par le nid pour rafraîchir les loges et ensuite être évacué par la cheminée (Quivrin, 2008 ; Bezelle, 2002).

C'est donc grâce à ces cheminées que les termites peuvent thermo-réguler leur habitat. Lorsqu'il fait trop chaud dans le nid, l'air est expulsé par les ouvertures mais une fois que la température diminue, ils peuvent obturer les trous avec de la boue. Les termites ventilent leur habitat de façon naturelle : ils prouvent l'efficacité de cette technique qui ne nécessite aucun recours à des ventilateurs (Bunn, 2004).

3.4 Les termitières en forme de dôme

Selon Turner et Soar (2008), il existe un deuxième type de ventilation au sein des termitières qui se régule sur base de l'effet thermosiphon. Dans les forêts plus fraîches, on trouve des termitières en forme de dôme conique sans la moindre ouverture vers l'extérieur. Les flux induits ne peuvent donc pas avoir lieu.

Comment fonctionne la circulation d'air dans ce type de termitière ?

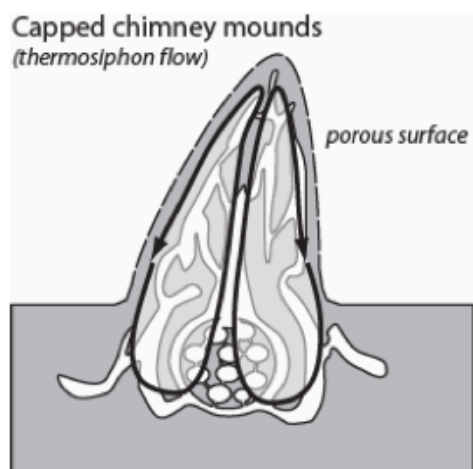


Fig. 16 : Flux thermosiphon
[Turner & Soar, 2008]

Dans ces habitations, la température du nid est inférieure de 2°C par rapport aux termitières cathédrales (Korb, 2003). Les mouvements d'air suivent un circuit dans lequel les échanges de chaleur se font par convection. « Un effet thermosiphon correspond au fait qu'un fluide (air, eau, etc) se met en circulation de façon naturelle » (Tixier, 2001). Pour cela, il doit y avoir un circuit avec des différences de température. En effet, lorsque l'air se réchauffe, sa masse volumique diminue et il est donc amené à monter.

Dans la termitière, l'air est réchauffé par l'activité des termites. Cet air chaud monte jusqu'à la surface poreuse du monticule où ont lieu des échanges gazeux avec l'extérieur. L'air est refroidi. Ainsi, sa densité augmente et il redescend pour rafraîchir le nid. Dans ce schéma, les flux sont bidirectionnels et ils suivent un circuit fermé (Turner & Soar, 2008).

3.5 Une étude plus récente

De nombreux bâtiments ont été construits en s'inspirant de ces mécanismes (principalement l'effet 'cheminée') et leur fonctionnement est en général satisfaisant. Pourtant, des études récentes ont montré que les termitières fonctionnent aussi selon d'autres principes.

Contrairement aux études antérieures qui envisagent une température constante au sein du nid, les résultats de Turner et Soar (2008) montrent que la température à l'intérieur d'une termitière '*Macroterme michaelseni*' varie d'environ 17°C en fonction des saisons, allant de 14 à 31°C. De plus, dans les nids d' '*Odontotermes transvaalensis*' d'Afrique du sud, la température ne change pas malgré l'ouverture et l'obturation par les termites de la cheminée centrale alors que ces manipulations devraient modifier la thermorégulation du nid. Ces résultats démontrent que, dans le cas des dômes fermés, la ventilation naturelle ne modifie pas l'ambiance thermique du nid.



Fig. 17 : '*Macroterme michaelseni*', Namibie
[ESF, 2015]

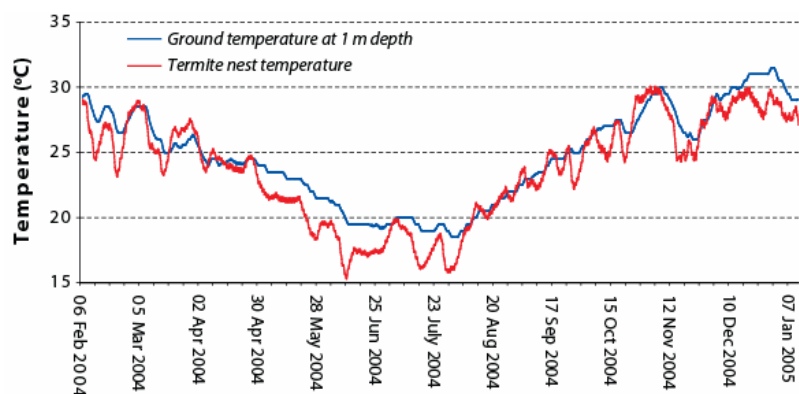


Fig. 18 : Températures annuelles du nid d'une '*Macroterme michaelseni*' en Namibie.
[Turner & Soar, 2008]

La figure 18 indique que la température du nid est proche de celle du sol mesurée à un mètre de profondeur. Cette observation peut s'expliquer par le fait que le nid bénéficie de l'inertie thermique du sol. Sa température n'est pas constante, mais elle n'atteint jamais les valeurs extrêmes observées au niveau du sol.

Depuis 2004, l'ingénieur Rupert Soar et le physiologiste Scott Turner, étudient les termitières. Selon eux, les études antérieures n'ont pas pris en compte la complexité fonctionnelle du réseau interne des termitières. Grâce à la reconstitution d'une termitière, ils peuvent y voir plus clair et affirment qu'il n'y a que très peu d'échange gazeux entre le monticule et le nid des termites. De plus, le vent est un élément indispensable pour le renouvellement de l'air dans le nid.

Les deux chercheurs ont réalisé un modèle en trois dimensions des galeries internes construites par les insectes d'une termitière de huit mètres de haut en Namibie. Pour ce faire, ils ont coulé sept tonnes de plâtre par la cheminée centrale, et grâce à un scanner géant, ont pu découper la structure solidifiée en fines couches d'un millimètre d'épaisseur. Les photos de chacune de ces couches ont servi de base à la réalisation d'un modèle informatique (Park & Lord, 2010).

Comme expliqué précédemment, le nid de la colonie se situe sous le niveau du sol et est composé de nombreuses galeries. Ces petites loges sont reliées entre elles par de très petites ouvertures de quelques millimètres seulement. Les termites peuvent passer à travers ces trous, mais ils sont bien trop petits pour laisser l'air circuler librement. C'est pourquoi les échanges gazeux entre le monticule et le nid paraissent totalement insuffisants pour permettre de rafraîchir le nid.

Des mesures prises sur une année montrent que la température du nid est, la plupart du temps, plus fraîche que celle du monticule. Les résultats sont repris ci-dessous.

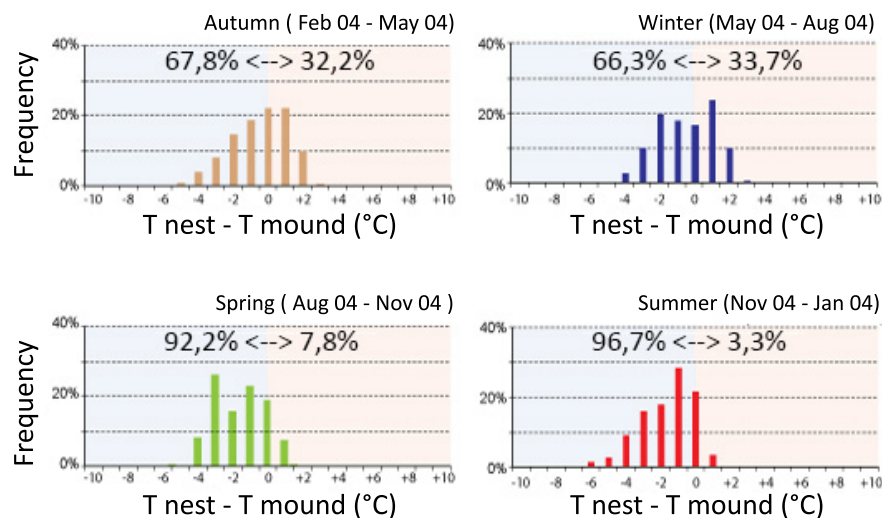


Fig. 19: Températures à l'intérieur du nid et de la cheminée
[ESF, 2015]

Tout comme l'être humain, le termite respire et consomme de l'énergie. Il est donc indispensable de renouveler l'air, de la même façon que dans nos habitations, afin de remplacer l'air vicié par de l'air frais riche en oxygène (Turner, 2011). Le taux métabolique de la colonie (=énergie consommée au repos) est très élevé. Il est d'environ 50 à 200 watts sachant que celui de l'homme varie de 80 à 100 watts (ESF, 2015).

Turner et Soar (2008) comparent le fonctionnement de la termitière à nos poumons. Ils fonctionnent tous les deux comme des échangeurs à plusieurs phases.

Prenons tout d'abord l'exemple du poumon. Dans le conduit principal, la trachée (représentée en rouge sur la figure 20), les flux d'air se font par convection. L'inspiration et l'expiration entraînent des mouvements d'air réguliers à travers ce tube grâce à une force mécanique, provenant de l'action de nos muscles respiratoires. Par contre, dans les alvéoles (représentées en bleu), il n'y a pas de flux massif d'air. Les échanges gazeux se font par diffusion. Entre les deux, dans la zone intermédiaire, les bronchioles (en vert) contrôlent le transfert entre le régime de convection et celui de diffusion. Le fait de respirer rapidement améliore les échanges gazeux et facilite le passage de l'oxygène et du CO₂ dans la phase intermédiaire.

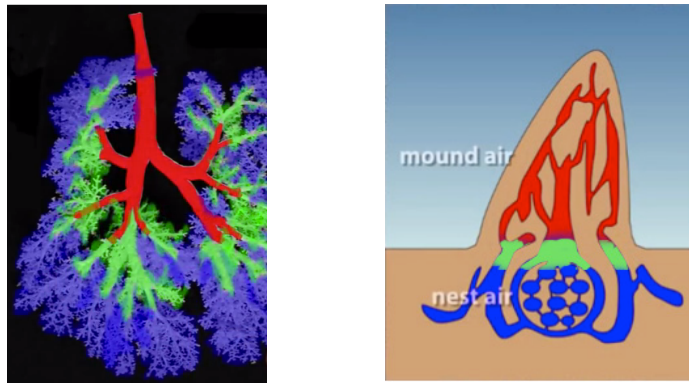


Fig. 20 : Comparaison entre le poumon (gauche) et la termitière (droite)
[Turner, 2011]

Les trois phases sont quasi identiques pour la termitière : le monticule comprend de nombreuses galeries dans lesquelles les flux sont mis en mouvement par convection grâce aux turbulences du vent, les petites ouvertures au sein du nid engendrent des échanges gazeux par diffusion et, entre les deux, la phase intermédiaire contrôle les faibles transferts d'air.

3.5.1 L'effet du vent

Pour mieux comprendre comment se mélangent les flux dans la zone de régime mixte, il est indispensable de bien comprendre l'action du vent sur le monticule.

L'air se déplace des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Le vent est un déplacement d'air imprévisible quant à sa vitesse et sa direction. Autour des constructions, un écoulement a lieu entre les zones de pressions différentes. Au niveau du sol, la rugosité provoque une diminution de la vitesse en raison de l'imperméabilité et l'adhérence. Ces obstacles provoquent des turbulences mais les pressions varient proportionnellement avec la hauteur. (Busch, 2009)

Le sommet de la motte fait donc face aux vents les plus rapides et turbulents. De plus, les pressions positives sont importantes sur la face du monticule qui reçoit les attaques du vent, les faces latérales subissent de fortes dépressions, tandis que sur la face arrière, la dépression diminue.

L'effet du vent provoque des flux complexes dans le monticule. En raison de la porosité de sa surface, la paroi du monticule laisse passer une partie de l'air tout en jouant le rôle d'un filtre. En effet, celle-ci ne laisse passer que les basses fréquences du vent. Ainsi, il n'y a pas de turbulence à l'intérieur de la termitière. Comme on peut l'observer sur l'image ci-dessous, la fréquence du vent diminue lors du passage dans les différentes couches.

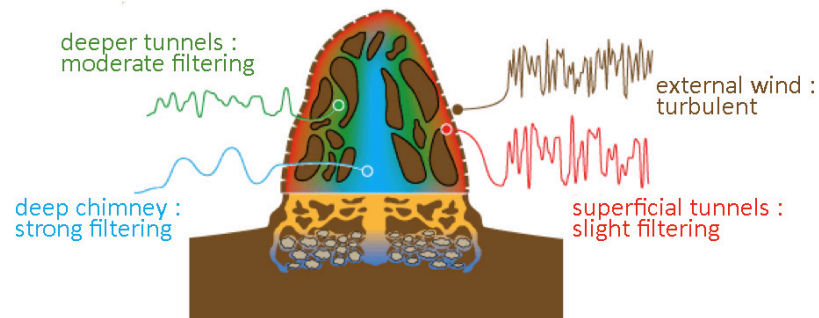


Fig. 21 : Différentes fréquences du vent
[ESF, 2015]

Les mouvements d'air à l'intérieur du monticule sont expliqués dans les images ci-dessous. L'air pénètre à l'intérieur de la termitière par le haut en raison de sa vitesse plus élevée. Une fois à l'intérieur, le flux d'air est aspiré vers le bas par la différence de pression. Ensuite, l'air remonte en longeant les surfaces latérales jusqu'au sommet où la pression est la plus faible. De là, la sortie de gaz se fait naturellement car la dépression est plus élevée à l'extérieur qu'à l'intérieur.

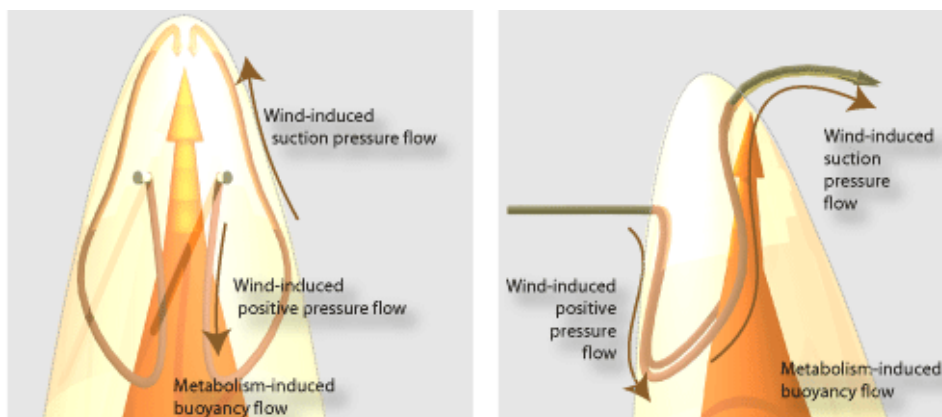


Fig. 22 : Circulation du vent à travers le termitière
[ESF, 2015]

Le renouvellement d'air grâce au vent apporte une source d'oxygène supplémentaire pour la survie des termites. En effet, l'air quitte le monticule par le sommet mais une partie de cet air reste dans la zone inférieure afin de ventiler le nid. Les termites consomment de l'oxygène et rejettent du gaz carbonique en grande quantité. Ce dernier est en surpression à l'intérieur de leur habitat. La différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur permet l'entrée d'air frais et le dégagement de CO_2 à travers la paroi poreuse mais cet apport en oxygène est insuffisant.

Ainsi, les systèmes de renouvellement d'air, système biologique dans le nid et atmosphérique dans le monticule, sont complémentaires pour offrir une quantité raisonnable d'oxygène indispensable à la survie de la colonie (ESF, 2015).

3.5.2 Le mélange des flux dans la zone intermédiaire

Deux hypothèses ont été émises au sujet des mécanismes grâce auxquels l'air du nid et du monticule pourraient se mélanger dans la phase de transition et ainsi favoriser la ventilation interne. Ces deux systèmes sont liés à l'énergie du vent sur le monticule (Turner, 2011) :

1. Le mécanisme « Pendelluft »
2. Le mélange acoustique.

- Le mécanisme « **Pendelluft** » : comme expliqué précédemment, le vent qui pénètre dans le monticule provoque des mouvements d'air engendrés par les différences de pressions. Ces déplacements ne sont pas capables de ventiler le nid, mais ils provoquent des oscillations. Le nid est relié au dôme par la cheminée centrale où les oscillations sont faibles et par des conduits en périphérie où la fréquence d'oscillations est élevée. Ces différences créent des turbulences à très petite échelle qui permettent la micro circulation des gaz. Ce phénomène pourrait ainsi provoquer, par diffusion, le renouvellement d'air nécessaire à la survie des termites (ESF, 2015).

Ce processus de ventilation oscillatoire à haute fréquence est notamment utilisé en médecine pour les troubles pulmonaires. L'augmentation de la fréquence respiratoire génère un décalage dans les débits d'air au sein des poumons. Une étude réalisée sur un modèle de conduits comparables aux poumons démontre que la fréquence a un effet sur l'écoulement dans les bronchioles (zone intermédiaire entre la trachée et les alvéoles). Les images ci-dessous expriment la vitesse d'écoulement dans les poumons en fonction de la fréquence respiratoire (Kim et al., 2009).

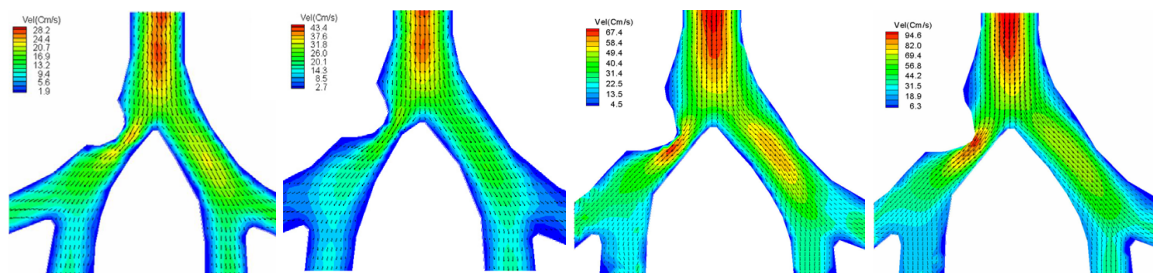


Fig. 23 : Influence de la vitesse d'inspiration sur un modèle

1. Respiration naturelle au repos (0,2Hz), 2. Respiration naturelle pendant l'effort (0,8Hz), 3. Oscillation à haute fréquence (10Hz), 4. Oscillation à haute fréquence (15Hz)
- [Kim et al., 2009]

- La **résonance** ou le **mélange acoustique** : les vents turbulents qui traversent les nombreux conduits de plusieurs mètres de long provoquent des vibrations à basse fréquence. Tout comme l'orgue, en fonction de la forme et de la longueur des conduits, les différentes fréquences entrent en résonance. Si la fréquence du tube et celle du vent sont identiques, la résonance va provoquer le mélange des gaz dans la zone de transition. La fréquence de résonance de la termitière en Namibie a été mesurée par l'ingénieur John Crawl : elle varie de 20 à 25 Hertz.

Des expériences ont été réalisées sur des bouteilles en plastique transparentes à l'abri de tout courant d'air afin de démontrer que ce phénomène de résonance peut mélanger les flux dans le régime intermédiaire. Les trois bouteilles sont reliées à des baffles de hauts parleurs et le son est envoyé à différentes fréquences (4Hz, 8Hz et 16Hz). Dans la première bouteille, le mélange n'a pas lieu. Dans la seconde, le mélange est rapide et se fait quasi instantanément. Alors que dans la dernière, le mélange se produit mais plus lentement. Cela démontre que les oscillations provoquées par les vibrations acoustiques peuvent avoir un effet sur le mélange d'air à l'intérieur de la termitière (ESF, 2015).

4. REFLEXION : INNOVATIONS ARCHITECTURALES POTENTIELLES

On peut noter que l'étude approfondie de la structure des termitières a permis de mettre en évidence des propriétés intéressantes du liant naturel secrété par les termites. Ceci est sans lien direct avec la ventilation mais ouvre des pistes d'innovation pour les matériaux de construction (Quivrin, 2008). Certaines populations du centre de l'Afrique (Angola, Cameroun, etc.) utilisent encore aujourd'hui l'argile des termitières pour fabriquer des briques et une sorte de plâtre, ceci malgré la vogue du ciment (Iroko, 1996). Une recherche sur la composition de ce matériau permettrait de la produire en quantités plus importantes et d'en généraliser l'usage.

Au plan de la ventilation, beaucoup de constructions à faible consommation d'énergie sont basées sur les flux induits ou sur le principe thermosiphon. On peut notamment prendre comme exemples, de nombreux bâtiments de dimensions importantes qui utilisent l'effet cheminée pour extraire l'air chaud et permettre ainsi le renouvellement de l'air comme cela se produit chez les termites de type 'Macrotermes Bellicosus'.

Mais sur base de l'étude de Turner et Soar, il serait peut être possible de compléter les systèmes actuels et réaliser des immeubles 'vivants' dans lesquels la structure du bâtiment participe à l'échange gazeux. Dans une construction, les murs servent de fermeture complète avec le monde extérieur. Ils sont construits pour isoler les espaces mais pourtant, nous sommes obligés d'y intégrer des portes ou des fenêtres pour y vivre. Et si ces murs n'étaient plus vus comme une barrière mais plutôt comme une interface adaptative ?

Il serait par exemple possible de développer des murs poreux, avec un complexe réticulaire comparable à celui des termitières, capables de filtrer les mouvements d'air extérieur. Ainsi, le bâtiment serait ventilé par les déplacements d'air atmosphérique sans avoir recours à l'élaboration d'une cheminée. On pourrait également inventer un bardage qui copie l'interface du monticule avec des tunnels qui capteraient le vent, ou des murs capables de refroidir l'air par évaporation à travers une surface poreuse (Turner et Soar, 2008).

Le modèle réalisé par Turner et Soar pourrait aussi servir de base à l'élaboration d'une nouvelle forme de briques ou de murs complexes capables d'utiliser l'énergie du vent pour ventiler les bâtiments en été sans ouvrir les fenêtres (Park & Lord, 2010).



Fig. 24 : Innovations potentielles pour les briques et les murs
[Park & Lord, 2010]

Ces idées d'innovation paraissent utopiques. Elles ne sont en tous cas pas directement transposables. Les termites étudiés construisent leur habitat dans de grandes étendues désertes qui présentent très peu d'obstacles pour le vent. Mais peut-on utiliser le vent comme unique source d'énergie pour ventiler les bâtiments en milieu urbain ? Dans les métropoles ? Le nombre d'obstacles et leur hauteur dans la plupart des villes est un facteur très défavorable pour la ventilation naturelle, car le nombre de façades accessibles au vent diminue.

L'explication par la résonance acoustique éveille un intérêt particulier.

Les bâtiments ont une fréquence qui leur est propre. D'après Perrault (2014), cette fréquence est à l'échelle de l'Hertz et dépend de la rigidité et de la masse de la construction. Le vieillissement du bâtiment engendre une diminution de sa rigidité et donc une faible modification de la fréquence. Ainsi, le vent, à une certaine fréquence, fait effectivement entrer le bâtiment en résonance, même si ces vibrations ne sont pas perçues par l'homme.

L'expérience de Turner et Soar explique surtout le renouvellement d'air dans la termitière pour répondre aux besoins de la ventilation hygiénique. En effet, le système mis en place par les termites permet apparemment d'évacuer les molécules de CO₂ et d'amener celles d'oxygène, ceci sans pour autant modifier les températures ambiantes.

Peut-on envisager de mettre en œuvre un effet de résonance acoustique pour faciliter le mélange des masses d'air dans un bâtiment, en complément au flux d'air créé par l'effet 'cheminée' ou l'effet 'thermosiphon' ? Il paraît peu praticable de jouer sur les fréquences propres du bâtiment, ce qui demanderait probablement de développer de grandes puissances, consommerait trop d'énergie et risquerait de vieillir prématurément la structure. Mais on peut imaginer un dispositif qui forcerait le mélange d'air avec un apport d'énergie plus limité pour renouveler l'air dans les locaux moins accessibles d'un bâtiment.

QUELQUES CAS CONCRETS D'APPLICATION

5. BATIMENTS INSPIRES DE LA TERMITIERE

« Des architectes se sont inspirés des termitières-cathédrales pour mettre au point un système de climatisation passive. » Maximilien Quivrin.

Il existe aujourd'hui certains bâtiments dont les concepteurs se disent influencés par le biomimétisme. Dans ce chapitre, seront approfondies quelques constructions au sein desquelles le système de ventilation passif se rapproche de la ventilation naturelle observée dans les termitières.

Parmi les nombreux bâtiments inspirés de cette manière, quatre seront présentés dans cette partie. L'effet 'cheminée' et l'utilisation de la masse thermique y sont mis en évidence, même si ces bâtiments mettent aussi en œuvre d'autres systèmes de ventilation naturelle, compléments nécessaires en fonction de la situation, du climat, de la taille, des types et périodes d'occupation, etc.

Les récompenses attribuées à ces bâtiments en font des bâtiments de référence.

Enfin, l'information disponible a également été un critère de choix.

L'Eastgate Bulding, œuvre de Mick Pearce, construit à Harare en 1996, est la référence principale qui fait de ce bâtiment un incontournable. En effet, Mick Pearce explique qu'il a réellement été inspiré par « une vidéo de David Attenborough sur l'intérieur du nid des termites en Namibie » (Pearce, 2015, *Eastgate for students*). Cet immeuble de bureau au Zimbabwe utilise des systèmes conçus pour les climats chauds. Le Queen's Building à l'université de Montfort au Royaume-Uni, conçu en 1993 pour des étudiants et professeurs, est adapté à des climats comparables à ceux de la Belgique. Le Council House 2 à Melbourne, pour lequel Mick Pearce a apporté sa contribution, est un immeuble de bureaux récent (réalisé en 2006) qui met en œuvre différentes techniques de refroidissement particulièrement adaptées aux températures élevées. Pour terminer, la serre nommée Davies Alpine House, dans le jardin botanique de Kew Garden à Londres, construite à la même époque que le bâtiment précédent, doit assurer un climat intérieur convenable pour les visiteurs mais également pour les plantes alpines.

Ces quatre bâtiments étudiés sont antérieurs à 2008. Auraient-ils été conçus différemment après l'étude approfondie de Turner et Soar ?

Le but de ce chapitre est d'analyser les systèmes de ventilation naturelle intensive utilisés, en vue de comprendre leur fonctionnement et mettre en évidence les éléments indispensables à des systèmes majoritairement naturels qui soient efficaces pendant les saisons chaudes.

5.1 Eastgate Building – Harare



Fig. 25: Eastgate building à Harare
[wikipedia.org]

« For me, it's not form follows function, it's form follows process »

Mick Pearce

5.1.1 Fiche technique

- Architecte : Pearce partnership
- Bureau d'étude : Ove Arup & Partners
- Client : Old Mutual Properties
- Lieu : Harare, Zimbabwe, Afrique
- Date de construction : 1996
- Type / Occupation : Bureaux et commerces
- Surface du terrain : 9 313 m²
- Superficie totale du bâtiment : 31 000 m²
- Coût de construction : 23 millions d'euro
- Stratégies de ventilation : Ventilation naturelle de nuit (effet cheminée, inertie thermique) et de jour (circulation d'air dans les dalles), pas d'air conditionné

5.1.2 Situation

L'Eastgate Building est un immeuble de bureaux situé à Harare, capitale du Zimbabwe. Localisé dans un pays d'Afrique australe, le climat y est subtropical et la saison sèche dure environ huit mois. En hiver, les températures peuvent atteindre 3°C la nuit et monter jusqu'à 42°C pour les journées estivales les plus chaudes. Les variations sur une même journée sont parfois de 10°C.

En 1992, Mick Pearce a commencé sa réflexion sur l'Eastgate. Les défis de la construction étaient de gérer les systèmes de refroidissement tout en minimisant l'impact énergétique. L'idée de la ventilation naturelle est survenue lorsqu'il a vu une émission au sujet des termitières au Nigéria, sur la BBC, présentée par David Attenborough. A cette époque, l'étude de Turner et Soar n'était pas encore d'actualité (Pearce, 2015, *Eastgate for students*). La réflexion de Mick Pearce s'est donc basée sur le schéma du flux induit des termitières cathédrales pour répondre à la question : comment ventiler, rafraîchir et chauffer le bâtiment de manière naturelle ? (Hickman & Ellis, 2013)

5.1.3 Composition du bâtiment

La superficie totale de l'immeuble est de 31 000 m² répartie en espaces de bureaux (26 000 m²) et de commerces au rez-de-chaussée (5 000 m²) avec 450 places de parking. Le bâtiment rectangulaire de 140 mètres de long et 70 mètres de large est composé de deux blocs identiques de neuf étages reliés entre eux par un atrium couvert d'une toiture vitrée. Il est orienté est-ouest (Institut biomimétisme Québec, 2008). Les murs extérieurs sont en maçonnerie afin d'assurer l'inertie thermique du bâtiment et la toiture est recouverte de 48 cheminées pour évacuer l'air vicié. L'atrium central, éclairé naturellement, fournit un espace de détente avec de grands bassins d'eau et des fontaines et crée un espace tampon entre l'intérieur et l'extérieur : c'est là que l'air frais est stocké. Dans les bureaux, la température interne est d'environ 25°C (Quivrin, 2008).

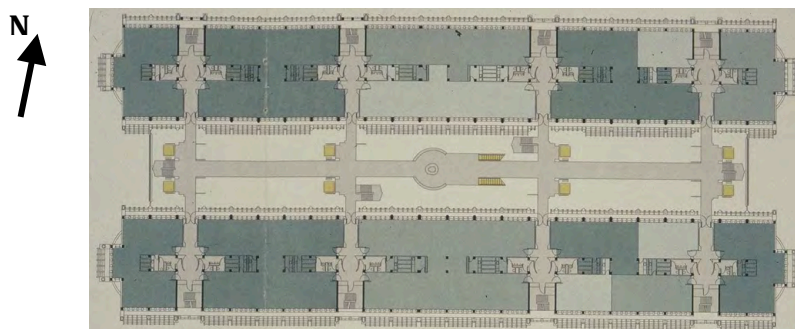


Fig. 26 : Eastgate Building – Plan type
[Pearce, 2007]

Les façades de l'Eastgate Building sont conçues pour servir de protections solaires. En effet, les larges avant-toitures et les arches profondes devant chaque fenêtre protègent les surfaces vitrées et diminuent ainsi le risque de surchauffe en été.

5.1.4 Fonctionnement

Les façades de l'Eastgate sont 'épineuses' tel un cactus dans le désert pour se protéger des rayons du soleil et diffuser la chaleur de façon plus efficace la nuit. Les termitières du nord de l'Australie ont également cette caractéristique. En effet, les surfaces lisses absorbent plus de chaleur en journée mais diffusent moins de chaleur la nuit. A l'inverse, sur les surfaces irrégulières, la chaleur est moins absorbée et émise plus efficacement grâce au rayonnement multidirectionnel. L'ombrage se fait alors par le relief des façades et la végétation le long des parois.

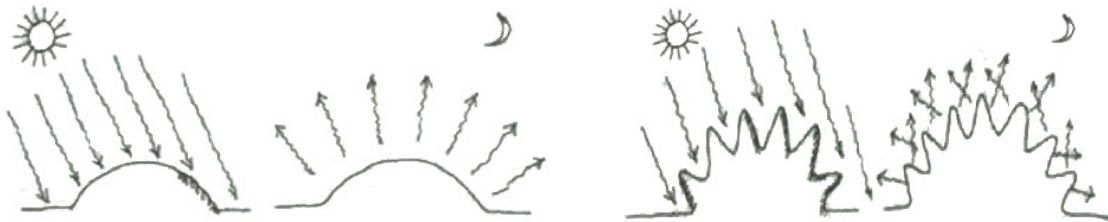


Fig. 27 : Réflexion du soleil sur les surfaces lisses et épineuses
[Pearce, 2007]

L'Eastgate reprend le fonctionnement des deux types de termitières vues précédemment :

- L'effet 'cheminée' est mis en œuvre grâce à la différence des températures intérieures et extérieures pendant la nuit. En effet, plus la différence est grande, plus la flottabilité est bonne et plus l'échange d'air est rapide (Pearce, 2015, *Eastgate for students*). Le principe des flux induits est également favorisé par la forme du bâtiment et ses grands espaces surmontés par les 48 cheminées dans lesquelles les conduits sont en maçonnerie.
- L'effet thermosiphon est mis en œuvre dans les bureaux et les commerces. L'air chaud amené dans les pièces par les occupants, équipements et apports solaires monte jusqu'au plafond par convection.

La combinaison de ses deux principes permet de garder une température constante dans l'immeuble sans l'aide d'un système de climatisation mécanique (Turner & Soar, 2008).

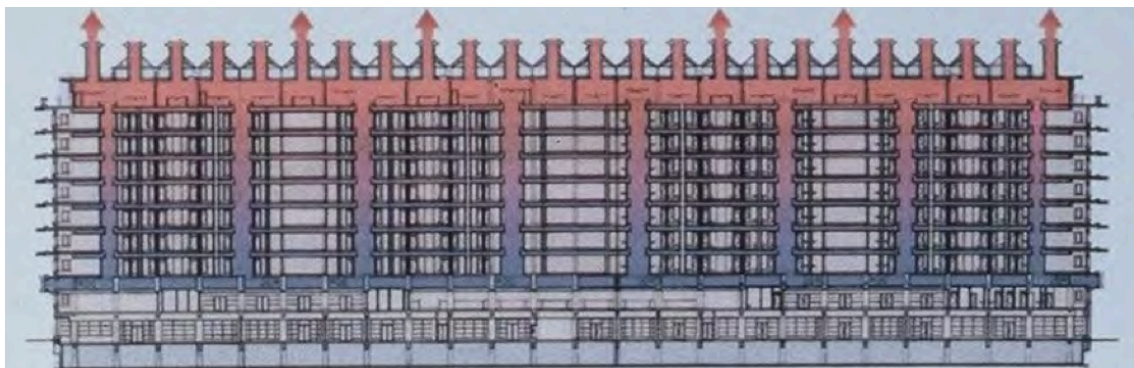


Fig. 28 : Façade et distribution thermique dans l'Eastgate Building
[Perce, 2007]

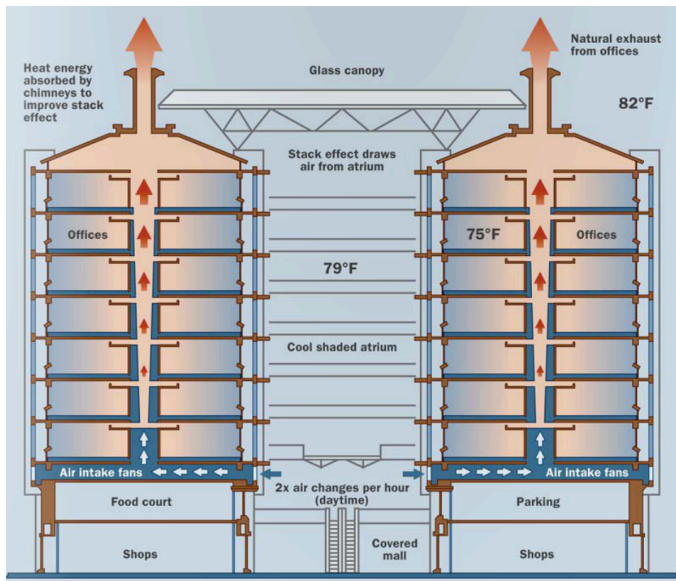


Fig. 29 : Coupe et distribution thermique dans le bâtiment
[Pearce, 2015, *Eastgate for students*]

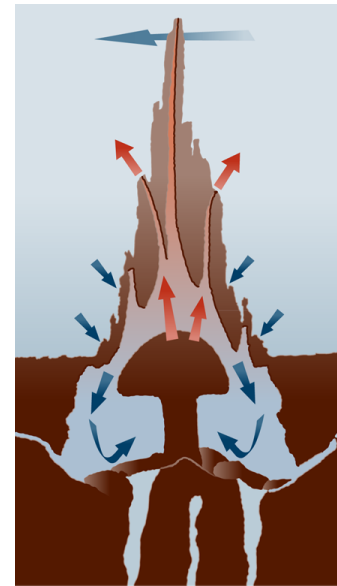


Fig. 30 : Distribution thermique dans la termitière
[smartwave.altervista.org]

La nuit, l'air frais entre dans le bâtiment pour ventiler la masse thermique et est stocké dans l'atrium. En journée, de grands ventilateurs mécaniques placés à 10 mètres de haut, là où l'air est plus sain, aspirent l'air depuis l'atrium pour le pulser dans les bureaux, au niveau du plancher. L'air passe à travers les dalles de béton pour être refroidi grâce à la forme complexe des blocs préfabriqués et à l'inertie du béton. Ce plancher est à 20°C en moyenne : il refroidit l'air en été et le réchauffe en hiver (Institut biomimétisme Québec, 2008). Ce mécanisme permet un renouvellement d'air fréquent (10 fois/heure la nuit et 2 fois/heure en journée) : l'air vicié riche en CO₂ est remplacé par l'air frais riche en oxygène.



Fig. 31 : Dalle préfabriquée (gauche) et plafond voûté en béton (droite)
[Pearce, 2015, *Eastgate for students*]

La forme arrondie des plafonds réalisés en béton a été pensée pour maximiser la surface de contact avec l'air ambiant. Pendant la journée, tandis qu'une partie de la chaleur est emmagasinée dans la masse de ces plafonds, l'air vicié est attiré dans les conduits verticaux, au centre du bâtiment, avant d'être évacué par la cheminée qui présente un diamètre réduit en partie supérieure (Pearce, 2015, *Eastgate for students*).

5.1.5 Résultats

En analysant les données des trois premières années d'occupation, on peut dire que la température au sein des bureaux reste stable et que les températures du rez-de-chaussée sont plus basses en raison de sa proximité avec le réservoir d'air frais qui est l'atrium (Institut biomimétisme Québec, 2008). Le graphique ci-dessous démontre l'efficacité de l'inertie thermique dans le bâtiment : les températures extérieures et celle de la dalle de béton évoluent de façon identique mais les variations sont réduites pour celle de la dalle. De plus, la température de l'air intérieur varie entre 20 et 25°C, ce qui paraît confortable pour les occupants.

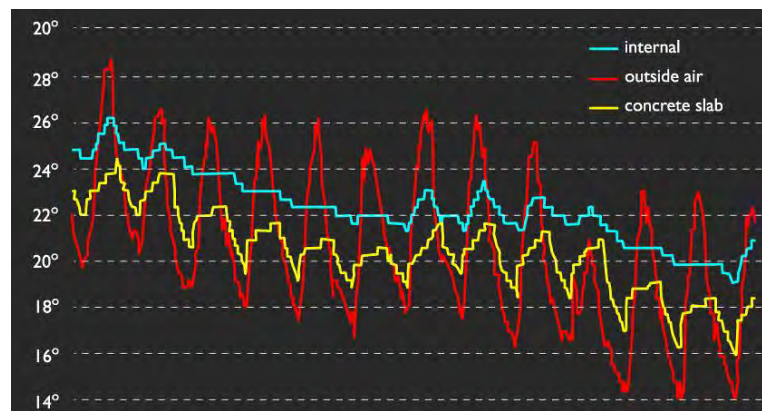


Fig. 32 : Températures relatives à l'Eastgate Building – Avril 1998
[Pearce, 2007]

Comparé à un immeuble de bureaux classique, sous le même climat, le refroidissement naturel par ventilation intensive permet de réduire l'utilisation des énergies non renouvelables de 35%, ce qui réduit le coût d'exploitation de 10% et engendre ainsi une économie significative (Heredia, 2013).

5.1.6 Récompenses

2000 – *Aga Khan Award et l'Environment*

1999 – *British Steel Design Sense for Architecture*

– *The Prince Claus Award for Culture and Development*, Pays-Bas

1998 – *l'AAMSA Cladding Award*, Afrique du Sud

1997 – *Steel Construction Award*, Zimbabwe

– *ICSC Certificate of Merit for innovative design and construction of a new centre*, Etats-Unis

– *International Design and Development Awards Programme of International Council of Shopping Centre*, Zimbabwe

– *Premier prix du Fulton Award, Concrete Society of Southern Africa*, Zimbabwe.

(Institut biomimétisme Québec, 2008)

5.2 Queen's Building – Montfort University – Leicester



Fig. 33 : Queen's building de l'université de Montfort
[walkingarchitecture.co.uk]

5.2.1 Fiche technique

- Architecte : Short Ford & Associates [Alan Schort & Bryan Ford]
- Ingénieurs stabilité : YRM Anthony Hunt
- Ingénieurs techniques spéciales : Max Fordham Associates
- Client : L'université de Montfort
- Lieu : Leicester, Royaume-Uni
- Date de construction : 13 août 1993
- Type / Occupation : Public / Etudes
- Superficie totale du bâtiment : 10 000 m²
- Coût de construction : +/-15 millions d'euro
- Coût par m² : 1 318,2 €/m² (au taux de 2002)
- Stratégies de ventilation : Ventilation naturelle principalement de jour mais également de nuit : effet cheminée, ventilation transversale et unilatérale, inertie thermique et ventilation mécanique.

5.2.2 Situation

Le *Queen's Building* se situe dans un site urbain à Leicester, en Angleterre. Les concepteurs ont utilisé des techniques qu'ils avaient exploitées dans des climats méditerranéens. Le bâtiment a été conçu en décembre 1993 dans le but d'abriter les locaux de la faculté d'ingénieur à l'Université de Montfort car la construction existante était jugée « ingérable et peu sûre » (The Queens Building, 1997).

5.2.3 Composition du bâtiment

La construction comporte quatre étages et huit cheminées de 13,5 mètres de hauteur en toiture. Les murs réalisés en parpaings et en maçonnerie apparente ainsi que les dalles de béton apportent au bâtiment une masse thermique importante. La partie centrale comporte deux auditorios de 150 places chacun et des salles de cours agencées autour d'un atrium. L'aile au sud abrite un laboratoire de mécanique et les deux plus petits bâtiments étroits au nord, disposés parallèlement entre eux, forment la cour d'entrée et reprennent les ateliers d'électricité.

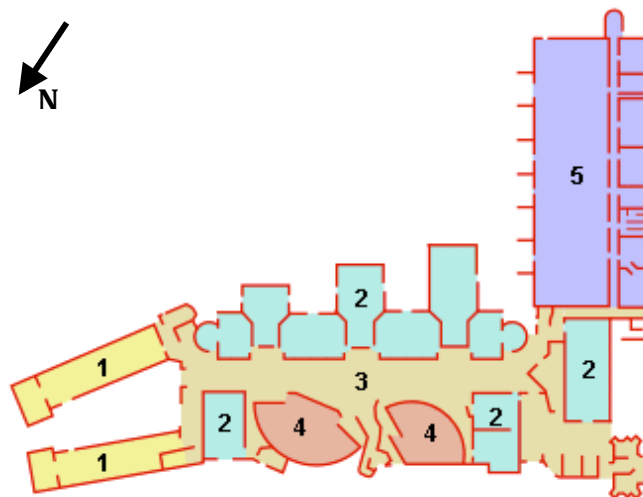


Fig. 34 : Queen's Building – Plan du premier étage

1. Atelier d'électricité - 2. Salle de cours - 3. Atrium - 4. Auditoire - 5. Laboratoire de mécanique
[Architecture et climat, 2015]

La construction d'une superficie totale de 10 000 m² a été pensée pour accueillir environ 1 500 étudiants et enseignants à plein temps. Aujourd'hui, le bâtiment abrite 2 000 occupants (Architecture et climat, 2015).

Le chauffage est mis en œuvre par un système de cogénération de 38kWe, une chaudière à condensation et une chaudière à haut rendement (Asbridge & Cohen, 1996).

5.2.4 Fonctionnement

L'étude du *Queen's Building* a été approfondie sur deux points importants : l'éclairage et la ventilation naturelle. Ces aspects ont été étudiés pour garantir aux occupants un confort thermique, acoustique et visuel optimal.

Au sein du bâtiment, les trois types de ventilation naturelle intensive (effet cheminée, transversale et unilatérale) sont mis en œuvre. A l'exception des auditories, la ventilation est diurne pour des raisons de sécurité (les fenêtres ne sont pas protégées) et de facilité (il faudrait du personnel nocturne pour régler les fenêtres manuellement). De plus, les fenêtres accessibles sont manuelles tandis que les inaccessibles sont automatisées (Architecture et climat, 2015).

Nous allons approfondir la ventilation naturelle pour le bâtiment central ainsi que pour les laboratoires de mécanique et d'électricité :

– Le bâtiment central

L'atrium central, d'une grande hauteur sous plafond, est un réservoir d'air frais depuis lequel les salles alentours sont ventilées.

Au rez-de-chaussée, les salles de classe sont ventilées grâce aux cheminées qui les surplombent, tout comme les auditories à l'étage supérieur. Par contre, dans ces derniers, le système de contrôle a été poussé à l'extrême pour favoriser le confort des occupants :

- avec une température extérieure de 30°C et 150 étudiants dans la salle, la température interne n'excède pas 24°C ; l'air entre par des grilles au niveau des orateurs et sous les gradins et des détecteurs vérifient la température et la teneur en CO₂ ; ceci complète le cas échéant les mécanismes de la ventilation naturelle ; en hiver, la salle fait environ 20°C quand elle est occupée et 16°C lorsqu'elle est vide ;
- pour optimiser les performances, la capacité des auditories a été limitée à 150 personnes pendant 5 jours/semaine et 8 heures/jour ; la seule source d'inconfort est amenée par les courants d'air que les étudiants perçoivent au premier rang.

Au troisième étage, on trouve les studios de dessin traversés par l'air frais de l'atrium et les bureaux du personnel ventilés par des ventilateurs en toiture. Dans ces bureaux, les plans de base ont été modifiés lors de la construction car les occupants voulaient plus d'intimité : ils ont décidé d'augmenter le nombre de parois séparatrices entre les bureaux et leur hauteur. Cela a modifié le mouvement de l'air et le confort recherché n'a donc pas été atteint (The Queens Building, 1997 ; Architecture et climat, 2015).

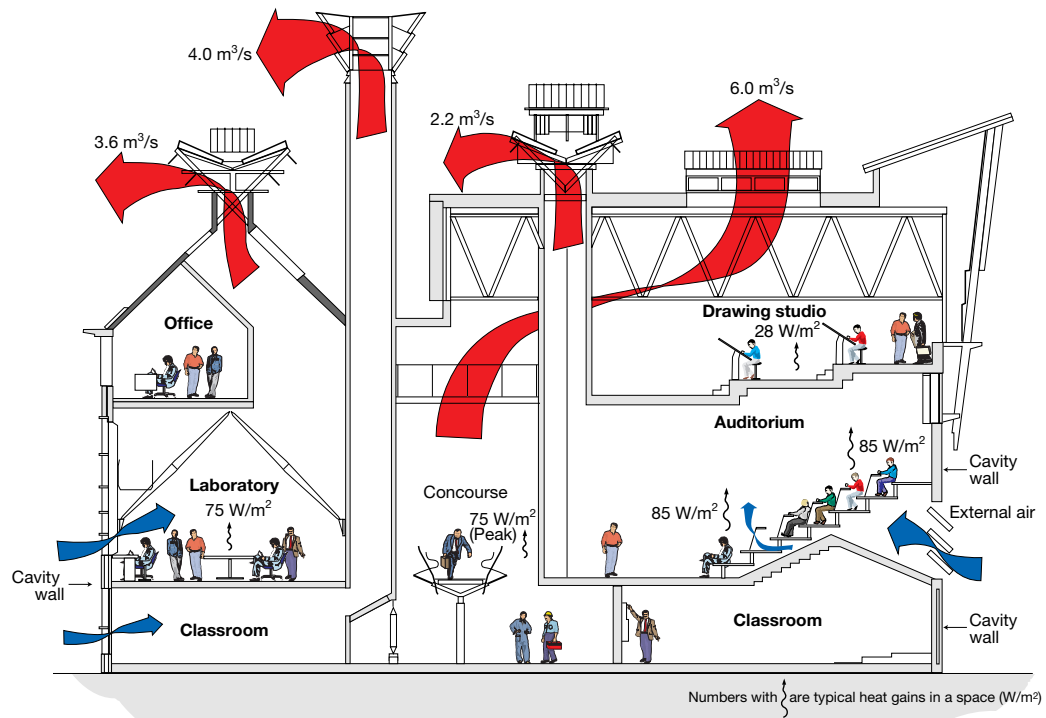


Fig. 35 : Flux d'air dans le bâtiment central
[The Queens Building, 1997]

– Le laboratoire de mécanique

L'air entre par la façade à travers sept contreforts verticaux réalisés en maçonnerie ajourée. Chaque contrefort est creux et isolé. Les ouvertures manuelles se font par des panneaux de bois mobiles. Malheureusement, des meubles ont été placés devant ces panneaux pendant l'occupation des locaux, ce qui rend la ventilation de mauvaise qualité. A l'ouest, l'air entre par des vides entre les bureaux du rez-de-chaussée à travers des grilles actionnées automatiquement. L'air vicié est évacué par des fenêtres automatisées en toiture. A titre informatif, les charges internes sont de 100W/m^2 (Architecture et climat, 2015 ; The Queens Building, 1997).

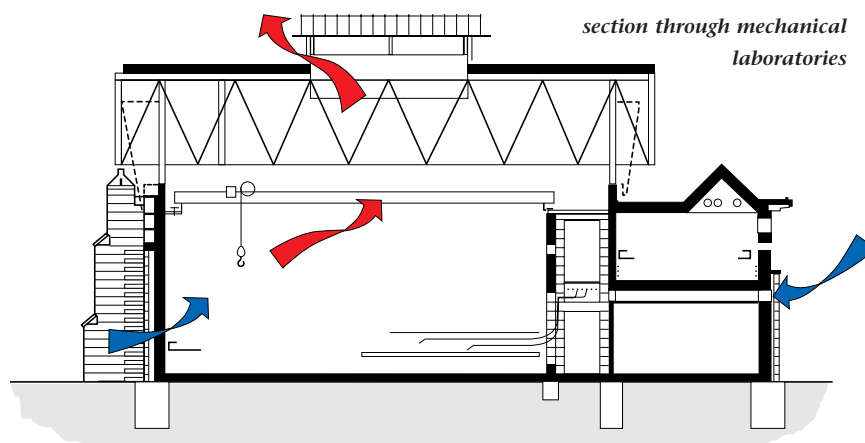


Fig. 36 : Flux d'air dans le laboratoire de mécanique
[The Queens Building, 2015, 1997]

– Les laboratoires d'électricité

Les deux ailes longues et étroites de quatre étages se ventilent naturellement et de façon transversale grâce à l'ouverture des fenêtres en journée. L'amenée d'air est suffisante pour équilibrer les apports internes de chaleur d'environ 85W/m^2 . La cour formée par ces deux bâtiments est une réserve d'air frais en été : la température y est inférieure de 2°C par rapport aux autres espaces extérieurs (The Queens Building, 1997). Ces laboratoires sont confortables mais il est difficile d'éviter les courants d'air (Architecture et climat, 2015).

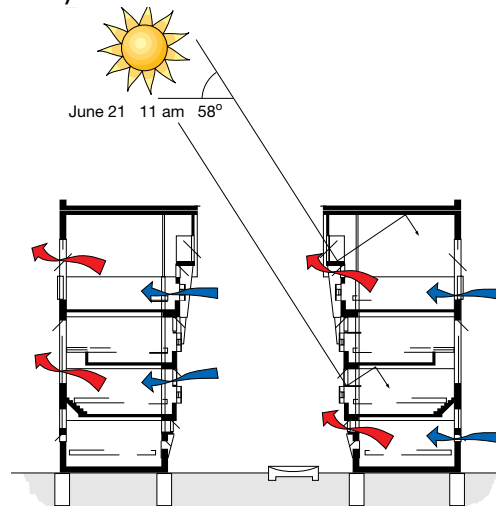


Fig. 37 : Flux d'air dans les laboratoires d'électricité
[The Queens Building, 1997]

Grâce à la grande inertie thermique du Queen's Building apportée par les dalles de béton et les murs de briques et à sa ventilation naturelle principalement diurne, la construction devrait être capable d'éviter les surchauffes en journée. Nous verrons plus loin que ce n'est pas tout à fait le cas. De plus, le bâtiment est muni de protections solaires devant les fenêtres, d'avancées de toiture à certains endroits, de stores extérieurs fixes sur la toiture de l'atrium et la façade est en relief pour maximiser les surfaces d'ombrage. Des ventilateurs ont été installés pour provoquer la ventilation lorsque le vent n'est pas suffisant mais ils n'ont encore jamais été utilisés.

En hiver, le bâtiment est chauffé par l'occupation, les équipements, mais aussi par le rayonnement solaire. Il comporte également un système de cogénération (gaz, 38kW d'électricité et 70 kW de chauffage), une chaudière à condensation et deux chaudières conventionnelles.

L'éclairage du bâtiment était un aspect important pour l'architecte. Il voulait optimiser la lumière naturelle dans les locaux afin de réduire au maximum la consommation énergétique. Le bâtiment est donc très vitré (façade, toiture, atrium) et l'espace central est composé de passerelles faites de métal et de verre par maximiser l'aération de l'espace.

Quant à l'éclairage artificiel, il a été calculé pour atteindre la puissance minimale requise pour le confort des utilisateurs (Architecture et climat, 2015).

5.2.5 Résultats

Un questionnaire a été réalisé pour évaluer le confort du point de vue des ses occupants. Environ 70 personnes (personnel académique, technique, administratif, chercheur et étudiant) ont donné leur avis.

Globalement, le confort thermique est atteint en été comme en hiver et l'air est de très bonne qualité, comparé à la norme nationale. Chacun est convaincu de la qualité du bâtiment obtenue grâce à sa masse thermique et à sa ventilation naturelle.

Par contre, pour ce qui est des bureaux au troisième étage, les occupants se plaignent de la lumière naturelle trop abondante dans certains espaces et de l'obscurité dans les autres. L'environnement de travail n'est pas optimal. De plus, la ventilation, qui est mécanique dans ces espaces, n'y est pas efficace et les membres du personnel qui occupent ces salles subissent la chaleur en été et expriment un sentiment d'étouffement tout au long de l'année (Asbridge & Cohen, 1996).

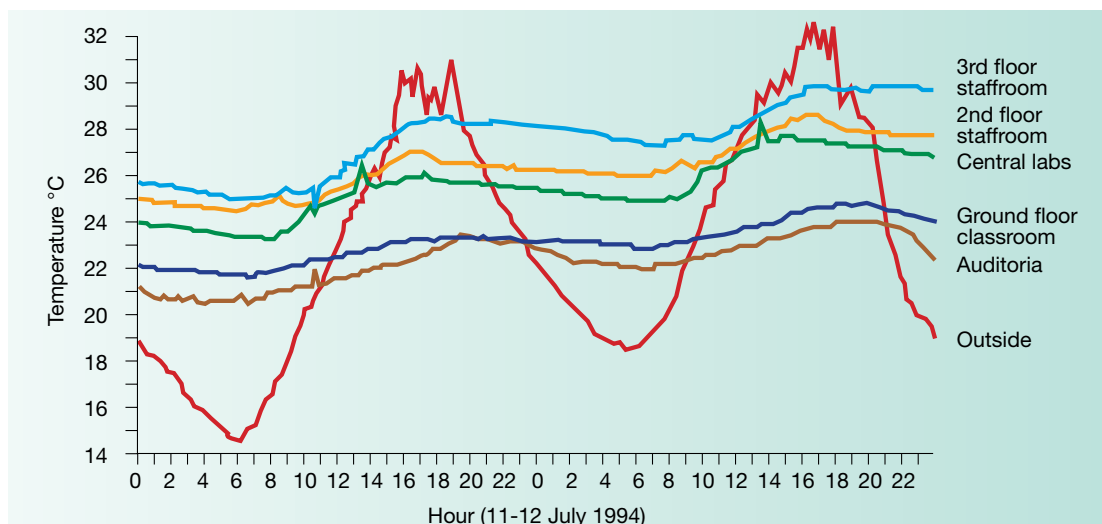


Fig. 38 : Profil des températures estivales – Juin à Août 1994
[The Queens Building, 1997]

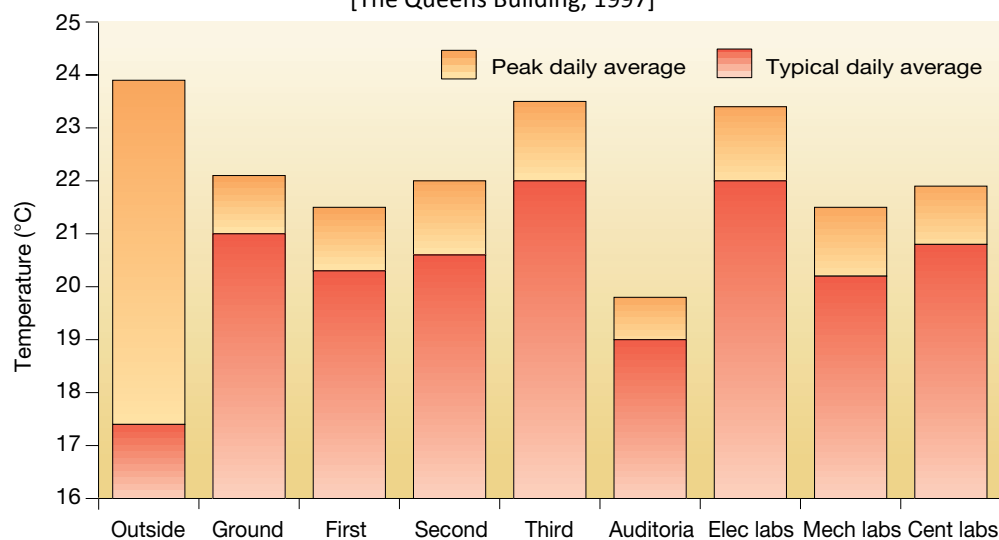


Fig. 39: Températures dans le bâtiment – Juin à Août 1994
[The Queens Building, 1997]

Les graphiques ci-dessus montrent que :

- les bureaux du personnel ainsi que les laboratoires, tous deux visibles sur la figure 35, atteignent des températures très élevées dans l'après-midi. Ces salles ne bénéficient pas de l'air frais stocké dans l'atrium central : le renouvellement d'air assuré par les ventilateurs ne semble pas efficace. En effet, les occupants décrivent l'ambiance comme étouffante.
- d'après la moyenne journalière reprise sur la figure 39, on observe de fortes chaleurs dans les laboratoires d'électricité, au nord. Ces derniers fonctionnent indépendamment du bâtiment central et donc de l'atrium. Malgré la ventilation transversale et la cour d'entrée présentée comme source de fraîcheur, le renouvellement d'air n'y est peut-être pas assez fréquent.
- par contre, les classes et auditorios qui bénéficient de la ventilation par l'effet du tirage thermique présentent des températures adéquates pour le confort des occupants.

Ainsi, il semblerait que la cheminée et l'atrium sont indispensables pour permettre une ventilation naturelle performante et offrir aux occupants des espaces de qualité.

Des données ont été récoltées pendant une année (Août 94 – Juillet 95). Il en ressort que le système de cogénération fournit 21% des besoins de l'immeuble pendant les mois les plus chauds. Cela représente un gain annuel d'environ £2500 (+/- 3 500€). Le système de cogénération ne fait pas une grande différence sur le point de vue financier mais il est indispensable du fait qu'il réduit l'émission de CO₂ de 30 tonnes/an. Il émet 65 kg/m² de CO₂. (Asbridge & Cohen, 1996) La consommation annuelle est de 145 kWh/m² ou 100 kWh/m² de chauffage et 45 kWh/m² d'électricité, ce qui est relativement bien selon les auteurs du texte (Architecture et climat, 2015). Il faut noter cependant que les objectifs de consommation d'énergie sont réduits dans les bâtiments actuels.

Design team:		Occupancy:	
Architect	Short Ford Associates	2000 students and staff	
M&E consulting engineer	Max Fordham Associates	U-values (W/m²°C):	
Structural consulting engineer	YRM-Anthony Hunt	walls	0.29 to 0.36
Quantity Surveyor	Dearle & Henderson	floor	0.19 to 0.45
Gross floor areas:		roof	0.20 to 0.31
teaching/lab spaces	6390 m ²	glazing (centre of pane)	2.50 to 3.60
computer suite	1600 m ²	Lighting levels (Lux):	
offices	1400 m ²	offices and computer rooms	300
concourse	300 m ²	circulation areas	150/200
amenity and dining	160 m ²	mechanical laboratories	1000
Total	9850 m²	general laboratories	750

Fig. 40 : Données concernant le Queen's Building
[The Queens Building, 1997]

5.2.6 Récompense

1995 : Winner of the 1995 HVCA Green Building of the Year award (The Queens Building, 1997).

5.3 CH2 (Council House 2) – Melbourne



Fig. 41: Council House 2 à Melbourne
[archdaily.com]

5.3.1 Fiche technique

- Architecte : DesignInc
- Génie civile et structure : Bonacci Group
- Client : City of Melbourne
- Lieu : Melbourne, Victoria, Australie
- Date de construction : Septembre 2006
- Type / Occupation : Commercial, public
- Superficie totale du bâtiment : 12 000 m²
- Coût de construction : AUD\$ 51 000 000 (=37 millions d'euro)
- Stratégie de ventilation : Ventilation naturelle de jour et de nuit (effet cheminée, inertie thermique, par évaporation, MCP, circulation d'eau sous les dalles) et mécanique (tour de refroidissement)

5.3.2 Situation

Le CH2 est un immeuble de bureaux implanté à Melbourne, sous un climat océanique. Melbourne est connu pour avoir les 4 saisons sur une journée : il n'est pas rare d'y voir de fortes pluies avec une chute importante des températures même en été. Le vent diffère avec les saisons : en hiver, il vient du sud alors qu'en été, il provient du nord. Etant situé dans l'hémisphère sud, l'orientation des bâtiments est opposée à la nôtre : il est donc important de prendre en compte que la façade nord est celle qui reçoit la chaleur importante en journée (Kim, 2012).

Jusqu'en 2005, Mick Pearce était l'architecte principal du CH2. Il est aussi l'architecte de l'Eastgate Building au Zimbabwe et les principes fondamentaux des deux bâtiments sont identiques : « l'architecture et son expression visuelle devraient répondre à l'environnement naturel, socio-culturel et économique de sa situation, tout comme l'écosystème dans la nature s'intègre dans son site » (Pearce, 2015, *CH₂*).

5.3.3 Composition du bâtiment

Le CH2, avec ses dix étages, s'élève à 40 mètres au-dessus du niveau du sol : le sous-sol accueille des parkings, le rez-de-chaussée abrite le hall et des commerces tandis que les bureaux remplissent les étages supérieurs. Il peut contenir 540 employés (Kim, 2012).

L'immeuble est rectangulaire en plan :

- Nord : la façade végétale avec balcons intégrés permet d'éviter les surchauffes en été et l'éblouissement dans les bureaux grâce aux plantes qui filtrent la lumière. Les surfaces vitrées sont plus importantes aux niveaux les plus bas, là où la lumière naturelle est plus faible et moins éblouissante ;
- Est : la façade en métal perforé, inspirée de l'écorce de l'arbre, permet la ventilation naturelle ;
- Sud : les cinq cylindres accolés à la façade permettent de chauffer, refroidir et alimenter le bâtiment en eau ;
- Ouest : les panneaux solaires automatiques se dirigent en fonction de l'orientation du soleil afin de réduire au maximum les surchauffes et l'éblouissement ;
- Toiture : la surface est recouverte de végétation, les turbines fonctionnant grâce au vent, les panneaux photovoltaïques produisent de l'électricité et les panneaux solaires chauffent l'eau (MelbourneCityCouncil, 2008 ; City of Melbourne, 2015).

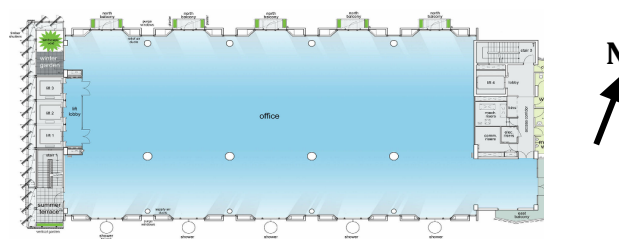


Fig. 42 : Council House 2 – Plan type
[Pearce, 2007]

De plus, l'immeuble fonctionne grâce à la cogénération au gaz naturel. Quant aux matériaux, la structure en béton recyclé a été préfabriquée, les protections solaires sont faites de bois recyclé et les châssis des fenêtres sont également en bois (DesignInc, 2011). Les matériaux utilisés ne contiennent pas d'éléments toxiques et l'utilisation de peinture a été réduite au maximum. Cela assure un air sain à l'intérieur de l'immeuble de bureaux pour une meilleure concentration des occupants. De plus, la qualité de l'air ambiant est améliorée grâce aux nombreuses plantes vertes renouvelées tous les dix-huit mois (Adams, 2008).

5.3.4 Fonctionnement

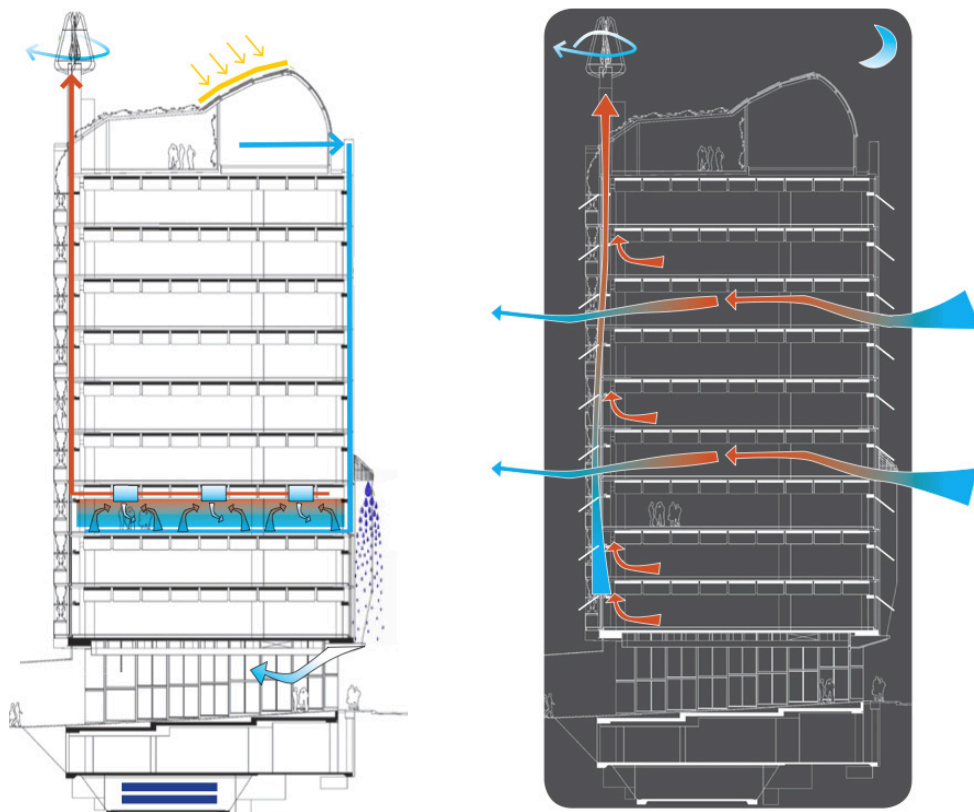


Fig. 43 : Flux d'air à travers le bâtiment pendant le jour (à gauche) et la nuit (à droite)
[melbourne.vic.gov.au]

En journée, l'air frais entre par des conduits le long de la façade sud et est distribué à chaque étage par des grilles intégrées dans le sol. Ces grilles peuvent être réglées par les occupants en fonction de la température interne ressentie. Dans les bureaux, l'air est renouvelé deux fois par heure (City of Melbourne, 2015).

L'activité humaine, les équipements et les rayonnements solaires amènent de la chaleur au sein du bâtiment. Une partie de cette chaleur est accumulée dans la masse du béton. L'inertie thermique de cet immeuble permet d'éviter les surchauffes au sein des bureaux malgré l'augmentation de la température extérieure. En montant par convection, l'air passe entre les plaques de béton ondulées, fixées à la structure, et est évacué hors du bâtiment à l'aide des cheminées le long de la façade nord (MelbourneCityCouncil, 2008). Les turbines, au sommet de ces cheminées, aident l'évacuation de cet air.

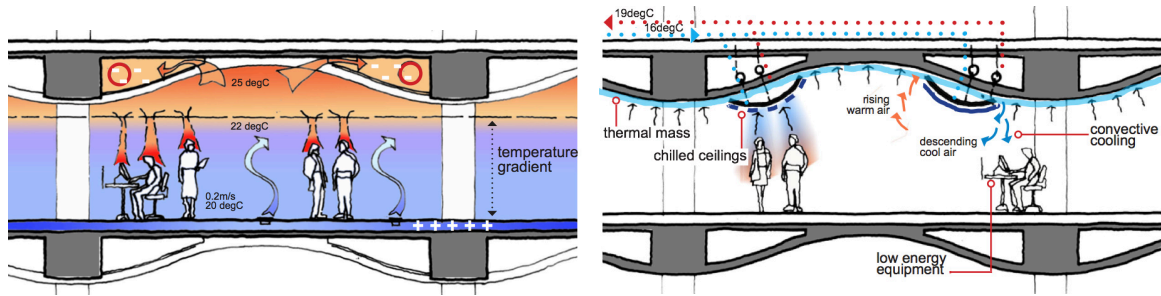


Fig. 44 : Système de dalles
[City of Melbourne, 2015]

L'immeuble de bureau CH2 est également refroidi grâce à la ventilation par évaporation. Les eaux de pluie sont récupérées et les eaux usées de la ville sont recyclées. (City of Melbourne, 2015). L'eau passe à travers cinq cylindres légers de 8 mètres de long et 1,4 mètre de diamètre et emmène l'air extérieur dans sa chute. « Si de l'air chaud et sec traverse un filet d'eau, il en provoque l'évaporation. La chaleur nécessaire à la vaporisation d'eau étant extraite de l'air, celui-ci se refroidit » (Architecture et climat, 2015). C'est le principe du refroidissement adiabatique.

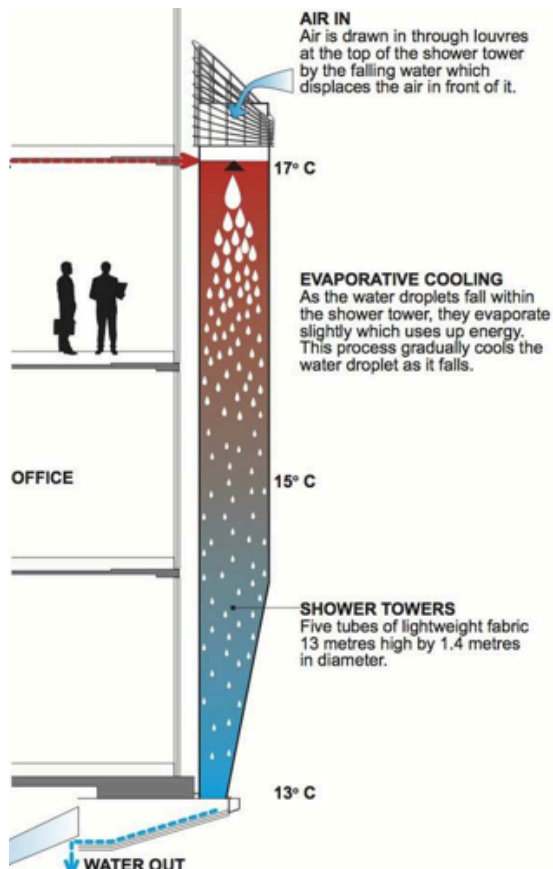


Fig. 45 : Cylindres sur la façade sud
[archdaily.com]



L'importance du refroidissement va dépendre de certains paramètres tels que le diamètre des gouttes d'eau pulvérisées ou la durée de la chute à travers le cylindre.

D'après Pearlmutter et al. (1996), des expériences ont permis de démontrer que les fines gouttelettes engendrent une diminution plus efficace de la température : des gouttes de 14mm de diamètre permettent une diminution de 12°C sur les premiers mètres de la chute. Par contre, si le diamètre des gouttes augmente (62mm), il faut une chute de 15 mètres pour réduire graduellement la température de l'air. On comprend aisément que, pour un même volume d'eau, la micro pulvérisation augmente la surface de contact entre l'eau et l'air et augmente ainsi la performance de l'évaporation.

Ainsi, l'air frais extrait des cylindres est utilisé pour climatiser les commerces du rez-de-chaussée. Quant à l'eau, elle passe à travers des "tours de refroidissement" où elle est mise en circulation dans une spirale pour accentuer la diminution de température avant de tomber dans des réservoirs disposés sous l'immeuble. Ces réservoirs abritent des milliers de boules comprenant un matériau à changement de phase (MCP) qui gèlent à 15°C et produisent de l'énergie au changement de phase liquide vers solide. Par temps chaud, les MCP absorbent la chaleur et se liquéfient. Au contraire, quand les températures diminuent, les PMC passent à l'état solide et dégagent de l'énergie pour réchauffer l'eau des cuves (Adams, 2008). Ces matériaux à changement de phase ont donc un comportement identique à celui des matériaux lourds : ils ont la capacité d'absorber la chaleur et la restituer plus tard.

Ce cheminement à travers les "shower tower", "cooling tower" et MCP amène l'eau aux environs de 16°C. Cette eau est alors envoyée dans des conduits métalliques apparents suspendus aux faux-plafonds en béton. Ce système de climatisation, installé dans les grands espaces de bureaux, permet de garder une température adéquate au confort des occupants. En effet, il était initialement prévu que la température de cette zone varie entre 21 et 25°C, mais grâce à ces panneaux de refroidissement qui recouvrent 35% des faux-plafonds, les concepteurs espèrent ne pas dépasser 23°C (City of Melbourne, 2006).



Fig. 46 : Conduits traversés par l'eau froide sous les dalles ondulées en béton
[architectureanddesign.com.au]

A Melbourne, les nuits d'été sont fraîches. Les fenêtres s'ouvrent donc automatiquement de 01:00 à 05:00 pour rafraîchir l'air intérieur et la chaleur emmagasinée dans les faux-plafonds est évacuée. (MelbourneCityCouncil, 2008).

On voit bien la similitude entre le fonctionnement de cet immeuble et la ventilation naturelle décrite dans le chapitre sur la termitière : l'air frais est amené par le bas à travers des conduits aux extrémités de la construction. Lorsque l'air se réchauffe, il sort par la cheminée. La température est idéale pour les occupants malgré les variations de la température extérieure (Kim, 2012).

5.3.5 Résultats

Grâce aux méthodes innovantes mises en œuvre, le Council House 2 réduit fortement sa consommation énergétique et ses besoins en eau : comparé à un immeuble de bureaux classique à Melbourne, il utilise 80% de moins en énergie et 70% de moins en eau (MelbourneCityCouncil, 2008).

En effet, la consommation énergétique est réduite de 20% grâce à l'ouverture automatique des fenêtres pendant la nuit et de 14% avec l'inertie thermique du béton (Adams, 2008). La cogénération réduit les besoins électriques de 10%. Les panneaux en toiture sont également indispensables en été : 26m² de panneaux photovoltaïques permettent l'automatisation des protections solaires en façade et 48m² de panneaux solaires fournissent 60% de l'eau chaude (MelbourneCityCouncil, 2008).

Cependant, en juillet 2012, des spécialistes en énergie du bureau *Exergy Australia* se sont penchés sur les divers systèmes mis en œuvre pour ventiler l'immeuble. Des problèmes apparaissent principalement au niveau de l'exploitation et du contrôle des ces systèmes. La performance énergétique attendue n'est donc pas atteinte. Le fonctionnement des systèmes en parallèle doit être évité lorsqu'il n'est pas indispensable (Hoogland & Bannister, 2012).

5.3.6 Récompenses

Une cotation de 6 étoiles a été attribuée au CH2 par le Green Building Council of Australia pour ses innovations et ses performances énergétiques importantes en 2010. Il a également reçu un grand nombre de prix pour sa qualité environnementale :

2009 – Asia Pacific Property Awards, Best Commercial Architecture 2009

2007 – Australian Property Institute Excellence in Property Awards (Victoria) President's Award

- RIAA Award for Sustainable Architecture (National)
- RIAA Award for Sustainable Architecture (Victoria)

2005 – World Environment Day Award joint winner of National Best Green Building Award

- Year of the Built Environment 'Imagining the Future' Award

2004 – Green Buildings Council of Australia, Six Star Rating for the Design Stage

- Year of the Build Environment National Awards, 'Imagining the Future' Award (DesignInc, 2011)

5.4 Davies Alpine House – Kew Garden – London



Fig. 47 : Davies Alpine House à Londres
[mimoa.eu]

5.4.1 Fiche technique

- Architecte : Wilkinson Eyre Architects
- Sous-traitants : Chris Blandford Associates, AEA Consulting
- Ingénieurs environnemental : Atelier Ten
- Ingénieurs structure : Michael Barclay Partnership
- Client : Royal Botanic Gardens, Kew
- Lieu : Londres, Royaume-Uni
- Date de construction : construit en 2005, ouvert au printemps 2006
- Type / Occupation : Public
- Superficie totale du bâtiment : 100 m²
- Coût de construction : £800 000 (=1,1 million d'euro)
- Stratégie de ventilation : Ventilation naturelle de nuit (circulation d'air dans les dalles en sous-sol) et de jour (effet cheminée)

5.4.2 Situation

La Davie's Alpine House est implantée dans le Royal Botanic Gardens Kew à l'ouest de Londres. Dans cette région, le climat est plutôt humide (Spring, 2006). Kew est un site du patrimoine mondial de l'UNESCO ; en 2005, il a accueilli environ 1 million et demi de visiteurs (Russell, 2006).

La première Alpine House a été bâtie en 1887 sur des fondations en maçonnerie, des murs en bois et une toiture vitrée. En 1939, elle a été démolie puis reconstruite. La troisième serre, érigée en 1981, avait un air de ressemblance avec l'actuelle par sa forme pyramidale et ses façades de verre (Kew, 2015) mais elle n'avait pas le même niveau de technologie. Cette troisième serre était équipée de plateaux de réfrigération basée sur le refroidissement artificiel des plantes, les ventilateurs étaient bruyants et les protections solaires n'étaient pas des plus efficaces (Russell, 2006). Pour l'actuelle serre, l'intention des architectes était de créer un bâtiment durable et économe en énergie grâce aux moyens passifs mis en œuvre (WilkinsonEyre, 2015).

Le bâtiment a été conçu pour abriter des plantes alpines rares et précieuses qui poussent naturellement dans les régions allant de l'Arctique aux tropiques. Il a donc été étudié afin d'offrir un environnement idéal pour les plantes, relativement proche du climat des hautes montagnes : une lumière naturelle abondante, de faibles températures ainsi qu'une circulation d'air constante et efficace pour éviter les surchauffes (Russell, 2006) .

Dans la nature, les plantes alpines se cachent sous la neige en hiver pour éviter les vents froids et les rayons directs du soleil. Au changement de saison, la fonte des neiges favorise leur croissance en leur procurant l'humidité nécessaire (Kew, 2015).

5.4.3 Composition du bâtiment

En plan, la forme d'ellipse orientée nord-sud permet de minimiser les apports solaires sur les façades latérales aux heures les plus chaudes (Spring, 2006), ce qui est un des concepts observés sur les termitières '*Amitermes Meridionalis*'. La serre mesure 16 mètres de long et 10 mètres de haut. En sous-sol, un labyrinthe est réalisé en parpaings sous une double dalle de béton. Le bâtiment est complètement vitré : les plaques de verre ont une faible teneur en fer, ce qui permet à plus de 90% de la lumière naturelle de passer à travers les vitrages (Kew, 2015). Les plaques font 12 mm d'épaisseur et sont assemblées par de fins joints de silicone. La structure est retenue par des tiges d'acier inoxydable en tension. En été, la serre se protège grâce aux stores amovibles en polyester tissé couvrant jusqu'à 70% des panneaux de verre (Russell, 2006).

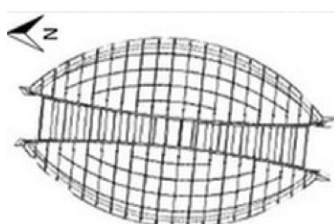


Fig. 48 : Davies Alpine House – Plan [Downe et al., 2015]

5.4.4 Fonctionnement

Cette serre imite le fonctionnement simple mais efficace des termitières qui permet d'autoréguler la température intérieure malgré les variations climatiques extérieures (WilkinsonEyre, 2015). La forme est idéale pour la création d'un effet cheminée. En effet, l'air entre par des ouvertures permanentes cachées dans la verdure de chaque côté de la construction et sort par des fenêtres en toiture. Un ventilateur envoie l'air à travers le labyrinthe en sous-sol pour le refroidir (Kew, 2015).

Ce labyrinthe, composé de parpaings standards de béton, offre un tunnel de 80m de long sous une double dalle de béton. Le sous-sol sert donc de réserve d'air frais. Cet air est maintenu à une température constante malgré les grandes chaleurs d'été. La nuit, lorsque les températures chutent, l'air extérieur est aspiré à faible vitesse à travers ces réseaux d'imbrication afin de ventiler la masse thermique. En journée, cet air est envoyé dans la serre à l'aide des ventilateurs (Russell, 2006).

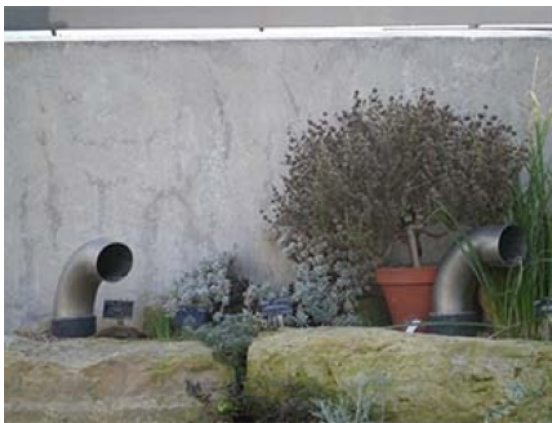


Fig. 49 : Entrées d'air intégrées dans la verdure
[Downe et al., 2015]



Fig. 50 : Labyrinthe en sous-sol réalisé en parpaings
[Russell, 2006]

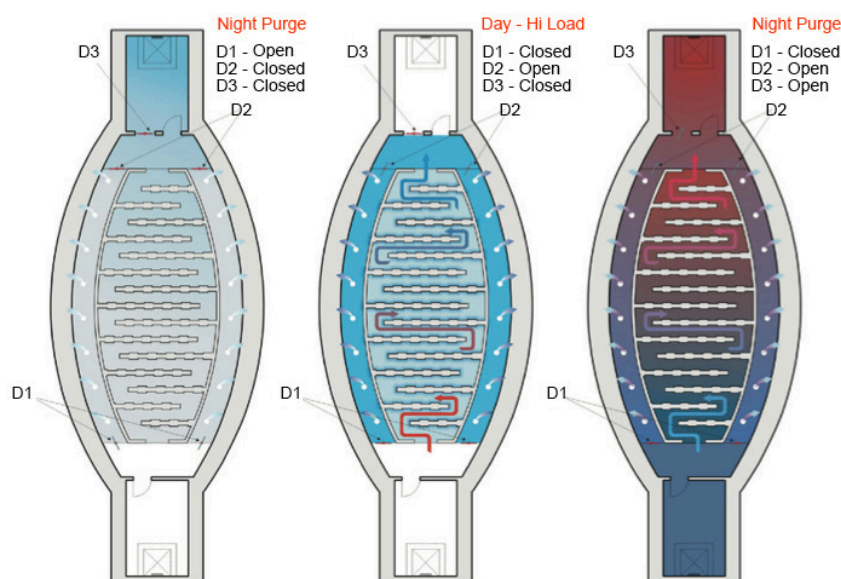
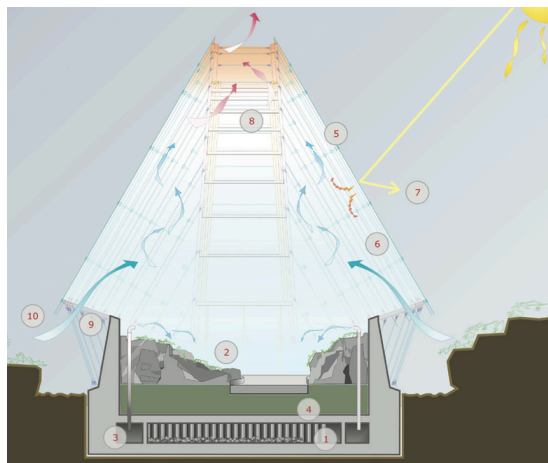


Fig. 51 : Flux thermiques dans le labyrinthe en sous-sol
[WilkinsonEyre, 2015]

Les plantes alpines ne supportent pas les rayons directs du soleil, c'est pourquoi un système d'ombrage sophistiqué a été mis en place. Les deux stores face à face se déplient tels une queue de paon pour protéger 70% de la surface vitrée. Ils fonctionnent de façon indépendante suivant l'orientation du soleil (Downe et al., 2015).



Fig. 52 : Protections solaires amovibles
[teddingtongardener.com]



1. Labyrinthe de béton permet la réduction de température en été
2. L'air produit au niveau du sol déplace de l'air chaud et crée des zones de fraîcheur
3. Chambre à air sous les rochers
4. Dalle de béton
5. Façade vitrée
6. Stores intérieurs automatiques, fermé la nuit pour éviter la perte de chaleur
7. Rayons du soleil réfléchis et absorbés par les stores
8. Ouvertures automatiques en toiture
9. Entrées d'air
10. Air frais entre au niveau de sol
11. Air chaud sort en hauteur

Fig. 53 : Coupe transversale dans le bâtiment
[WilkinsonEyre, 2015]

5.4.5 Résultats

Une enquête a été réalisée auprès des visiteurs du jardin botanique. Il en ressort que la ventilation est efficace et l'environnement est confortable. Manifestement le bâtiment est adéquat à la survie des plantes alpines. Par contre, le coût de maintenance est très élevé (Downe et al., 2015).

5.4.6 Récompenses

2008 : Civic Trust Award

2007 : Mies van der Rohe Prize

2006 : RIBA Award, IStructE Award et Design Week Award [Commendation / Museums & Galleries Category] (WilkinsonEyre, 2015).

5.5 Stratégies observées

L'analyse de quatre bâtiments de référence montre une grande diversité d'approches complémentaires qui permettent d'obtenir une ventilation intensive principalement naturelle et suffisamment efficace, ceci malgré des températures extérieures élevées.

Dans tous les cas, les principaux effets utilisés sont :

- l'effet 'cheminée' qui s'appuie sur les différences de température entre intérieur et extérieur pour créer un remplacement des masses d'air par convection ;
- l'effet d'inertie thermique qui permet de stocker l'énergie thermique dans la masse du bâtiment et créer un déphasage entre le cycle d'occupation du bâtiment et le cycle d'évolution de la température intérieure.

Ces effets, inspirés du fonctionnement des termitières, imposent à l'architecte de concevoir la forme du bâtiment de manière à favoriser le tirage thermique et optimiser le renouvellement d'air intérieur (hautes cheminées centrales, ouvertures automatiques des fenêtres ou de sas intérieurs...).

Le choix des matériaux et certaines techniques architecturales vont aussi favoriser le stockage thermique dans la masse du bâtiment :

- utiliser des matériaux denses, qui ont une chaleur massique élevée ;
- laisser ces matériaux nus, directement accessibles à l'air, afin de favoriser l'échange thermique et éviter les surchauffes à l'intérieur du bâtiment ;
- construire des plafonds en béton de forme ondulée pour augmenter la surface de contact entre l'air et la masse thermique ;
- prévoir des matériaux à changement de phase dans les parois comme alternative aux murs en béton lourd ;
- ...

L'architecte doit aussi se préoccuper des éléments qui évitent les apports de chaleur :

- choisir une orientation qui maximise les ouvertures au sud et au nord pour améliorer le confort thermique en été et réduire les pertes de chaleur en hiver ;
- optimiser les surfaces vitrées pour favoriser l'apport de lumière naturelle mais éviter les apports de chaleur (protections solaires adaptées à l'orientation, débords de toiture, stores fixes ou amovibles, etc.) ;
- opter pour une façade rugueuse et irrégulière ou pour de la végétation qui minimisera l'absorption de chaleur dans le bâtiment ;
- prévoir un espace où stocker l'air frais avant de le distribuer dans les locaux : labyrinthe en parpaings ou atrium aménagé de surfaces d'eau, par exemple ;
- ...

Enfin pour le bon fonctionnement du bâtiment, il faut agir aussi sur les comportements :

- fermer les fenêtres en journée si les températures extérieures sont chaudes ;
- profiter de la fraîcheur de la nuit pour refroidir les espaces internes ;
- automatiser les ouvertures et fermetures des portes et fenêtres (si l'on ne dispose pas de personnel affecté à ces tâches...) ;

- Limiter la capacité et la durée d'occupation des certains locaux à problèmes (cas des auditoriums par exemple) ;
- Eviter la modification des aménagements intérieurs lorsque l'efficacité de la ventilation en dépend ;
- ...

Chaque fois, il a fallu aussi adjoindre des systèmes techniques particuliers, pour minimiser les risques d'atteindre des températures trop élevées dans les locaux pendant les périodes d'occupation et pour tenir compte parfois de situations locales spécifiques. Idéalement, ces systèmes d'appoint devraient être aussi économes que possible en énergie :

- si la ventilation doit se faire en journée : maximiser les longueurs de déplacement d'air à travers la masse thermique, avant de pulser cet air dans le bâtiment pour réduire le plus possible sa température ;
- pour les climats où l'air est chaud et sec : prévoir des systèmes de ventilation par évaporation ;
- ...

PARTIE PRATIQUE

Dans cette partie, la cité administrative de Seraing (actuellement le plus grand bâtiment public passif en Wallonie) sera décrite sur le même schéma qui a servi dans la partie précédente à décrire quatre immeubles inspirés par le fonctionnement des termitières.

Cette partie a ensuite pour objet d'expliquer sur quelles hypothèses a été dimensionné le système de night cooling utilisé. Il s'agira aussi de (tenter de) vérifier comment le système est effectivement mis en œuvre depuis l'occupation du bâtiment en septembre 2014. Des entrevues ont permis également d'appréhender le ressenti des occupants.

Sur base de ces différents éléments, des pistes d'améliorations seront proposées en cherchant notamment à capitaliser sur les éléments rassemblés dans la première partie de ce travail.

Enfin dans une dernière section, ce type de ventilation naturelle intensive sera étudié sous l'angle de sa transposition dans un autre climat.

6. CAS DE LA CITE ADMINISTRATIVE DE SERAING



Fig. 54 : Cité administrative de Seraing en août 2014
[Photo prise par Pauline Lesage]

6.1 Fiche technique

- Architecte : Bureau d'architecture Philippe Greisch
- Bureau spécialisé en énergie : Néo&Ides
- Client : Ville de Seraing
- Lieu : Place Kuborn, Seraing, Belgique
- Date de construction : 2010 – 2012 (Concours)
- Type / Occupation : Public
- Superficie totale du bâtiment : 4 500 m²
- Stratégies de ventilation : ventilation intensive naturelle (night cooling par effet cheminée et effet du vent, inertie élevée et évaporation de l'eau) et ventilation mécanique double flux avec récupération de chaleur.

6.2 Situation

La cité administrative de Seraing a été conçue récemment avec la volonté d'atteindre des performances énergétiques très élevées et dans l'optique de créer un bâtiment à faible impact environnemental. Le bâtiment est occupé par 200 employés communaux et il est fréquenté par la population de façon journalière. Des études poussées ont été réalisées sur l'effet du vent pour la ventilation naturelle et sur les protections solaires automatisées. Il s'agit actuellement du plus grand bâtiment public passif en Wallonie (Belgique).

6.3 Composition du bâtiment

L'immeuble de six étages a une forme de « 8 » et est orienté est-ouest.

Au centre, un atrium de 15m^2 a été calculé pour favoriser la ventilation naturelle par l'effet cheminée. Cette forme obtenue par l'encastrement de deux cylindres, donne une très bonne compacité au bâtiment ($=4,1$), ce qui est une priorité pour les bâtiments passifs afin de réduire leur bilan énergétique. La façade principale, orientée plein sud, permet d'optimiser les apports solaires gratuits en hiver et elle est couverte de protections solaires motorisées (qui suivent l'orientation du soleil pour réduire au maximum les surchauffes) en été (Schüco, 2015).

L'énergie produite est principalement renouvelable : la cage d'ascenseur visible sur la façade sud est recouverte de panneaux photovoltaïques et la toiture accueille des panneaux solaires thermiques.

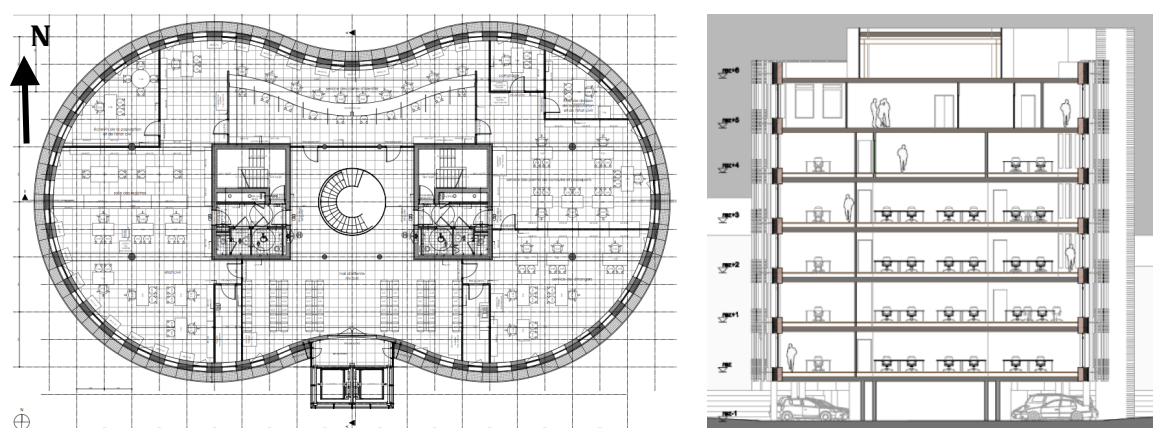


Fig. 55 : Plan type (gauche) et coupe transversale (droite) de la cité administrative
[Busch & Greisch, 2015]

L'inertie thermique du bâtiment est élevée grâce à ses matériaux de construction lourds et apparents à l'intérieur. Les dalles et façades sont en béton dont « la masse surfacique est supérieure à 400 kg/m^2 » (Busch & Greisch, 2015). L'immeuble est isolé par l'extérieur et recouvert d'un parement métallique. L'isolation est élevée (30 cm dans les murs, 35 cm en toiture et 20 cm pour les sols) et l'étanchéité à l'air est très performante ($0,2\text{ vol/h}$ à n_{50}).

Le bâtiment ne possède pas de système d'air conditionné. La ventilation hygiénique est assurée par une ventilation mécanique double flux avec récupération de chaleur. Un chauffage d'appoint complémentaire a été installé et est alimenté par une pompe à chaleur (Schüco, 2015).

6.4 Fonctionnement

La stratégie de refroidissement du bâtiment est la suivante :

- Le night cooling consiste en l'ouverture automatique des fenêtres pour permettre l'amenée d'air frais grâce à la pression du vent et l'effet de tirage. Les trois types de ventilation intensive ont été étudiés en fonction des espaces : les bureaux paysagers sont approvisionnés en air frais par l'effet 'cheminée' aux étages inférieurs et par la ventilation transversale aux étages supérieurs. Les plus petits bureaux cloisonnés sont refroidis par la ventilation unilatérale. Ainsi, l'air frais doit refroidir la masse thermique pour atteindre une température intérieure de 18°C à la première heure du jour.
- En journée, les apports solaires sont limités par les stores performants. L'isolation par l'extérieur permet de garder l'air frais dans le bâtiment et le protéger contre les vents chauds. Un refroidissement complémentaire peut être amené par la pompe à chaleur via la ventilation mécanique. Par grande chaleur, lorsque la ventilation naturelle intensive ne permet pas de refroidir le bâtiment, on peut avoir recours au refroidissement adiabatique qui utilise l'énergie d'évaporation de l'eau pour diminuer la température de l'air pulsé dans les locaux. Cette réserve d'eau est d'origine pluviale et est stockée dans un puits existant (Busch & Greisch, 2015).

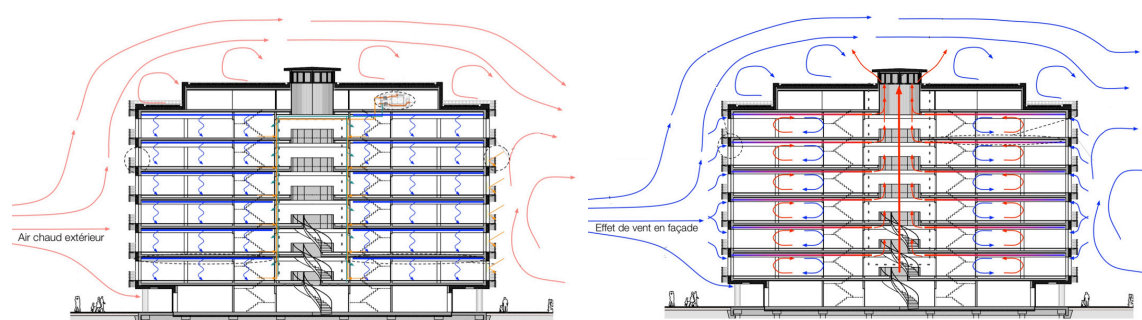


Fig. 56 : Stratégie de froid de jour (gauche) et stratégie de froid de nuit (droite)
[Busch & Greisch, 2015]

La hauteur de la cheminée ainsi que la superficie idéale d'ouverture à chaque étage ont été déterminées sur base de calculs précis et à l'aide de logiciels afin d'avoir un refroidissement naturel efficace ; c'est l'objet des sections suivantes.

La dimension des fenêtres est égale sur tout le pourtour du bâtiment. Les fenêtres sont en triple vitrage à haute performance et les châssis sont en aluminium. Le coefficient thermique du châssis (U_f) est égal à 1,3 W/m²K et le coefficient de conductibilité thermique (g) varie avec les saisons et la position du soleil. Environ une fenêtre sur deux est motorisée et dirigée par la gestion technique centralisée. Ainsi, elle peut s'ouvrir automatiquement entre 22h et 6h du matin pour ventiler le bâtiment grâce à l'air frais

de la nuit ou en journée lorsque la température interne est trop élevée et supérieure à la température externe. Chaque fenêtre est protégée du soleil par un store mobile automatisé dont la forme spécialement étudiée permet l'apport de lumière naturelle (30%) en journée et empêche l'intrusion d'oiseaux pendant la nuit (Schüco, 2015).

Certaines coursives sont munies d'un pare-soleil fixe efficace en été pour limiter les apports de chaleur lorsque le soleil est haut, sans gêner l'apport de lumière naturelle. Par contre, en hiver, le rayonnement solaire atteint sans problème l'intérieur des pièces.

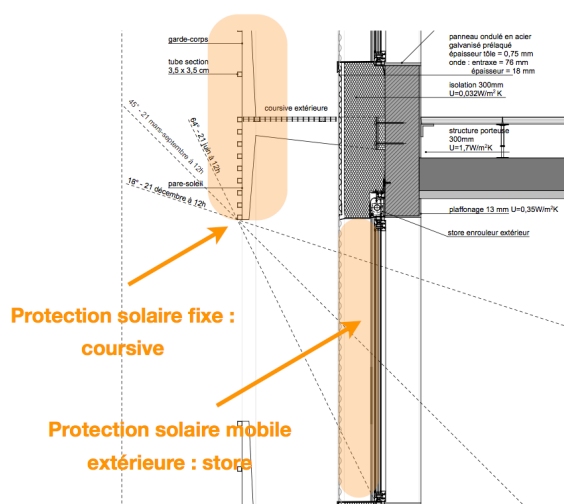


Fig. 57 : Détail des protections solaires, fixes et amovibles
[Neo Construct & Ides Engineering, 2009]

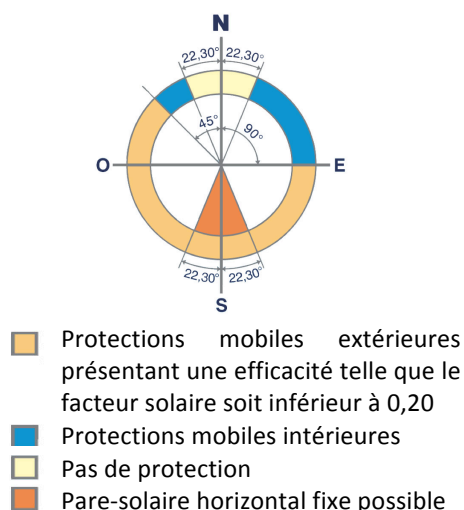


Fig. 58 : Etude des protections solaires
[Architecture et climat, 2015]

6.5 Résultats

Les faibles besoins de chaud et de froid sont respectivement de 11 et 10 kWh/m².an. Quant aux besoins en énergie primaire, ils sont de 80 kWh/m².an.

Comparé à un immeuble de bureaux administratif classique (K45), les systèmes mis en œuvre dans la nouvelle cité administrative (K18) doivent permettre une réduction de la consommation totale annuelle de 60%, soit une épargne de 40 000€ et 148 tonnes de CO₂ par an.

Par rapport aux anciens bâtiments que la nouvelle construction remplace, l'économie est de 85% des consommations énergétiques et représente un gain de 100 000€ et une économie de 475 tonnes d'émission de CO₂ par an (Neo Construct & Ides Engineering, 2009).

7. DIMENSIONNEMENT DU NIGHT COOLING

Les formules et calculs développés ci-dessous sont ceux utilisés par les concepteurs de la cité administrative de Seraing, pour dimensionner le système de ventilation selon les caractéristiques particulières du bâtiment.

7.1 Logiciels utilisés

Les logiciels suivants ont été utilisés :

- Les coefficients de pression (C_p) de l'air sur chaque façade ont été calculés à l'aide du logiciel *TNO* ;
- Une méthode simplifiée de dimensionnement du night cooling est réalisée sur Excel pour assurer que sa mise en œuvre sera possible. Les calculs prennent en compte l'effet du vent et l'effet de tirage selon une méthode qui sera expliquée ci-après ;
- Le logiciel PHPP 2007 permet de vérifier les besoins de chauffage et de refroidissement nécessaires pour atteindre le standard passif ($15 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{an}$), sur base de simulations statiques. Ce calcul est basé sur diverses hypothèses concernant les apports internes, selon l'isolation du bâtiment, son inertie, les surfaces vitrées, les protections solaires, etc. ;
- LoopDA est un solveur de maille qui permet de quantifier les flux et débits d'air sous l'effet complémentaire du tirage thermique et du vent, pour chaque zone définie du bâtiment ;
- TRNSYS permet la simulation dynamique de l'effet thermique lié à la ventilation naturelle afin de déterminer, pour chaque zone définie, l'évolution des températures ou le profil des consommations énergétiques.

Seul le calcul simplifié réalisé sur Excel sera détaillé dans la suite. Il permet de comprendre l'impact des principaux facteurs propres au bâtiment (forme et structure, localisation, orientation...).

Une simulation réalisée sur TRNSYS sera également commentée brièvement.

7.2 Hypothèses de travail

Les hypothèses et données qui ont servi de base aux calculs de dimensionnement portent sur le climat du site de Seraing, les dimensions du bâtiment et des paramètres propres à la ventilation dont la valeur sera expliquée plus loin.

- les données climatiques utilisées pour les différentes simulations sont celles de la station météorologique de Saint Hubert ;
- la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur (ΔT) est de 6°C , soit une température moyenne extérieure de 17°C la nuit et une température moyenne intérieure de 23°C ;
- les vents dominants proviennent de l'ouest (260°) ;

- à 10 mètres de haut, la vitesse moyenne du vent sans obstacle est supposée égale à 3,45m/s ;
- la hauteur du bâtiment est de 26m (hauteur de la cheminée) ;
- le renouvellement d'air souhaité est de 7vol/h pour la ventilation intensive de nuit ; cet objectif est déterminé par l'expérience des concepteurs et permet, selon eux, d'atteindre une efficacité suffisante ;
- en traversant le bâtiment lors de la ventilation par tirage thermique, le flux d'air passe par trois ouvertures successives (entrée, transfert, sortie) pour lesquelles on considère des pertes de charges équivalentes. Le coefficient de déperdition (Cd) dépend de la forme des ouvertures : pour des formes simples et rebords tranchants, il est en général fixé entre 0,6 et 0,65 dans la littérature (Zarnovican, 2007). La valeur de 0,6 a été retenue pour le bâtiment de Seraing.

Pour commencer, l'ensemble du bâtiment a été réparti en différentes zones séparées par des parois : bureaux paysagers, bureaux individuels, salles de réunion, cafétéria, etc.

- Les grands bureaux paysagers, dont la superficie varie entre 80 et 250m², bénéficient d'ouvertures sur plusieurs façades. La ventilation naturelle intensive de ceux-ci se fait par tirage thermique aux étages inférieurs (R+1 à R+3) et par ventilation transversale pour les trois derniers niveaux (R+4 à R+6). Des portes de transfert automatisées entre ces bureaux et l'atrium s'ouvrent pendant la nuit pour permettre l'évacuation de l'air.
- Pour les plus petits espaces cloisonnés, dont la superficie varie entre 15 et 60m², la ventilation est unilatérale de telle sorte que l'entrée et la sortie de l'air se fait par la même fenêtre. La cité administrative est munie de fenêtres identiques appelées « à la française », c'est à dire que l'ouverture se fait sur toute la hauteur selon un axe vertical.

Il est important de noter que le rez-de-chaussée n'a pas été pris en compte dans le calcul du dimensionnement : il présente très peu de risque de surchauffe et il n'a donc pas besoin d'un renouvellement d'air important. La ventilation hygiénique y est en principe suffisante.

Il faut aussi spécifier le milieu dans lequel se trouve le bâtiment, pour avoir une idée de la quantité d'obstacles présents aux alentours.

Les formules servant à calculer la vitesse moyenne du vent prennent en compte deux facteurs qui ont été déterminés expérimentalement. Ces facteurs permettent de dimensionner adéquatement les ouvertures nécessaires au bon fonctionnement d'une ventilation naturelle. Le tableau ci-dessous donne la valeur de ces facteurs en fonction de différents types de terrain (Zarnovican, 2007).

Classe de terrain	γ	α	Description
I	0,10	1,30	Océan ou point d'eau avec périmètre minimum de 5 km sans obstacle.
II	0,15	1,00	Terrain plat avec quelques obstacles isolés (e.g. bâtiments ou arbres bien distancés les uns des autres).
III	0,20	0,85	Régions rurales avec petits bâtiments, arbres, etc.
IV	0,25	0,67	Région urbaine, industries ou forêts.
V	0,35	0,47	Centre d'une grande ville (e.g. Manhattan).

Tabl. 1 : Paramètres de α et γ selon le type de terrain
[Sherman et Grimsrud, 1980 cité par Zarnovican, 2007]

La cité administrative de Seraing se situe en région urbaine, zone intermédiaire entre la grande ville et la campagne, c'est à dire en classe IV. Comme indiqué sur le tableau, les valeurs à prendre en compte sont respectivement $\alpha = 0,67$ et $\gamma = 0,25$.

7.3 Calcul du tirage thermique

La ventilation intensive naturelle par effet de tirage thermique est possible grâce aux différences de température entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment : celles-ci provoquent une différence de densité entre les masses d'air et elles engendrent ainsi leur mise en mouvement. Si la température extérieure est plus faible qu'à l'intérieur, l'air entre dans l'immeuble par le bas et il peut être évacué par les ouvertures en toiture. C'est ce qu'on appelle l'effet 'cheminée'.

Pour dimensionner les surfaces d'ouverture indispensables à une ventilation naturelle intensive en fonction de l'effet cheminée, il faut étudier la température de nuit de la région en été, ainsi que les hauteurs des ouvertures et celle de la cheminée. En effet, l'efficacité du tirage thermique varie proportionnellement avec **les différences de température entre l'intérieur et l'extérieur** et avec **l'écart entre les ouvertures**.

De premiers calculs ont permis de déterminer la surface maximale des ouvertures en toiture pour permettre d'absorber, par la cheminée, le débit d'air correspondant au renouvellement souhaité de 7vol/h. Le développement est le suivant.

	Z [m]	U [m/s]	U _{trnsys} [m/s]	DT [°C]	DH [m]	DP _{global} [Pa]	DP _{entrée} [Pa]	$Q = Cd \cdot S \cdot (2 \cdot \Delta P / \rho)^{1/2}$ [m³/h]	Volume [m³]	Débit souhaité 7vol/h	Surface souhaitée [m²]
Rez	2	1,55		6	24	5,76	1,92	3858	638	0	0,00
Rez+1	5,2	1,96		6	20,8	4,992	1,664	3591	1540	10782	3,00
Rez+2	8,4	2,21		6	17,6	4,224	1,408	3303	1405	9834	2,98
	10	2,31	3,45	6	16	3,84	1,28	3150			
Rez+3	11,6	2,40		6	14,4	3,456	1,152	2988	1465	10258	3,43
Rez+4	14,8	2,55		6	11,2	2,688	0,896	2635	1447	10127	3,84
Rez+5	17,7	2,67		6	8,3	1,992	0,664	2269	1447	10129	4,46
Rez+6	20,9	2,78		6	5,1	1,224	0,408	1778	959	6714	3,78
Rez+7	24,1	2,88		6	1,9	0,456	0,152	1085	0	0	0,00
Cheminée	26	2,94		6	0	0	0	0	0	0	21,50

Tabl. 2 : Calculs des débits et des surfaces d'ouverture en toiture en fonction du tirage thermique
[Busch, 2011]

- 'Z' [m] représente la hauteur des ouvertures depuis le niveau du sol.

- 'U' [m/s] représente la vitesse moyenne du vent, à chaque étage, calculée par rapport à une vitesse de référence du vent ($U_{trnsys} = 3,45\text{m/s}$) prise à une hauteur de 10 mètres et en fonction des caractéristiques du terrain mais sans considérer la présence des bâtiments voisins.

$$U = U_{trnsys} * \alpha * \left(\frac{Z_{étage}}{Z_{réf}} \right)^{\gamma} = 3,45 * 0,67 * \left(\frac{Z_{étage}}{10} \right)^{0,25}$$

- 'DT' [°C] est la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur :

$$DT = T_{int} - T_{ext} = 23^{\circ}\text{C} - 17^{\circ}\text{C} = 6^{\circ}\text{C}$$

- 'DH' [m] correspond à la différence de hauteur entre la cheminée et l'ouverture :

$$DH = Z_{cheminée} - Z_{étage} = 26 - Z_{étage}$$

- 'DP_{global}' [Pa] représente la différence de pression totale entre l'entrée et la sortie du bâtiment. Elle tient compte des pertes à travers les parois d'entrée, de transfert et de sortie :

$$DP_{global} = 0,04 * DT * DH$$

où 0,04 [Pa/m².°C] est utilisé pour calculer le tirage thermique de façon simplifiée. En effet, la formule de base est la suivante (André, 2010) :

$$P_s = -\rho_{air} * g * 273 * DH * \left[\frac{1}{273 + T_e} - \frac{1}{273 + T_i} \right] = -0,04 * DH * DT$$

où $\rho_{air} = 1,2\text{kg/m}^3$ est la masse volumique de l'air à 273K

$g = 9,81\text{m/s}^2$ est l'accélération gravitationnelle

T_e et T_i sont respectivement les températures extérieure et intérieure, en °C

D'après Krishan (2001), cette valeur, qui est plus précisément de 0,042, correspond à la différence de pression définie par une différence de hauteur d'un mètre entre deux zones et pour un écart de 1°C entre l'intérieur et l'extérieur du bâtiment.

- 'DP_{entrée}' [Pa] correspond à la perte de charge au passage à travers une seule ouverture. Elle correspond à la déperdition globale divisée en trois en raison des trois transferts supposés identiques, comme décrit dans les hypothèses :

$$DP_{entrée} = \frac{DP_{global}}{3}$$

- 'Q' [m³/h] est le débit d'air pouvant être amené dans le bâtiment, à travers une ouverture d'1m², grâce aux différences de pression.

$$Q = Cd * S * \sqrt{\frac{2 * \Delta p}{\rho_{air}}} * 3600 = 0,6 * 1 * \sqrt{\frac{2 * DP_{entrée}}{1,204}} * 3600$$

où C_d est le coefficient de déperdition de 0,6

S est la surface d'ouverture, en m^2

Δp est la perte de pression au passage d'une ouverture, en Pa

ρ est la masse volumique de l'air

- Le volume [m^3] de chaque pièce correspond à la surface multipliée par une hauteur sous plafond de 2,8m.

- Le débit souhaité [m^3/s] est le débit d'air à apporter pour avoir un renouvellement d'air de 7vol/h à chaque étage. Il est calculé en multipliant le volume par 7. Cette valeur est nulle au rez-de-chaussée car le renouvellement d'air n'a pas lieu à cet étage.

- La surface souhaitée [m^2] est la surface d'ouverture totale à prévoir pour la zone étudiée. Elle correspond au débit nécessaire pour atteindre le renouvellement d'air souhaité, divisé par le débit d'air Q . La valeur en couleur dans le tableau 2 est égale à la somme des surfaces souhaitées et correspond à la surface maximale d'ouverture à prévoir en toiture pour équilibrer les entrées et sorties d'air et éviter ainsi de mettre le bâtiment en pression ou en dépression.

Il est possible de jouer sur cette valeur pour modifier le cheminement de l'air. En effet, si l'on réduit l'ouverture en toiture, pour un débit d'air donné, le bâtiment sera mis en surpression et la quantité d'air qui ne pourra pas sortir par la toiture trouvera un autre cheminement de sortie et pourra ainsi ventiler le dernier étage transversalement.

7.4 Calcul des effets du vent

Pour considérer l'effet du vent sur un immeuble, il faut étudier les coefficients de pression (C_p) sur les façades du bâtiment, ainsi que la vitesse du vent en fonction du site environnant (U). Ces deux critères jouent un rôle sur la ventilation naturelle transversale. En effet, elle varie proportionnellement à la **différence des coefficients de pression** et à la **vitesse du vent au carré**.

Le coefficient de pression (C_p) est un paramètre qui est déterminé de façon empirique. En fonction de sa direction, le vent rencontre la façade selon un certain angle par rapport à la normale du mur. La pression théorique sur la façade s'en trouve réduite par la valeur du coefficient de pression (Zarnovican, 2007). Outre l'importance de l'angle formé avec la façade, la valeur de ce coefficient dépend de la forme du bâtiment et, comme on l'a vu au tableau 1, de l'influence des obstacles environnants (bâtiments voisins, végétation, relief du terrain...).

Les ingénieurs ont simulé les effets du vent sur le bâtiment de Seraing à l'aide du logiciel *TNO*.

Ils ont déterminé des coefficients de pression, pour chaque étage, pour chaque façade, ainsi qu'en toiture et selon toutes les orientations. Leurs emplacements sur le bâtiment sont repris sur l'image ci-dessous.

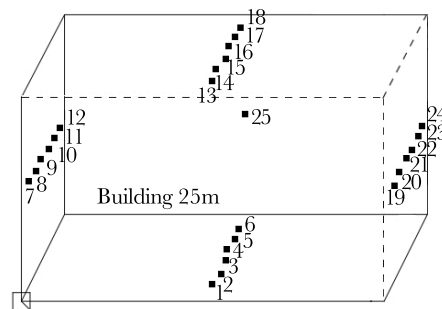


Fig. 59 : Emplacement des coefficients de pression sur le bâtiment
[Neo Construct & Ides Engineering, 2009]

Le logiciel calcule, pour chaque position identifiée sur le bâtiment, les valeurs de pressions en un point selon les directions du vent et autour du bâtiment pour une direction donnée du vent. La figure 60 donne la représentation graphique de ces valeurs pour le point 21 (façade Est au troisième étage).

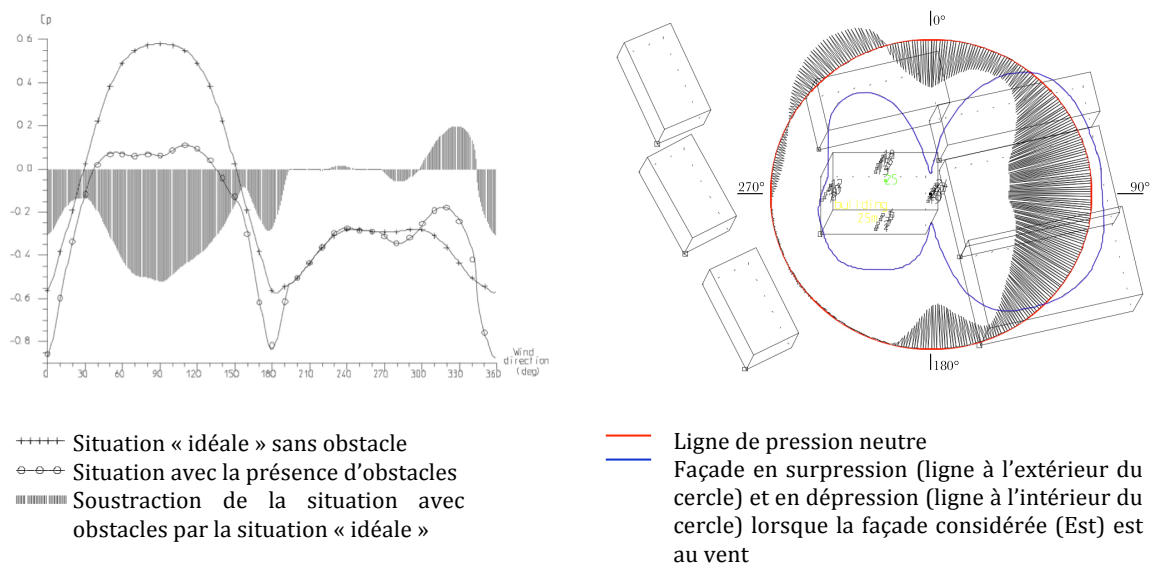


Fig. 60 : Cp 21 (Façade Est – R+3) – Diagrammes réalisés par le logiciel TNO
[Neo Construct & Ides Engineering, 2009]

- Le graphique de gauche exprime la valeur des C_p en ce point précis du bâtiment, selon la direction du vent et dans 2 situations : avec ou sans la prise en compte des volumes qui pourraient gêner le passage du vent.
- Le graphique de droite reprend les C_p selon les deux situations, en fonction de la direction du vent. Il indique également les façades en surpression ou dépression lorsque la façade considérée est au vent.

La différence entre les situations théoriques et réelles montre bien l'impact des bâtiments voisins et des autres éléments implantés sur la trajectoire du vent.

Pour la suite du développement, seuls les vents provenant du sud-ouest (260°) sont pris en compte, ainsi que les valeurs obtenues dans la situation la plus réaliste avec la présence d'obstacles. Les coefficients de pression correspondant à cette orientation sont donc rassemblés ci-dessous.

	Facade Sud	Facade Est	Facade Nord	Facade Ouest	Toiture
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
Rez	-0,229	-0,284	-0,429	0,394	-0,444
Rez+1	-0,229	-0,284	-0,429	0,394	-0,444
Rez+2	-0,234	-0,287	-0,438	0,427	-0,444
Rez+3	-0,237	-0,288	-0,445	0,454	-0,444
Rez+4	-0,239	-0,289	-0,449	0,47	-0,444
Rez+5	-0,24	-0,289	-0,449	0,496	-0,444
Rez+6	-0,238	-0,289	-0,444	0,516	-0,444
Rez+7					
Cheminée					-0,444

Tabl. 3 : Coefficients de pression sur chaque façade pour une orientation de 260°
[Busch, 2011]

On peut observer dans ce tableau, que les CP4, c'est-à-dire les coefficients de la façade au vent, sont tous positifs et sont les plus élevés aux étages supérieurs. Par contre, les coefficients de pression des trois autres façades sont négatifs : les plus petites valeurs correspondent aux étages supérieurs de la façade nord tandis qu'à l'est et au sud, les valeurs sont quasi identiques.

Etant donné que l'efficacité de la ventilation transversale augmente avec la différence des coefficients entre deux façades, on peut supposer qu'elle sera optimale aux deux derniers étages pour un vent entrant par les ouvertures de la façade ouest et sortant par le nord. Ceci est d'autant plus intéressant à noter qu'à cette hauteur, le tirage est moins efficace en raison de la faible différence de hauteur avec la cheminée.

Les différences de pression correspondant au passage à travers une paroi ont été calculées pour les différentes possibilités de ventilation transversale, sachant que le vent entre par la façade ouest (CP4). Ces valeurs sont reprises en fonction des étages, dans les trois premières colonnes du tableau 4 ci-dessous. Les quatre dernières colonnes correspondent à l'effet du tirage lorsque le vent entre par la façade nord, sud ou bien est et que l'air est évacué par la cheminée.

	Dpglobal (CP4-CP1)	Dpglobal (CP4-CP3)	Dpglobal (CP4-CP2)		Dpglobal (CP4-CP5)	Dpglobal (CP3-CP5)	Dpglobal (CP2-CP5)	Dpglobal (CP1-CP5)
Rez	0,89	1,18	0,97	Rez	1,20	0,02	0,23	0,31
Rez+1	1,44	1,90	1,57	Rez+1	1,94	0,03	0,37	0,50
Rez+2	1,94	2,54	2,10	Rez+2	2,56	0,02	0,46	0,62
Rez+3	2,39	3,10	2,56	Rez+3	3,10	0,00	0,54	0,71
Rez+4	2,77	3,58	2,96	Rez+4	3,56	-0,02	0,60	0,80
Rez+5	3,14	4,03	3,35	Rez+5	4,01	-0,02	0,66	0,87
Rez+6	3,49	4,45	3,73	Rez+6	4,45	0,00	0,72	0,95
Rez+7				Rez+7				
Cheminée				Cheminée				

Tabl. 4 : Pertes de charges calculées pour la ventilation transversale (gauche) et pour la ventilation par effet cheminée (droite)
[Busch, 2011]

Les valeurs en couleur confirment bien que la ventilation transversale est la plus efficace aux étages supérieurs pour les vents entrant par la façade 4 (ouest) et sortant par la façade 3 (nord). Par contre, le tableau de droite montre également que la différence de pression entre deux zones en dépression ($Cp1/Cp2/Cp3$ vers $Cp5$) est trop faible pour assurer une bonne ventilation transversale. Il faudra donc y ajouter l'effet 'cheminée' (calculé précédemment) pour tirer l'air à travers le local.

La pression du vent exprimée en Pa correspond à (André, 2010) :

$$P_w = \frac{C_p * \rho_{air} * U^2}{2}$$

Sur base de cette formule, on peut calculer les différences de pression entre deux zones, façade ou toiture, à l'aide des Cp repris au tableau 3. La figure 61 montre la division en différentes zones pour un étage type.

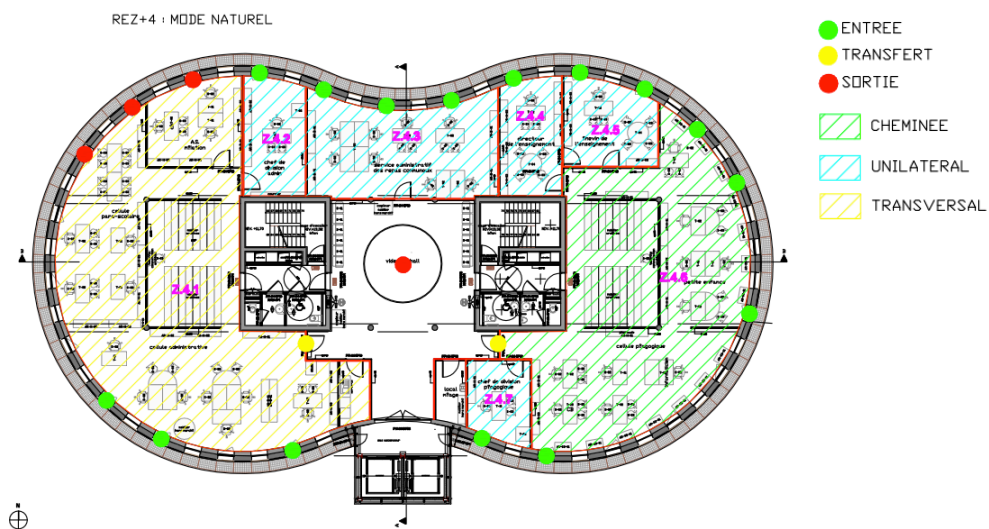


Fig. 61 : Cité administrative – Etage type
[Neo Construct & Ides Engineering, 2009]

- Entrée et sortie par une façade différente : ventilation transversale.

$$Dp_{global} (Cp4 - CpX) = \frac{\Delta Cp_{(4,X)} * 1,2 * U^2}{2}$$

Seules les valeurs en couleur du tableau 4 seront utilisées pour le dimensionnement : elles correspondent aux zones de bureaux des trois étages supérieurs, là où le vent entre par l'ouest et sort par le nord après avoir refroidi l'espace.

- Entrée en façade et sortie par la toiture : ventilation par effet 'cheminée'.

$$Dp_{global} (CpX - Cp5) = \frac{\Delta Cp_{(X,5)} * \rho_{air} * U^2}{2}$$

Ces valeurs seront ensuite combinées aux différences de pression calculées pour le tirage thermique (tableau 2). Elles seront utilisées par la suite pour les zones définies de « cheminée »

$$DP_{global\ de\ X} = 0,04 * \Delta T * \Delta H + Dp_{global} (C_{pX} - C_{p5})$$

	DT	DH	DP global de 4	DP global de 3	DP global de 2	DP global de 1	DP entrée
Rez	6	24	6,96	5,78	5,99	6,07	2,32
Rez+1	6	20,8	6,93	5,03	5,36	5,49	2,31
Rez+2	6	17,6	6,78	4,24	4,69	4,84	2,26
Rez+3	6	14,4	6,56	3,45	3,99	4,17	2,19
Rez+4	6	11,2	6,25	2,67	3,29	3,49	2,08
Rez+5	6	8,3	6,00	1,97	2,65	2,86	2,00
Rez+6	6	5,1	5,67	1,22	1,94	2,18	1,89
Rez+7	6	1,9	0,46				
Cheminée							

Tabl. 5 : Pertes de charges selon l'effet combiné du vent et du tirage thermique [Busch, 2011]

La méthode pour obtenir les valeurs des débits d'air et des surfaces d'ouverture souhaitées a déjà été développée précédemment. Ces valeurs sont reprises dans le tableau 6 ci-dessous :

	$Q = C_d \times S \times (2 \times \Delta P / \rho)^{1/2}$	Volume	Débit souhaité 7vol/h	Surface souhaitée m²
Rez	4241	638	0	0,00
Rez+1	4231	1540	10782	2,55
Rez+2	4186	1405	9834	2,35
Rez+3	4116	1465	10258	2,49
Rez+4	4019	1447	10127	2,52
Rez+5	3937	1447	10129	2,57
Rez+6	3828	959	6714	1,75
Rez+7		0		
Cheminée				14,24

Tabl. 6 : Calculs des débits et des surfaces d'ouverture en toiture en fonction du vent [Busch, 2011]

- Entrée et sortie par une même façade : ventilation unilatérale.

Pour être complet, il faut traiter aussi le cas des locaux de petite superficie où la ventilation est unilatérale. Le tableau 7 donne l'exemple du 2^{ème} étage.

Zone	S [m²]	Type de ventilation	Z[m]	U [m/s]	DT	DH	DP global	DP entrée	Q [m³/s]	V [m³]	Débit souhaité 7vol/h	Surface souhaitée m²
ZV2.2	15	unilatérale	8,4	2,21	6	2	0,501	0,25	268	43	6,22	0,39
ZV2.3	18	unilatérale	8,4	2,21	6	2	0,50	0,25	310	50	6,22	0,44
ZV2.5	18	unilatérale	8,4	2,21	6	2	0,501	0,25	315	51	6,22	0,45
ZV2.6	16	unilatérale	8,4	2,21	6	2	0,501	0,25	272	44	6,22	0,39
ZV2.7	15	unilatérale	8,4	2,21	6	2	0,483	0,24	257	42	6,11	0,38

4,26

Tabl. 7 : Calculs de la ventilation unilatérale du 2^{ème} étage [Busch, 2011]

Le nombre de fenêtres nécessaire à une ventilation naturelle intensive de nuit se calcule sur les mêmes bases que pour les autres zones, mais la hauteur de la cheminée n'intervient pas dans le calcul et seule la hauteur de la fenêtre est prise en compte.

Il faut davantage d'ouverture par m² de surface au sol dans ce type de zone, parce que les effets 'pression' et 'cheminée' n'y jouent pas et seule la différence de température provoque un déplacement d'air par convection. En pratique, les concepteurs ont imposé un ratio d'ouverture (entrée + sortie) correspondant à 5% de la surface au sol.

7.5 Calcul du nombre de fenêtres

Le nombre de fenêtres dépend de la surface d'ouverture réelle par laquelle le vent peut s'infiltrer à l'intérieur du bâtiment. Pour une fenêtre oscillante, la surface se calcule en fonction des dimensions et de l'angle d'ouverture comme suit.

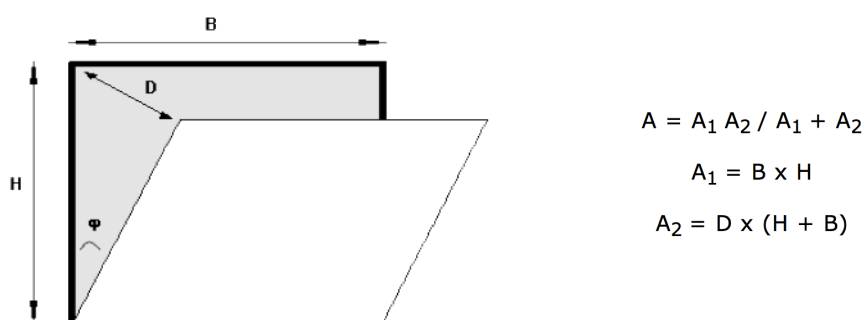


Fig. 62 : Formules pour calculer la surface d'ouverture « A » d'un châssis oscillant – Valeurs théoriques [Energie+]

A Seraing, l'ouverture se fait sur l'axe vertical comme l'indique la photo ci-dessous. Une chaîne de 30 cm, intégrée totalement dans le châssis permet l'ouverture automatique de la fenêtre avec un angle maximal de 18° :



Fig. 63 : Fenêtres de la cité administrative [Photo prise par Pauline Lesage]

Fenêtres types

B	2,085	m
D	0,3	m
H	0,9	m
φ	18	°
Grilles surface libre	60	%
A ₁	1,88	m ²
A ₂	0,90	m ²
A	0,36	m²

Fig. 64 : Surface d'ouverture – Valeurs appliquées à la cité administrative [Busch, 2011]

Pour déterminer le nombre de fenêtres qu'il faudra ouvrir pendant la nuit, il suffit donc de diviser la « surface souhaitée » (en m²) obtenue pour chaque zone par la surface d'ouverture « A » qui est égale à 0,36m².

Sur base de ces informations, plusieurs pré-dimensionnements ont été effectués pour évaluer le nombre de fenêtres nécessaires à chaque étage. Deux calculs sont présentés ci-après :

- le premier cas prend en compte une ventilation transversale aux trois derniers étages, ce qui est repris au tableau 9 ;
- l'autre cas tient compte d'une hypothèse plus prudente où le vent est trop faible pour assurer le refroidissement passif. Dans ce second dimensionnement, les zones de type 'transversale' des R+4 et R+5 sont remplacées par des zones de type 'cheminée'. Une valeur peut ainsi être calculée pour estimer le débit d'air à prévoir pour des extracteurs ; ceci est repris au tableau 10.

La différence entre les deux tableaux se trouve donc au niveau des étages 4 et 5, où la ventilation de type « transversal » (tableau 9) devient « cheminée » (tableau 10) lorsque le vent est trop faible et que les ventilateurs se mettent en route.

Les résultats synthétiques de ces calculs statiques sont repris ci-dessous.

	CAS 1 Vents favorables Extraction naturelle	CAS 2 Vents trop faibles Extracteurs activés
SORTIE DE LA CHEMINEE		
Surface min [m ²]	10,15	12,42
Surface max [m ²]	21,50	21,50
Débit d'air [m ³ /h]	33 520	42 523
VENTILATION TRANSVERSALE ET UNILATERALE		
Débit d'air [m ³ /h]	19 596	11 917
TOTAL		
Débit d'air [m ³ /h]	53 116	54 440
Volume int [m ³]	11 324	11 324

Tabl. 8 : Résultats du pré-dimensionnement du night cooling

Le pré-dimensionnement du night cooling avec ventilation mécanique (Cas 2) détermine donc la surface minimale d'ouverture à prévoir en toiture, puisqu'il faut accepter dans ce cas le débit d'air plus important provenant des deux zones supplémentaires (R+4 et R+5) où la ventilation naturelle transversale n'est pas possible.

En pratique, on choisira une surface d'ouverture plus grande permettant d'accepter des tirages plus importants si nécessaire.

Les calculs repris aux tableaux 9 et 10 permettent donc de fixer des balises qui sont suffisantes pour l'architecte. Mais pour atteindre effectivement les objectifs liés au confort thermique, c'est la programmation fine des systèmes de commande qui sera déterminante. On le verra par la suite, dans l'analyse du fonctionnement du bâtiment depuis sa première occupation en septembre 2014.

Zone	Surface	Type ventilation	Z[m]	U [m/s]	U _{miss} [m/s]	DT	DH	DP global	DP entrée	Q [m³/s]	Volume	Débit souhaité 7vol/h	Surface soustraite m²	Nbr fenêtres entrées	Nbr fenêtres sorties
REZ+1	ZV1.1	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	6,93	2,31	4231	378	2644,87	0,63	1,7	
	ZV1.2	unilatérale	5,2	1,96	1,96	6	2	0,404	0,20	394	71	5,58	0,63	1,7	
	ZV1.3	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	5,03	1,68	3604	422	2952,74	0,82	2,3	
	ZV1.4	unilatérale	5,2	1,96	1,96	6	2	0,501	0,25	255	41	6,22	0,37	1,0	
	ZV1.5	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	5,362	1,79	3722	407	2852,14	0,77	2,1	
	ZV1.6	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	5,489	1,83	3766	222	1551,14	0,41	1,1	
1540													3,62		
REZ+2	ZV2.1	cheminée	8,4	2,21	2,21	6	17,6	6,78	2,26	4186	514	3590,34	0,86	2,4	
	ZV2.2	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,501	0,25	268	43	6,22	0,39	1,1	
	ZV2.3	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,50	0,25	310	50	6,22	0,44	1,2	
	ZV2.4	cheminée	8,4	2,21	2,21	6	17,6	4,242	1,41	3310	222	1555,90	0,47	1,3	
	ZV2.5	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,501	0,25	315	51	6,22	0,45	1,2	
	ZV2.6	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,501	0,25	272	44	6,22	0,39	1,1	
	ZV2.7	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,483	0,24	257	42	6,11	0,38	1,0	
	ZV2.8	cheminée	8,4	2,21	2,21	6	17,6	4,685	1,56	3479	439	3073,04	0,88	2,4	
1405													4,26		
REZ+3	ZV3.1	cheminée	11,6	2,40	2,40	6	14,4	6,56	2,19	4116	619	4334,30	1,05	2,9	
	ZV3.2	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,494	0,25	367	59	6,18	0,53	1,5	
	ZV3.3	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,494	0,25	479	78	6,18	0,69	1,9	
	ZV3.4	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,494	0,25	342	55	6,18	0,49	1,4	
	ZV3.5	cheminée	11,6	2,40	2,40	6	14,4	3,995	1,33	3212	613	4288,68	1,34	3,7	
	ZV3.6	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,487	0,24	253	41	6,13	0,37	1,0	
1465													4,47		
REZ+4	ZV4.1	transversale	14,8	2,55	2,55	6	0	3,58	1,79	3727	586	4100,08	1,10	3,0	3,0
	ZV4.2	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	391	64	6,09	0,57	1,6	
	ZV4.3	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	988	162	6,09	1,45	4,0	
	ZV4.4	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	395	65	6,09	0,58	1,6	
	ZV4.5	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	421	69	6,09	0,62	1,7	
	ZV4.6	cheminée	14,8	2,55	2,55	6	11,2	3,29	1,10	2916	455	3181,77	1,40	3,8	
	ZV4.7	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	281	46	6,11	0,41	1,1	
1447													6,13		
REZ+5	ZV5.1	transversale	17,7	2,78	2,78	6,00	0,00	4,03	2,02	3952	700	4902,74	1,24	3,4	3,4
	ZV5.2	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2,00	0,459	0,23	245	41	5,95	0,37	1,0	
	ZV5.3	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,459	0,23	287	48	5,95	0,43	1,2	
	ZV5.4	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,459	0,23	250	42	5,95	0,38	1,0	
	ZV5.5	cheminée	17,7	2,78	2,78	6,00	8,3	2,65	0,88	2618	498	3486,60	1,40	3,8	
	ZV5.6	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,471	0,24	416	69	6,03	0,62	1,7	
	ZV5.7	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,471	0,24	291	48	6,03	0,43	1,2	
1447													6,10		
REZ+6	ZV6.1	transversale	20,9	2,78	2,78	6	0	4,45	2,22	4152	911	6378,48	1,54	4,2	4,2
	ZV6.2	unilatérale	20,9	2,78	2,78	6,00	2	0,471	0,24	289	48	6,03	0,43	1,2	
959													1,96		

Tabl. 9 : Calculs réalisés pour le cas 1 – Ventilation naturelle sans extracteur
[Busch, 2011]

Zone	Surface	Type de ventilation	Z[m]	U [m/s]	U _{noyau} [m/s]	DT	DH	DP global	DP entrée	$Q = C_d \times S \times (2 \times \Delta P / \rho)^{1/2}$	Volume	Débit souhaité 7vol/h	Surface souhaitée m²	Nbr fenêtres entrées	Nbr fenêtres sorties
REZ+1	ZV1.1	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	6,93	2,31	4231	378	2644,87	0,63	1,7	
	ZV1.2	unilatérale	5,2	1,96	1,96	6	2	0,404	0,20	394	71	5,58	0,63	1,7	
	ZV1.3	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	5,03	1,68	3604	422	2952,74	0,82	2,3	
	ZV1.4	unilatérale	5,2	1,96	1,96	6	2	0,501	0,25	255	41	6,22	0,37	1,0	
	ZV1.5	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	5,362	1,79	3722	407	2852,14	0,77	2,1	
	ZV1.6	cheminée	5,2	1,96	1,96	6	20,8	5,489	1,83	3766	222	1551,14	0,41	1,1	
													3,62		
REZ+2	ZV2.1	cheminée	8,4	2,21	2,21	6	17,6	6,78	2,26	4186	514	3599,34	0,86	2,4	
	ZV2.2	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,501	0,25	268	43	6,22	0,39	1,1	
	ZV2.3	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,50	0,25	310	50	6,22	0,44	1,2	
	ZV2.4	cheminée	8,4	2,21	2,21	6	17,6	4,242	1,41	3310	222	1555,90	0,47	1,3	
	ZV2.5	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,501	0,25	315	51	6,22	0,45	1,2	
	ZV2.6	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,501	0,25	272	44	6,22	0,39	1,1	
	ZV2.7	unilatérale	8,4	2,21	2,21	6	2	0,483	0,24	257	42	6,11	0,38	1,0	
	ZV2.8	cheminée	8,4	2,21	2,21	6	17,6	4,685	1,56	3479	439	3073,04	0,88	2,4	
													4,26		
REZ+3	ZV3.1	cheminée	11,6	2,40	2,40	6	14,4	6,56	2,19	4116	619	4334,30	1,05	2,9	
	ZV3.2	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,494	0,25	367	59	6,18	0,53	1,5	
	ZV3.3	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,494	0,25	479	78	6,18	0,69	1,9	
	ZV3.4	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,494	0,25	342	55	6,18	0,49	1,4	
	ZV3.5	cheminée	11,6	2,40	2,40	6	14,4	3,995	1,33	3212	613	4288,68	1,34	3,7	
	ZV3.6	unilatérale	11,6	2,40	2,40	6	2	0,487	0,24	253	41	6,13	0,37	1,0	
													4,47		
REZ+4	ZV4.1	cheminée	14,8	2,55	2,55	6	11,2	6,25	2,08	4019	586	4100,08	1,02	2,8	
	ZV4.2	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	391	64	6,09	0,57	1,6	
	ZV4.3	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	988	162	6,09	1,45	4,0	
	ZV4.4	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	395	65	6,09	0,58	1,6	
	ZV4.5	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	421	69	6,09	0,62	1,7	
	ZV4.6	cheminée	14,8	2,55	2,55	6	11,2	3,79	1,10	2916	455	3181,77	1,40	3,8	
	ZV4.7	unilatérale	14,8	2,55	2,55	6	2	0,48	0,24	281	46	6,11	0,41	1,1	
													6,05		
REZ+5	ZV5.1	cheminée	17,7	2,78	2,78	6,00	8,30	6,00	2,00	3937	700	4902,74	1,25	3,4	3,4
	ZV5.2	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2,00	0,459	0,23	245	41	5,95	0,37	1,0	
	ZV5.3	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,459	0,23	287	48	5,95	0,43	1,2	
	ZV5.4	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,459	0,23	250	42	5,95	0,38	1,0	
	ZV5.5	cheminée	17,7	2,78	2,78	6,00	8,3	2,65	0,88	2618	498	3486,60	1,40	3,8	
	ZV5.6	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,471	0,24	416	69	6,03	0,62	1,7	
	ZV5.7	unilatérale	17,7	2,78	2,78	6,00	2	0,471	0,24	291	48	6,03	0,43	1,2	
													6,11		
REZ+6	ZV6.1	transversale	20,9	2,78	2,78	6	0	4,45	2,22	4152	911	6378,48	1,54	4,2	4,2
	ZV6.2	unilatérale	20,9	2,78	2,78	6,00	2	0,471	0,24	289	48	6,03	0,43	1,2	
													1,96		

Tabl. 10 : Calculs réalisés pour le cas 2 – Ventilation naturelle avec extracteurs
[Busch, 2011]

7.6 Limites du dimensionnement simplifié

Il est certain que cet outil (tableur Excel) n'est pas aussi efficace et précis qu'un logiciel de simulation dynamique mais il est important d'insister sur le fait que c'est un outil de travail qui permet en général de déterminer aisément si un bâtiment peut être ventilé ou non par du night cooling, ceci avant de passer à des simulations dynamiques plus précises, mais plus complexes à mettre en œuvre.

L'utilisation préliminaire du logiciel *TNO* pour définir les coefficients de pression en fonction du site et des obstacles alentours est obligatoire. Il faut en effet se baser sur des données chiffrées réalistes pour avoir des résultats les plus proches possibles de la situation réelle. Cette méthode prend en compte les conditions météorologiques telles que le vent et les températures extérieures pour déterminer un débit d'air probable. Mais, par contre, elle ignore les caractéristiques propres des matériaux (densité, chaleur massique, effusivité, etc.) et du bâtiment (comme les surfaces de béton apparentes).

Le calcul statique ne prend pas non plus en compte l'évolution des températures. Ainsi, la différence de 6°C, estimée entre intérieur et extérieur pendant la nuit, est une estimation moyenne. Elle peut varier au cours de l'année, mais elle varie aussi au cours de la nuit (au fur et à mesure que l'air intérieur se rafraîchit).

Cet outil est donc loin d'être suffisant, mais cependant très utile puisqu'il donne à l'architecte une indication assez bonne des contraintes qui s'imposent à lui dans la conception structurelle de son projet : nombre d'ouvertures, situation et taille, voire motorisation de certaines fenêtres, etc. Il permet aussi d'indiquer si des systèmes techniques d'appoint doivent être envisagés.

En prenant quelques marges de sécurité, la simulation dynamique ne modifiera pas fondamentalement les décisions prises à ce stade mais elle permettra de mieux programmer mieux la gestion des systèmes techniques. Ainsi, la durée d'ouverture des fenêtres détermine beaucoup plus la quantité d'air entrant que la seule surface d'ouverture. Les paragraphes suivants portent sur le monitoring et confirment bien ce point.

L'annexe 1 donne un exemple de simulation dynamique réalisée sur TRNSYS pour une semaine type en été.

- Le graphique résultant montre que la combinaison des différents systèmes disponibles permet toujours de maintenir la température opérative située entre 20 et 25°C.
- Il permet aussi de voir que l'ouverture des fenêtres provoque une diminution rapide de la température de l'air intérieur, mais que cette température remonte rapidement au niveau de la température du béton dès que les fenêtres se referment : en effet, les courbes de température opérative et de température de l'air se rejoignent. Ceci sera comparé plus loin aux courbes issues du monitoring.

8. MONITORING ET ANALYSE DES PERFORMANCES DU NIGHT COOLING

L'analyse des données enregistrées par les systèmes de gestion énergétique du bâtiment doit permettre de proposer des pistes pour optimiser le night cooling à Seraing et tirer quelques enseignements sur la faisabilité de ces méthodes dans d'autres contextes (sous d'autres climats).

Il faut cependant souligner ici que l'accès aux données a été obtenu difficilement (et très tardivement dans le cours du travail). En outre, des données qui sont moins pertinentes pour l'occupant ne sont pas relevées systématiquement, même si elles sont nécessaires pour interpréter les résultats. C'est le cas par exemple de la température du béton ou de la durée d'ouverture des fenêtres.

8.1 Collecte des données

Le système de monitoring de la cité administrative de Seraing donne en principe l'emplacement des sondes thermiques situées dans les dalles, une indication de l'ouverture et de la fermeture des stores ou celles des fenêtres, l'évolution de la température du béton, celle de l'air ambiant, etc.

La température ambiante moyenne de l'ensemble du bâtiment est enregistrée depuis le début de son occupation en septembre 2014. Pour les autres données, il a fallu démarrer l'enregistrement au moment où l'accès au logiciel a été obtenu. Malgré plusieurs essais, des interruptions inopinées du système ne m'ont cependant pas permis non plus d'enregistrer ces paramètres. Les graphiques en cours d'élaboration et les séries de corrélations entre températures du béton, de l'air intérieur et de l'air extérieur ont été perdues. En particulier, il faut regretter que le système ait été délibérément fermé à la veille de la journée du 5 juin 2015, ce qui ne permettra pas de commenter le fonctionnement du système lors d'une journée de canicule. Enfin, l'absence de données chiffrées rend les graphiques difficilement lisibles.

Malgré cela, des informations intéressantes semblent pouvoir être tirées.

Des visites sur place permettent en partie de compenser l'absence de données par une approche plus qualitative, basée sur le ressenti des occupants et principalement sur le confort dans les bureaux et l'accueil. Ceci permet de s'éloigner des normes et calculs théoriques, pour envisager des mesures pratiques permettant d'améliorer le confort dans des zones sensibles que seuls les occupants peuvent détecter.

Ces différentes approches (réplication du calcul initial, analyse de données d'occupation, prise en compte de l'avis des occupants) permettent de vérifier si les normes théoriques et les objectifs fixés a priori sont en accord avec la mise en œuvre au quotidien. En particulier, le suivi de la gestion, pendant la première phase d'exploitation du bâtiment, est très important pour être certain que chaque détail a été correctement configuré.

8.2 Températures ambiantes moyennes

Avant d'analyser les graphes qui suivent, il est important de noter que les sondes qui mesurent les températures ambiantes se situent au plafond des zones concernées. Comme l'air chaud monte, il faut considérer que la température ressentie par les occupants se situera un peu au-dessous des mesures observées.

8.2.1 Données recueillies depuis le début de l'occupation

Les graphiques ci-dessous (figures 65 et 66) reprennent les températures ambiantes moyennes pour tous les étages de septembre 2014 à mai 2015. L'évolution de ces températures montre bien que le rez-de-chaussée (figure 65) n'a pas le même profil que les autres étages.

REZ-DE-CHAUSSEE

Le rez-de-chaussée est un espace ouvert où démarre l'escalier central qui s'enroule autour de l'atrium. Il comprend principalement l'accueil et la salle d'attente pour la population. En hiver, la température minimale au rez-de-chaussée approche les 10°C et entre février et mai, il n'est pas rare que les températures maximales dépassent les 25°C (valeurs au-dessus de la ligne rouge) et atteignent même 27°C.

A cette échelle, on ne peut pas distinguer le jour et la nuit, mais on peut évidemment supposer que les températures maximales sont atteintes en journée. Elles proviennent en fait de l'absence d'un sas d'entrée efficace dans le hall : les deux portes d'accès s'ouvrent en effet en même temps. Les portes d'entrée automatiques laissent donc passer l'air chaud ou froid, selon les températures extérieures.

ETAGES

Sur ce même graphique, si l'on supprime la donnée relative au rez-de-chaussée, on voit que les températures sont beaucoup moins extrêmes (figure 66). Elles varient entre 18°C l'hiver et 25°C lors des périodes les plus chaudes, avec cependant quelques pics au-dessus des 25°C (valeurs au-dessus de la ligne rouge).

Il est difficile de déterminer le pourcentage précis des heures en surchauffe uniquement sur base d'un graphique, mais ce taux est certainement inférieur à 5%, en l'espace de 10 mois. Ceci semble conforme au critère PHPP, mais sans avoir encore l'expérience des mois les plus chauds.

Globalement, on peut estimer que le système fonctionne selon les attentes initiales et qu'il répond aux objectifs fixés en termes des températures moyennes dans la zone de confort.

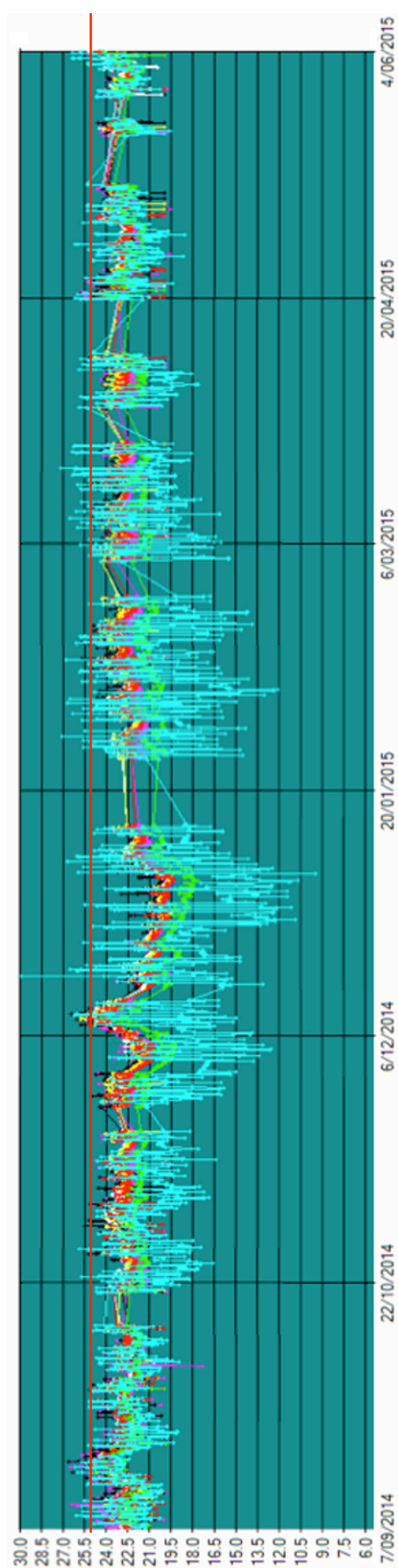


Fig. 65 : Températures ambiantes (°C) sur une année – Tous les étages

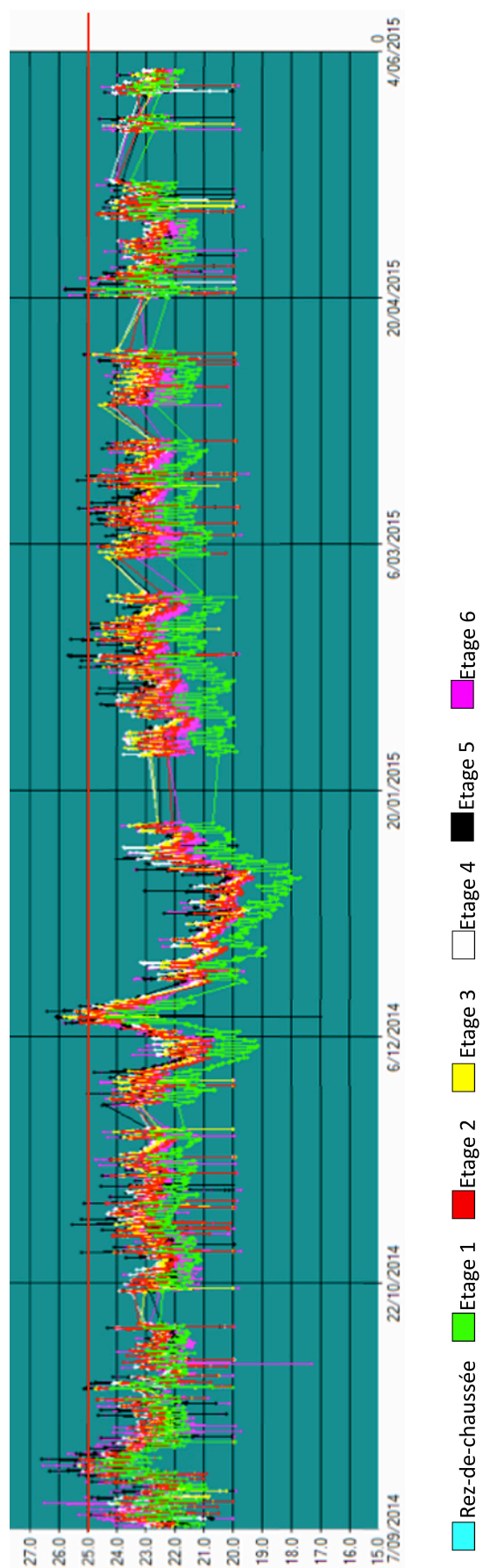


Fig. 66 : Températures ambiantes (°C) sur une année – Etages de R+1 à R+6

8.2.2 Une semaine type

Le graphique de la figure 67 reprend les températures ambiantes au cours d'une semaine type, du lundi au dimanche, à mi-saison. Chaque journée présente à peu près le même profil, malgré l'évolution du climat extérieur : les courbes suivent un tracé sinusoïdal plus ou moins régulier.

On peut remarquer que le rez-de-chaussée subit les plus grandes variations de température entre le jour et la nuit. Sur la semaine considérée, il atteint la surchauffe ($>25^{\circ}\text{C}$) un jour sur deux. On sait que cet étage n'est pas ventilé par le night cooling, mais, malgré ces températures élevées en journée, la courbe diminue de quelques degrés pendant la nuit. L'espace conçu autour de l'atrium bénéficie en effet de l'air frais amené par les autres étages. Il évacue sa chaleur rapidement par la cheminée avant de servir de stockage d'air frais. Comme déjà expliqué, cet étage est également sensible aux températures extérieures en journée, car les portes d'entrée automatiques, installées pour la création d'un sas, sont ouvertes fréquemment et simultanément.

On note l'absence de brusques chutes de température sur la courbe du premier étage. Les fenêtres ne s'y sont donc pas ouvertes. La courbe du deuxième étage suit quasiment la même évolution avec environ 1°C de plus. A cet étage, les fenêtres se sont ouvertes, une seule fois pendant la semaine.

Il est possible que la température atteinte en journée n'ait pas suffi à déclencher l'ouverture des fenêtres à ces étages. Ils n'auraient donc pas bénéficié du night cooling au cours de ces nuits-là. Par contre, on peut penser que la situation plus basse des 1^{er} et 2^{ème} étages leur permet de bénéficier un peu de la fraîcheur du rez-de-chaussée pendant la nuit. Aux troisième, quatrième et cinquième étages, par contre, le système de ventilation naturelle de nuit semble avoir fonctionné correctement. Du moins, les fenêtres se sont ouvertes chaque nuit de la semaine. Les seules fenêtres du cinquième étage se sont ouvertes également le weekend cette semaine-là, mais l'on ne dispose pas de données suffisantes qui permettraient de comprendre pourquoi. On peut supposer qu'en l'absence d'une occupation pendant le week-end, seule la chaleur transmise par l'air extérieur s'est accumulée au dernier étage.

8.2.3 Une journée type

En zoomant sur une journée seulement (figure 68), il est possible de mieux comprendre l'évolution des températures. L'occupation des lieux commence aux environs de 8h du matin, se termine vers 18h et les fenêtres s'ouvrent à 22h : les courbes coïncident bien avec ces données.

A l'arrivée du personnel, la température ambiante tourne déjà aux environs de $22-23^{\circ}\text{C}$. Cela paraît élevé mais il est difficile de juger la température de confort sans connaître celle du béton. De plus, comme déjà mentionné, la sonde positionnée sous le plafond indiquera des températures un peu supérieures à celle de l'air ambiant au niveau de l'homme assis ou debout.

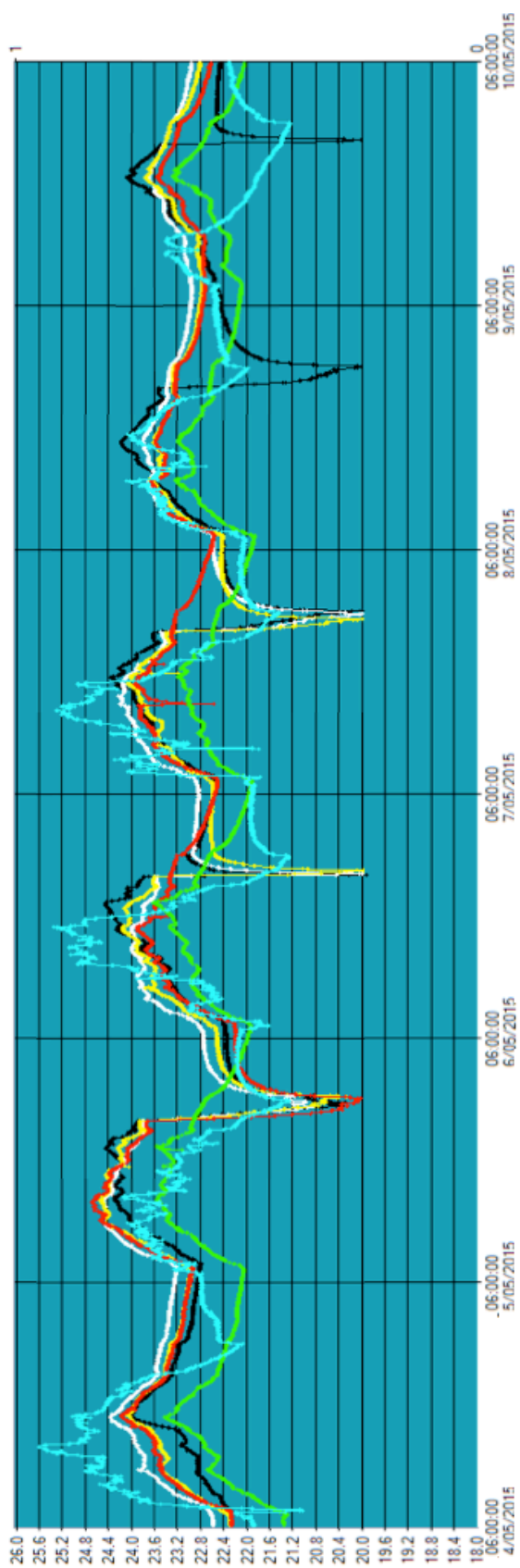


Fig. 67 : Températures ambiantes (°C) – Semaine type

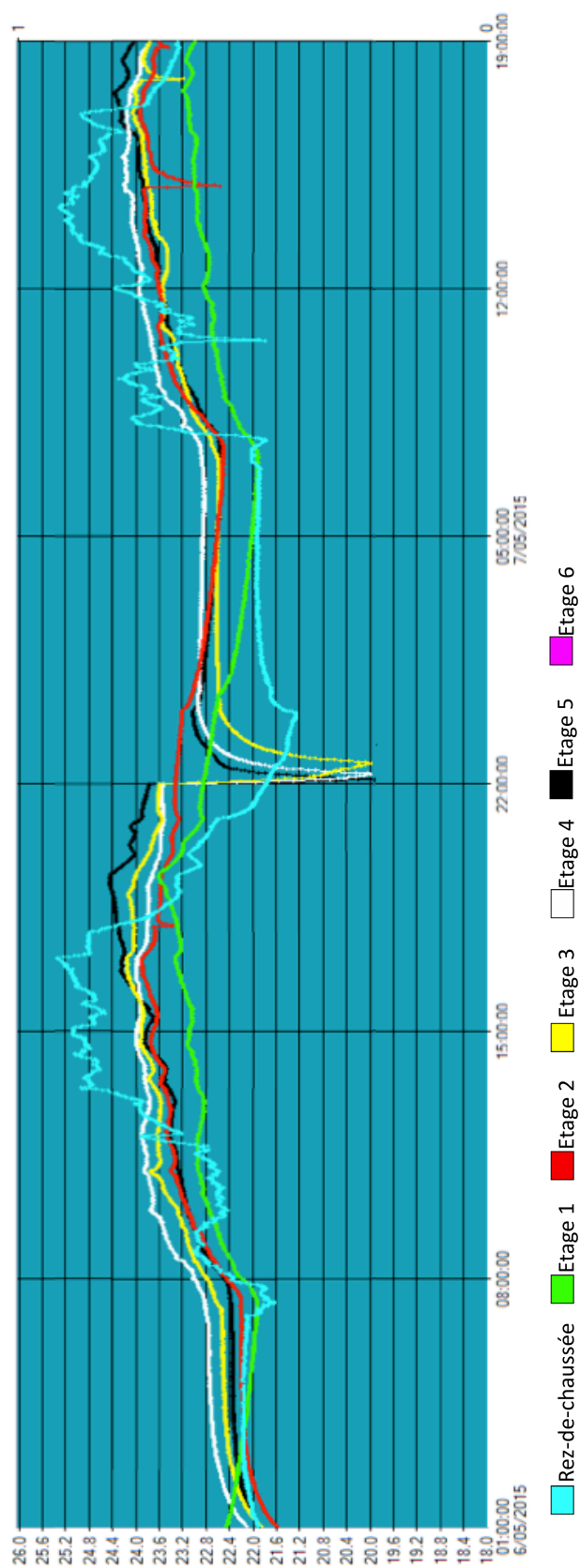


Fig. 68 : Températures ambiantes (°C) – Journée type

8.2.4 Détails

OUVERTURE DES FENETRES :

Dans le dossier de conception énergétique, les commandes devraient être réglées pour ouvrir les fenêtres entre 22h et 6h, lorsque $T_{int} > 23^{\circ}\text{C}$ à 22h et $T_{ext} > 12^{\circ}\text{C}$ à 22h et $T_{int} \geq T_{ext} + 1^{\circ}\text{C}$. La fermeture est commandée en journée entre 6h et 22h ou la nuit lors de fortes pluies, lorsque le vent est violent (vitesse $> 10\text{m/s}$) ou lorsque $T_{int} < 20^{\circ}\text{C}$ (Neo Construct & Ides Engineering, 2009).

Sur la courbe noire (figure 69), qui représente la température ambiante moyenne du 5^{ème} étage, on peut analyser directement l'effet du night cooling. Comme prévu, à 22h, les fenêtres s'ouvrent pour laisser entrer l'air frais de l'extérieur et lorsque la température de l'air intérieur atteint 20°C , elles se referment. Ce réglage déclenche cependant une ouverture d'environ 8 minutes ! Ce n'est évidemment pas assez pour refroidir la masse du béton. Aussi la courbe des températures remonte rapidement une fois les fenêtres refermées et atteint de nouveau 23°C .

En comparant cette courbe avec celle du rez-de-chaussée, qui n'est pas refroidi par la ventilation naturelle intensive de nuit, on confirme malgré tout l'efficacité du night cooling : entre 13h et 18h, les températures sont autour de 25°C au rez-de-chaussée alors qu'elles n'excèdent pas 24°C au 5^{ème} étage.

Mais il serait certainement utile de modifier la commande de contrôle des fenêtres et régler leur fermeture sur une température plus basse ou bien sur la température de la dalle (et non sur celle de l'air ambiant), de manière à laisser fonctionner la ventilation naturelle pendant une durée plus longue.

ETAGES 1 ET 2 :

On a relevé précédemment que les fenêtres des premier et deuxième niveaux ne s'ouvrent que rarement pendant la nuit. En zoomant sur une semaine (figure 70), il semble que le night cooling ne suive pas la consigne décrite dans le dossier de conception énergétique. Ainsi, le système a été activé la nuit du 05 mai 2015 à 22h00, lorsque la température ambiante était d'environ $23,5^{\circ}\text{C}$. Mais c'est le seul jour de la semaine qui a bénéficié du night cooling, alors que toutes les conditions semblaient réunies aussi les autres jours.

On voit bien, entre le 5 et le 9 mai, que la température ambiante à l'arrivée des occupants est supérieure de $\frac{1}{2}$ à 1 degré lorsque le night cooling n'a pas été activé. Il en résulte forcément une température ambiante supérieure en cours de journée.

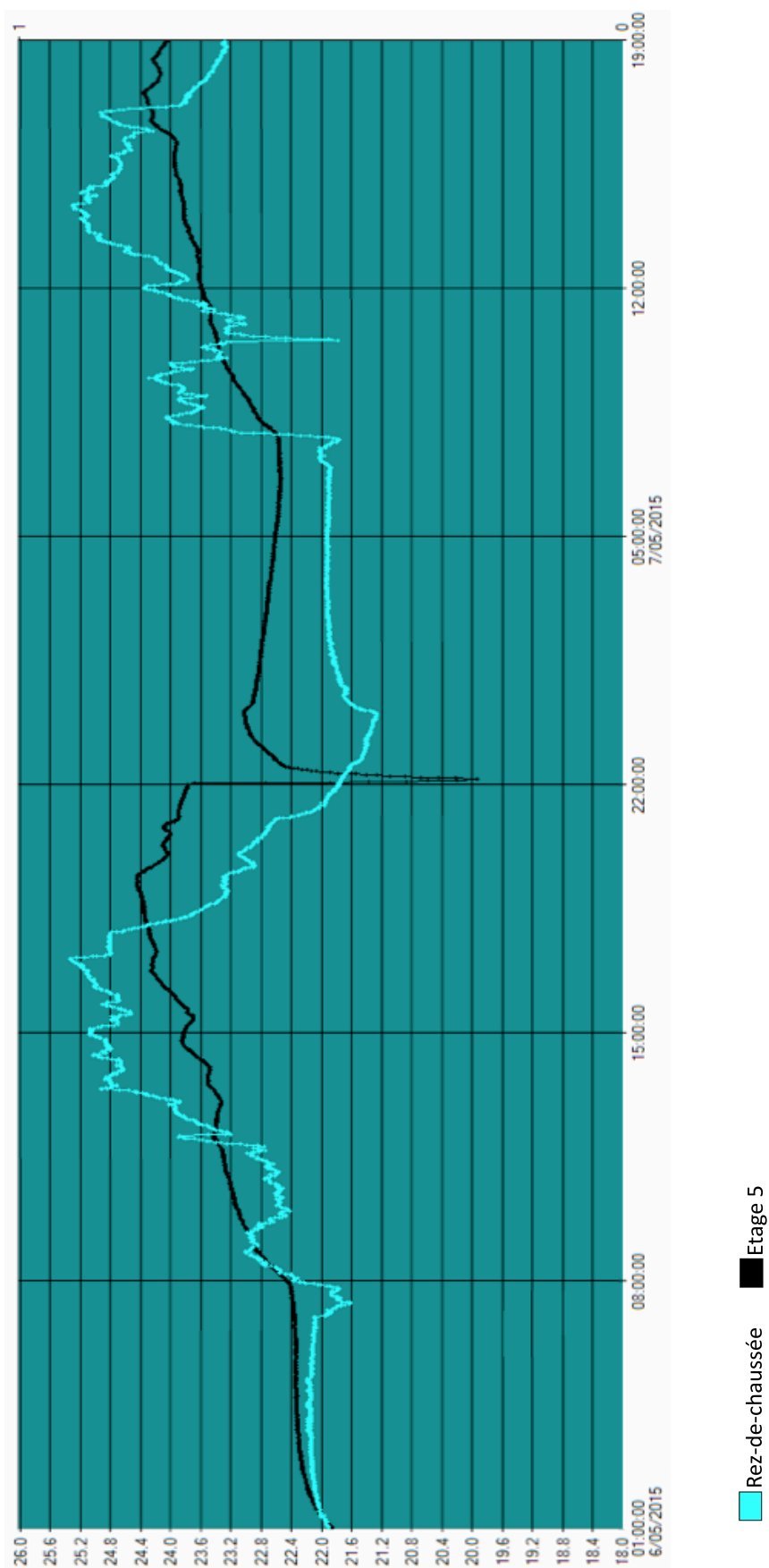


Fig. 69 : Températures ambiantes (°C) – Profil de chute

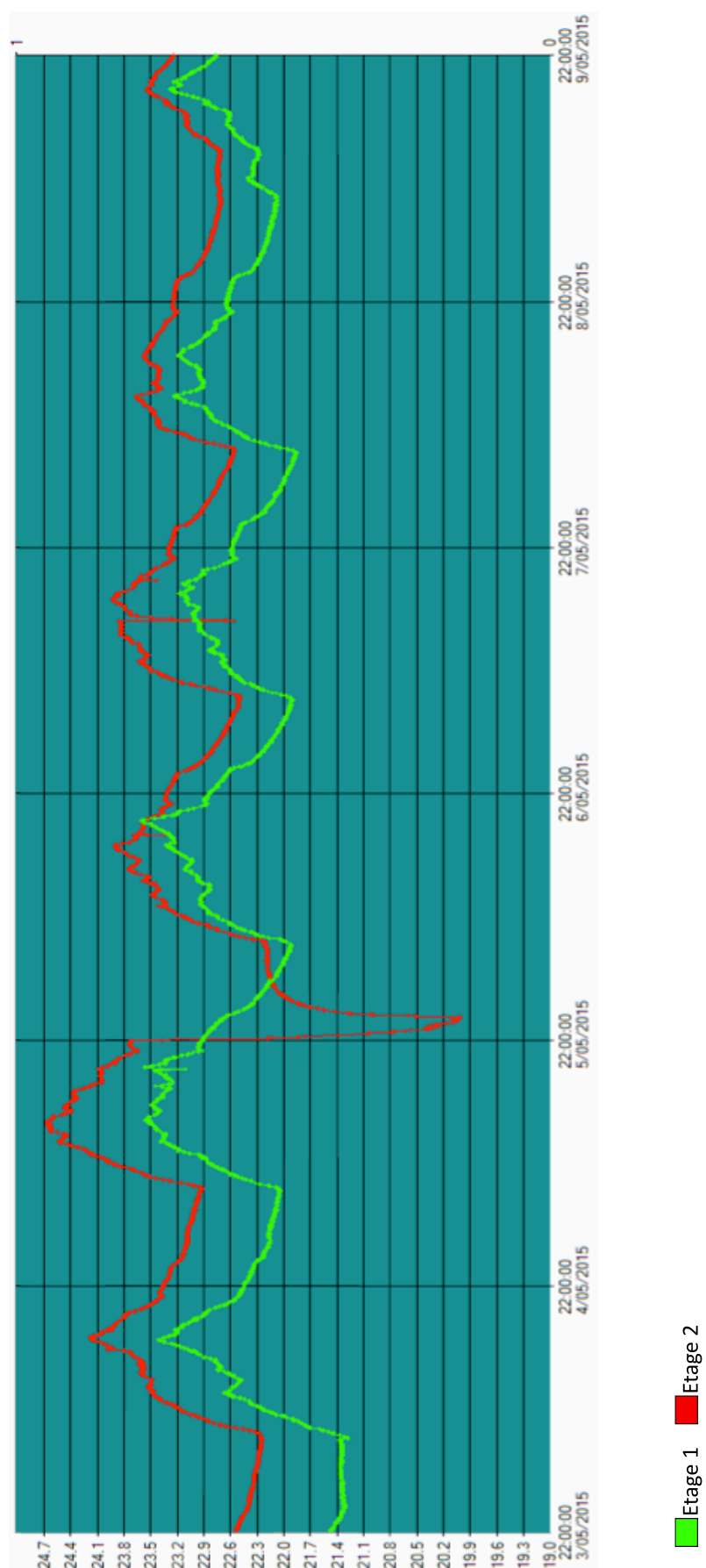


Fig. 70 : Températures ambiantes (°C) – Etages R+1 et R+2

TEMPS DE REFROIDISSEMENT

Le graphique suivant (figure 71) montre bien l'impact de la durée d'ouverture des fenêtres. Dès les 20°C atteints pour la température ambiante, les fenêtres se referment. Les chiffres étant difficiles à lire précisément sur le graphique, voici une précision utile : pour atteindre 20°C, il faut environ 8 minutes au 5^{ème} étage (courbe noire), 17 minutes au 4^{ème} (courbe blanche) et 36 minutes au 3^{ème} (courbe jaune).

L'emplacement de la sonde peut évidemment avoir aussi un effet sur la commande de fermeture : une sonde placée plus loin de la fenêtre captera moins vite la variation de température.

Ce qui est intéressant à analyser sur ces courbes, c'est l'influence du temps de refroidissement sur les autres paramètres. Là où la fenêtre s'est ouverte plus longtemps, la remontée de la température intérieure se fait plus lentement et reste à un niveau plus bas. Ceci doit s'expliquer par une diminution plus importante de la température de surface du béton (paramètre que nous n'avons pas pu mesurer de façon directe).

FERMETURE DES STORES

Pour mémoire, on montre aussi l'ouverture et la fermeture des stores (figure 72).

Pour chaque store, la valeur inférieure (0, 2 ou 4) indique qu'il est ouvert, tandis que la valeur supérieure (1, 3 ou 5) indique qu'il est fermé. A l'évidence, ils suivent la course du soleil et se ferment d'abord à l'est et au sud, en matinée, puis à l'ouest l'après-midi alors que l'est s'ouvre.

On observe que les protections solaires se ferment en même temps à l'est et au sud, ceci en raison de nombreux obstacles présents à l'est lorsque le soleil est encore bas.

On peut également apercevoir que les stores se ferment uniquement lorsque le soleil apparaît : ils s'ouvrent au moindre nuage. Cela paraît logique du point de vue du programmeur, mais le système peut devenir très vite inconfortable pour les occupants, lors des journées nuageuses.

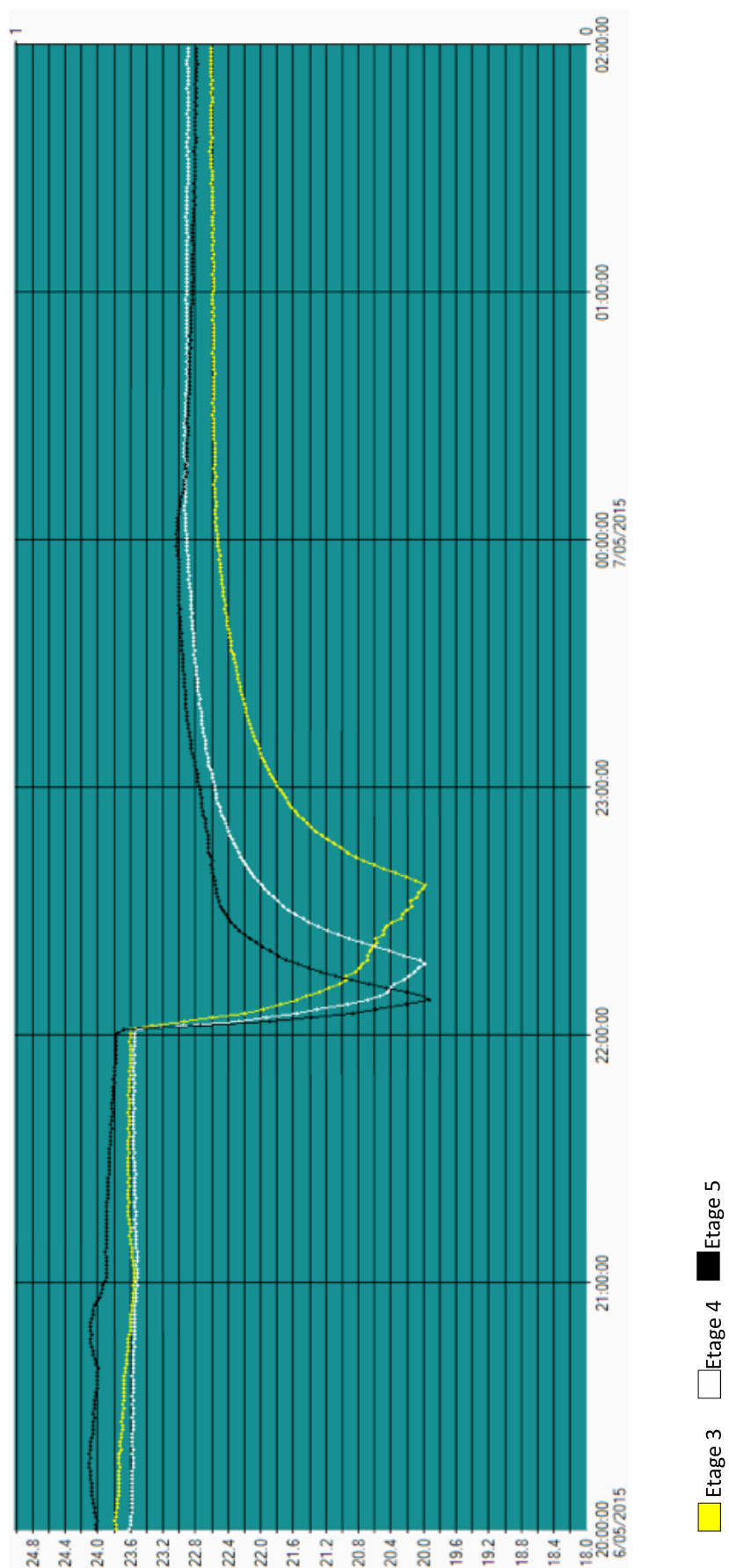


Fig. 71 : Températures ambiantes (°C) – Temps de refroidissement

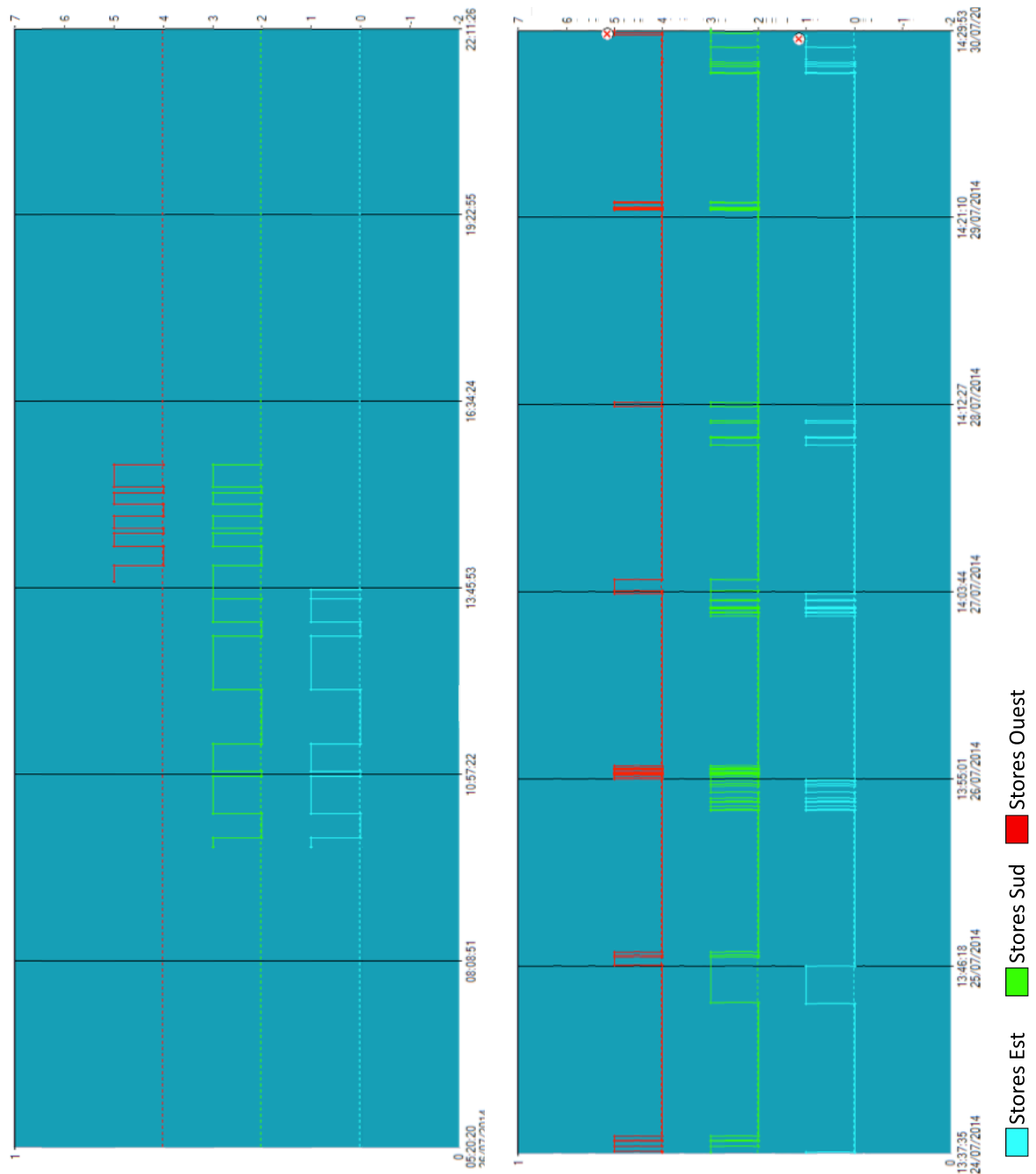


Fig. 72 : Ouverture et fermeture des stores (0 – 1)

9. RESENTI DES OCCUPANTS

Une visite à la cité administrative de Seraing a permis de connaître l'avis exprimé par des occupants sur l'ambiance interne des bureaux. L'accès à la plupart des bureaux en compagnie d'un employé a aussi permis de discuter avec une dizaine de personnes présentes.

9.1 Ventilation

Le bâtiment comprend des grandes salles qui accueillent des bureaux en open space. L'aménagement initial prévu sur plan a été modifié au début de l'occupation afin de placer plus de bureaux et ainsi augmenter le nombre d'employés dans les salles. Cette nouvelle disposition oblige certains à s'asseoir sous les bouches d'amenée d'air qui servent à la ventilation hygiénique. Les employés s'accordent à dire que cet espace est très inconfortable. Pour cette raison, ils ont été 'créatifs' et ils ont obturé les bouches d'aération !

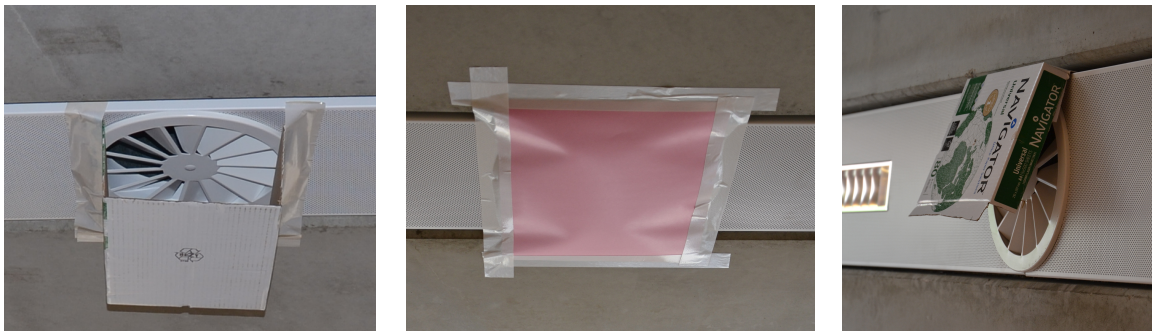


Fig. 73 : Protections des bouches d'aération
[Photos prise par Pauline Lesage]

Cette solution empirique n'est évidemment pas efficace et risque de déséquilibrer tout le système en augmentant le débit d'air dans un bureau voisin pour garder le même débit global dans le bâtiment. Il serait plus efficace de régler les quantités d'amenée d'air, qui ne doivent pas être trop importantes, et de pulser l'air parallèlement au plafond afin d'éviter ce courant d'air froid.

Quelques employés décrivent aussi un problème d'hygrométrie. L'air au sein du bâtiment est en effet très sec. Cette autre source d'inconfort est peut-être liée au problème précédent : une quantité trop importante d'air frais pulsé peut en effet provoquer l'assèchement des locaux, sachant que l'humidité relative de l'air extérieur est plus faible que celle de l'air intérieur. Le renouvellement d'air nécessaire pour répondre à la norme belge relative à la ventilation hygiénique impose un débit de $2,5\text{m}^3/\text{h}$ par m^2 de surface au sol pour des bureaux paysagers (Gratia & De Herde, 2006). Il serait important de vérifier cette valeur au sein de la cité administrative.

En plus de l'inconfort lié à l'air sec et aux « courants d'air », les occupants d'un bureau paysager du 5^{ème} étage (placé sous les cuisines) se plaignent également des mauvaises odeurs amenées par les bouches de pulsion.

9.2 Température

A plusieurs étages, les occupants des bureaux placés au sud ont improvisé la pose de stores internes. Sont-ils éblouis par le rayonnement solaire ou se protègent-ils de la chaleur ? Dans les deux cas, on peut se demander si les stores automatiques sont bien réglés : suivent-ils correctement la course du soleil ? Les protections solaires sont beaucoup moins efficaces lorsqu'elles sont placées à l'intérieur. En effet, des stores externes empêchent les rayons du soleil d'atteindre le vitrage tandis que des stores internes ne peuvent pas renvoyer toute la chaleur qui est entrée. Il est donc plus difficile d'éviter les surchauffes de cette manière.

Au rez-de-chaussée, les courants d'air sont nombreux car aucun sas n'a été prévu dans l'entrée. L'ouverture fréquente des portes automatiques provoque des amenées d'air régulières dans toute la zone aménagée en open space, ce qui est très inconfortable pour le personnel de l'accueil et même insupportable en hiver. Cette situation a récemment été améliorée par la pose d'une paroi transparente qui permet de protéger le personnel de l'accueil du contact direct avec l'air froid de l'extérieur.

Plus fondamentalement, le rez-de-chaussée est conçu comme réservoir de fraîcheur depuis lequel l'air frais est distribué dans le reste du bâtiment. Cela implique que la température y est toujours plus basse qu'aux étages supérieurs ; cela provoque des plaintes des employés même à mi-saison. Un jour d'hiver, ils ont installé des chauffages électriques. Etant placés sous l'atrium qui sert de « cheminée » centrale, le bâtiment a alors atteint des températures très élevées !!

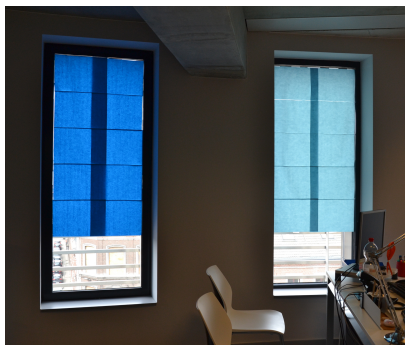


Fig. 74 : Stores intérieurs ajoutés par les occupants (gauche) et nouvelle paroi dans l'accueil (droite)
[Photos prise par Pauline Lesage]

9.3 Domotique

L'ouverture des fenêtres se fait uniquement la nuit ou bien quand le bâtiment atteint des températures dépassant la température de confort (pour autant que la température extérieure ne soit pas plus élevée). Les volets, eux, s'ouvrent et se ferment en fonction de l'ensoleillement et de l'heure de la journée. Le pilotage automatique est un avantage pour la ventilation naturelle en été, mais est-ce vraiment confortable pour les occupants ? L'impossibilité d'ouvrir une fenêtre lorsqu'il fait chaud, de descendre un store quand le soleil est éblouissant ou au contraire de l'ouvrir pour profiter des rayons du soleil est perçue plutôt comme un point négatif par les employés rencontrés.

10. AMELIORATIONS DU SYSTEME DE VENTILATION NATURELLE

Des analyses précédentes, il ressort que le bâtiment fonctionne (pour l'essentiel) en conformité avec les attentes initiales. Une visite dans le bâtiment un jour de 'canicule' permet d'ailleurs de confirmer ce point. Avec 35°C à l'extérieur, les bureaux offraient une impression de fraîcheur, malgré une température interne de 24°C.

Cette sensation n'est pas perçue en entrant dans l'espace d'accueil au rez-de-chaussée. Ceci est clairement lié à l'absence de sas d'entrée.

Quelques problèmes de confort (plus que de performance) sont aussi identifiés au long de l'occupation du bâtiment, dont certains ont trait comme on l'a vu à des comportements inadéquats. Mais malgré ces problèmes, qui doivent être réglés, les employés ne cachent pas qu'ils sont mieux installés qu'auparavant, car ils occupaient des bâtiments vétustes dans lesquels les surchauffes n'étaient pas rares en été.

Des aspects plus techniques méritent aussi l'attention.

On a vu que la commande d'ouverture des fenêtres pourrait être améliorée afin de prolonger la durée d'ouverture et rafraîchir davantage la masse du béton. Ceci diminuerait la température opérative en début de journée (puisque l'on a vu que la température de l'air intérieur rejoint rapidement celle du béton) et augmenterait d'autant plus la capacité de stockage thermique pour la journée suivante.

Plus fondamentalement, on a vu que des zones du bâtiment sont moins accessibles aux flux d'air et sont donc davantage dépendantes de facteurs aléatoires (comme le vent) ou bien de systèmes mécaniques de ventilation.

L'objet de cette dernière section vise donc à vérifier les limites du système et à identifier des pistes d'améliorations possibles.

- Limites du système : la ventilation intensive naturelle est moins utile en hiver ou dans les pays froids, là où il est préférable de garder la chaleur au sein des bâtiments ; dans le premier paragraphe, on s'intéressera donc à la transposition dans un climat chaud ;
- Pistes d'amélioration : dans un second paragraphe, on s'intéressera aux techniques d'évaporation, à l'extension des surfaces d'échange de chaleur et aux moyens de brasser l'air.

10.1 Adaptation aux climats chauds

Dans **les climats chauds et humides**, la température reste élevée pendant la nuit et les matériaux de construction lourds doivent être évités. En effet, si l'énergie stockée dans la masse thermique ne peut pas être éliminée pendant la nuit, le système d'inertie ne permet plus d'éviter les surchauffes à l'intérieur du bâtiment.

Dans des régions de ce type, il faut favoriser les matériaux à faible inertie et basse effusivité. En outre, il est alors nécessaire de ventiler intensément pour éviter les problèmes d'humidité et pour se protéger de façon efficace contre les rayonnements solaires (Noé21, 2012).

Des systèmes alternatifs comme le puits provençal ou le slab cooling peuvent aussi être mis en œuvre.

Dans **un climat chaud et sec**, par contre, les nuits sont plus fraîches (ou moins chaudes...) et l'amplitude des variations de températures entre le jour et la nuit est parfois plus élevée que chez nous. Le système y est donc a priori transposable. Il faut noter cependant que les bâtiments exemplaires décrits dans la deuxième partie – Melbourne, Kew Gardens ou Montfort University et y compris le cas de Harare – sont tous construits dans des climats proches du nôtre.

Pour que le système fonctionne, il faut que la chaleur accumulée le jour puisse être évacuée la nuit. Il faut donc que, en moyenne, la température extérieure de nuit soit inférieure à la température de confort souhaitée à l'intérieur. C'est dans ces conditions seulement que l'on peut ensuite faire varier les surfaces et les durées d'ouverture.

Les calculs suivants se basent sur les données climatiques de Kaboul (figure 75), où l'amplitude de variation quotidienne est large et où les températures nocturnes sont fraîches malgré des températures moyennes très élevées en été. On retient pour la suite des températures moyennes au mois d'août, de 32°C en journée et de 13,5°C la nuit.

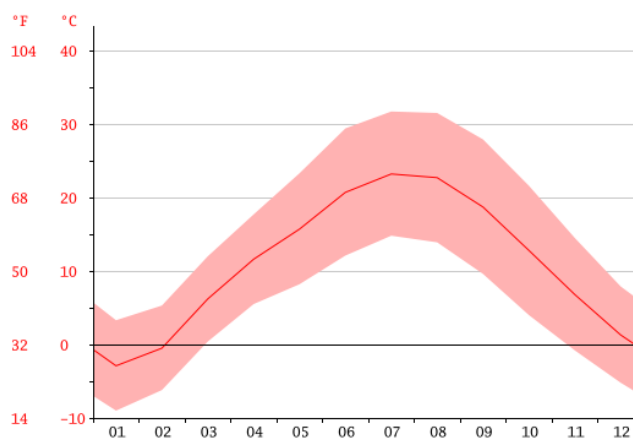


Fig. 75 : Données climatiques à Kaboul
[en.climate-data.org]

Le développement suivant s'appuie sur la transposition au climat afghan, du modèle élaboré pour Seraing, à paramètres techniques équivalents. La ventilation transversale tient compte des coefficients de pression et de la vitesse du vent. Par hypothèse, elle n'est donc pas modifiée. On peut ainsi vérifier l'impact des variations de température sur l'efficacité du seul effet 'cheminée'.

Le choix s'est porté sur une zone ventilée par effet cheminée au troisième étage et orientée à l'ouest.

Le calcul initial pour Seraing s'est basé sur une différence entre températures intérieure et extérieure de 6°C à 22h. Sur base d'une température moyenne nocturne à Kaboul de 13,5°C, la différence de température est portée à 10°C, ce qui modifie les déperditions, le débit et donc également les ouvertures. Le tableau ci-dessous montre (en vert), la comparaison des résultats pour une différence de température (DT) de 6°C (valeur utilisée à Seraing) et de 10°C (valeur considérée pour un climat chaud).

Zone	S [m ²]	Type	Z [m]	U [m/s]	DT [°C]	DH [m]	Dp _{global} [Pa]	Dp _{entrée} [Pa]	Q [m ³ /h]	V [m ³]	Débit souhaité	Surface ouvert.	Nbr fen.
ZV3.1	221	cheminée	11,6	2,40	6	14,4	6,56	2,19	4116	619	4334,30	1,05	2,9
ZV3.1	221	cheminée	11,6	2,40	10	14,4	8,86	2,95	4784	619	4334,30	0,91	2,5

Tabl. 11 : Tableau de comparaison entre Seraing et un climat chaud

Masy (2008) propose une méthode simplifiée pour calculer l'effet des systèmes HVAC dans le bâtiment en tenant compte de l'environnement extérieur, des charges internes et solaires, des mouvements d'air, etc. Cette méthode est établie sur le logiciel EES qui est un solveur d'équations.

Sur base des données du dossier de conception énergétique de Seraing, l'effet du refroidissement par ventilation naturelle est donc calculé pour la zone 'ZV3.1', qui possède une superficie de 221m² et trois fenêtres automatisées pour une surface d'ouverture totale de 1,08m².

- Dimensions de la pièce :

Surface : A_{floor} = 221m²

Volume : V_{in} = 221 * 2,8 = 618,8m³

Surface accessible de béton : A_{wall} = 389m²

- Caractéristiques internes :

Densité de l'air : rho_a = 1,204 kg/m³

Chaleur massique de l'air : c_{p_a} = 1005 J/kgK

Valeur U des murs extérieurs : U_{wall} = 0,102W/m²K

La capacité de stockage de la chaleur du béton : C_{wall_m2} = 506000 J/m²K

- Première simulation : Seraing, DT=6°C :

Débit d'air : V_{dot_vent_m3h} = 4445,28 m³/h (=4116*1,08)

Température intérieure : T_{in} = 23,5°C

Température extérieure : T_{out} = 17,5°C

Température des murs : T_{wall} = 23°C

Les résultats sont donnés dans les trois graphiques qui suivent (figure 76).

Le **premier graphique** commence à 22h et se termine à 6h. Il indique les diminutions de températures au cours de la nuit. Les gains sont supposés nuls, qu'ils soient internes (occupants, éclairage, appareillage), solaires ou provenant du chauffage. La ventilation hygiénique n'est pas enclenchée.

Résultats : $T_{\text{dalle}} = 22,54^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{int}} = 18,47^{\circ}\text{C}$. On voit que la température de l'air intérieur diminue relativement vite au cours de la première heure puis se stabilise et le béton se refroidit doucement.

Le **deuxième graphique** correspond aux deux heures après la fermeture des fenêtres jusqu'à l'arrivée des employés [6h – 8h]. Il n'y a pas d'apport de chaleur ni de ventilation mécanique. La température extérieure est de 14°C .

Résultats : $T_{\text{dalle}} = 22,45^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{int}} = 20,85^{\circ}\text{C}$. La température de l'air remonte rapidement mais n'atteint pas encore celle du béton.

Le **troisième graphique** correspond à la durée d'occupation [8h – 18h]. La température extérieure est prise égale à 21°C et la ventilation mécanique est activée pour assurer la qualité de l'air avec un débit de $0,87\text{vol/h}$. On considère un facteur solaire de $0,56$ avec des stores protégeant 50% du vitrage. Les apports internes sont de $3,5\text{W/m}^2$ comme indiqué dans le dossier de conception énergétique.

Résultats : $T_{\text{dalle}} = 22,63^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{int}} = 24,85^{\circ}\text{C}$. Ainsi, après dix heures d'occupation, on n'atteint pas la surchauffe.

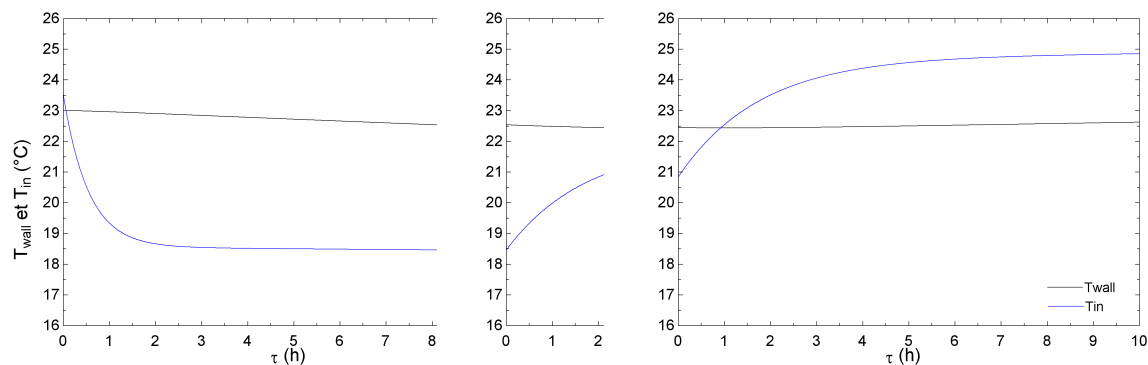


Fig. 76 : Simulation d'une journée type à Seraing

Il est important de noter que les conditions initiales de la simulation sont tirées d'un cas réel mesuré à la date du 2 juin par le système de monitoring (annexe 2).

- Deuxième simulation : Climat chaud (Kaboul), $DT=10^{\circ}\text{C}$:

Conditions initiales de températures (dalle et air) identiques à Seraing.

Débit d'air : $V_{\text{dot_vent_m3h}} = 5166,72 \text{ m}^3/\text{h}$ ($=4784 \cdot 1,08$)

Température intérieure : $T_{\text{in}} = 23,5^{\circ}\text{C}$

Température extérieure : $T_{\text{out}} = 13,5^{\circ}\text{C}$

Température des murs : $T_{\text{wall}} = 23^{\circ}\text{C}$

Après 8h de refroidissement de nuit [22h – 6h], les températures sont les suivantes : $T_{\text{dalle}} = 22,19^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{int}} = 14,97^{\circ}\text{C}$. On voit que l'air se rafraîchit beaucoup plus qu'à Seraing de même que le béton, avec une différence de $0,81^{\circ}\text{C}$ au lieu de $0,46^{\circ}\text{C}$. Le différentiel semble limité, mais étant donné l'inertie thermique du béton, ceci rend une capacité importante de stockage pour la journée.

Pour le deuxième graphique [6h – 8h], la température extérieure est de 20°C . Après 2 heures, $T_{\text{dalle}} = 22,09^{\circ}\text{C}$ et $T_{\text{int}} = 21,21^{\circ}\text{C}$. Ainsi, le béton a été refroidi de façon plus efficace mais la température de l'air augmente plus vite et cette situation offre une température de confort identique à l'arrivée des employés.

Enfin, le troisième graphique [8h – 18h], la température extérieure est de 32°C . Après 10h d'occupation, les résultats indiquent une température de $23,11^{\circ}\text{C}$ pour la dalle de béton et $26,29^{\circ}\text{C}$ pour l'air intérieur. Les deux températures sont plus élevées qu'en fin de journée à Seraing. De plus, la température intérieure atteint la surchauffe, même si la température opérative reste acceptable.

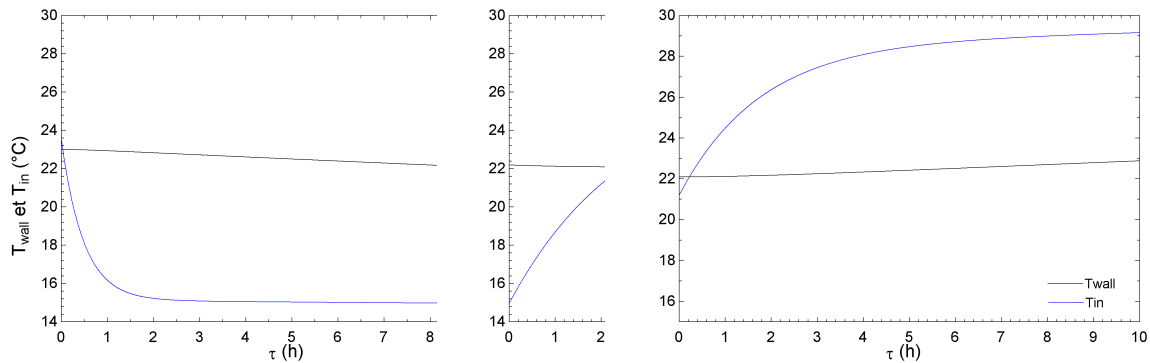


Fig. 77 : Simulation d'une journée type à Kaboul

Une seconde journée a été simulée sous les mêmes conditions pour vérifier si les températures se stabilisent à ces niveaux. Les quatre graphiques ci-dessous montrent que les valeurs restent quasi stables pour le béton mais augmentent fortement pour l'air intérieur qui atteint $29,23^{\circ}\text{C}$.

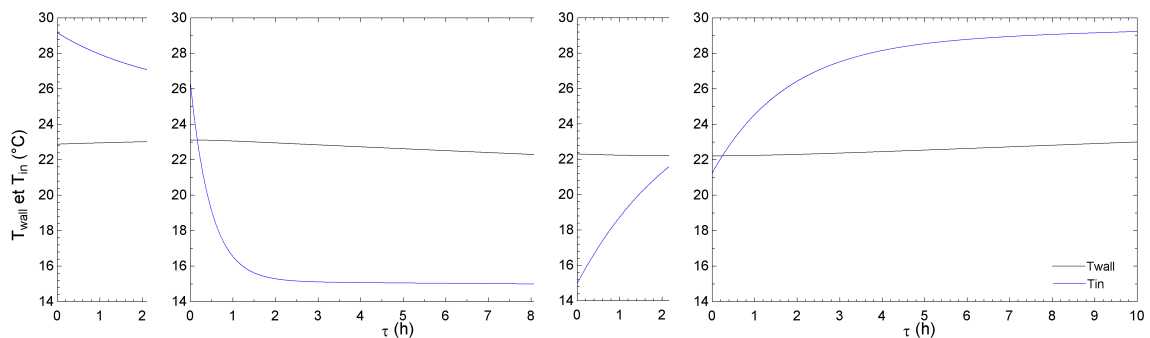


Fig. 78 : Simulation d'une seconde journée à Kaboul

Pour éviter les surchauffes, une dernière simulation prend en compte le refroidissement adiabatique mis en œuvre à Seraing pour les journées de chaleur intense. L'air est pulsé à 16°C pendant la journée. Ces résultats sont beaucoup meilleurs pour le confort des occupants, avec une température intérieure qui reste un peu supérieure à 24°C.

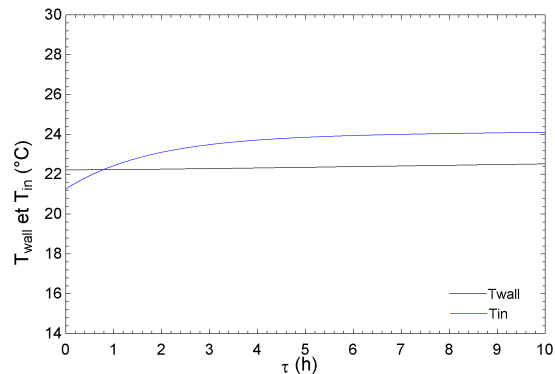


Fig. 79 : Simulation du refroidissement adiabatique à Kaboul

Le tableau ci-dessous reprend les résultats en synthèse.

	CAS 1 Seraing, DT=6°C	CAS 2 Kaboul, DT=10°C	CAS 2 2 ^{ème} journée
DONNEES DE DEPART			
T° béton [°C]	23	23	23,11
T° air int [°C]	23,5	23,5	26,29
T° air ext [°C]	17,5	13,5	13,5
Débit d'air [m ³ /h]	4445,28	5166,72	5166,72
REFROIDISSEMENT (NUIT) – APRES 8H			
T° béton [°C]	22,54 (-0,46)	22,19 (-0,81)	22,30 (-0,81)
T° air int [°C]	18,47 (-5,03)	14,97 (-8,53)	14,99 (-11,30)
FERMETURE DES FENETRES (MATIN) – APRES 2H			
T° air ext [°C]	14	20	20
T° béton [°C]	22,45 (-0,10)	22,09 (-0,10)	22,22 (-0,08)
T° air int [°C]	20,85 (+2,38)	21,21 (+6,24)	21,27 (-6,28)
OCCUPATION (JOURNEE) – APRES 10H			
T° air ext [°C]	21	32	32
T° béton [°C]	22,63 (+0,18)	22,88 (+0,79)	23 (+0,78)
T° air int [°C]	24,85 (+4)	29,16 (+7,95)	29,23 (+7,96)

Tabl. 12 : Tableau récapitulatif des simulations réalisées sur EES

Le modèle de la cité administrative pourrait être donc être transposé sous d'autres climats, mais avec des limites qui sont liées aux variations locales de températures entre jour et nuit.

On a supposé dans les deux cas, une même surface d'ouverture. Ceci visait à comparer deux situations identiques et mesurer uniquement l'effet du différentiel de températures. On pourrait évidemment jouer aussi sur le nombre et la dimension des ouvertures, en sachant toutefois que le nombre total de fenêtres doit obéir aussi à d'autres contraintes (orientation, risques de surchauffe, architecture du bâtiment, etc.)

Quoi qu'il en soit, on voit aussi qu'il est toujours nécessaire d'adjoindre des systèmes techniques complémentaires pour améliorer la marge de sécurité et résoudre les cas inévitables de surchauffe en journée. Ces cas sont relativement rares sous nos latitudes si le bâtiment a été bien conçu. Ils peuvent être beaucoup plus fréquents sous un climat chaud.

10.2 Différents compléments possibles au night cooling

Idéalement, les systèmes techniques complémentaires pourraient aussi s'inspirer de mécanismes observés dans la nature. En tous cas, ils devraient être aussi économes que possible en énergie. On en décrit brièvement trois dans les paragraphes qui suivent : refroidissement adiabatique, amélioration des surfaces d'échanges de chaleur et le brassage de l'air.

10.2.1 Refroidissement adiabatique

L'utilisation de l'eau dans l'architecture des pays où la température en journée est très élevée est une technique aussi ancienne que l'architecture elle-même.

Cette technique fonctionne par l'évaporation de l'eau et le transfert de chaleur entre l'air et la vapeur d'eau. Elle permet une ventilation diurne lorsque le night cooling n'est pas suffisant ou lorsque la masse thermique ne permet pas de stocker toute la chaleur accumulée. Ce système de refroidissement adiabatique peut être mis en œuvre dans les bâtiments de grandes dimensions et pour lesquels les charges thermiques internes sont élevées (Noé21, 2012).

L'air chaud traverse un échangeur humide alimenté par une source d'eau qui peut être trouvée dans un puits existant (comme à Seraing) ou dans la collecte des eaux pluviales (comme à Melbourne).

Coolea (2015) propose des valeurs théoriques (tableau 13 ci-dessous) qui donnent la température de pulsion de l'air à l'intérieur d'un bâtiment après avoir traversé une masse humide, sur base de la température et de l'humidité relative de l'air à la reprise. On y voit que le refroidissement est efficace, principalement lorsque l'air est chaud et sec. Ce système est moins performant lorsque l'air extérieur est humide.

	Température Air à la reprise (°C)				
	20	25	30	35	40
HR ext.	Température Air au soufflage (°C)				
10%	9,3	12,4	15,6	18,6	21,6
20%	10,7	14,3	17,8	21,2	24,7
30%	12,1	15,9	19,7	23,5	27,4
40%	13,5	17,4	21,5	25,7	NO
50%	14,6	19	23,2	NO	NO
60%	15,8	20,2	24,7	NO	NO
70%	16,9	21,5	NO	NO	NO
80%	18	NO	NO	NO	NO

Tabl. 13 : Températures de pulsion en fonction de la température et humidité relative de l'air traité [Coolea]

Comme on pulse un air chargé d'humidité, il faut évidemment prêter attention aux dégâts causés dans le bâtiment par un taux d'humidité élevé de l'air ambiant.

Ces systèmes adiabatiques demandent une certaine consommation d'énergie pour le pompage du flux d'eau et la pulsion du flux d'air à travers l'échangeur. A condition que le coût additionnel soit acceptable, on peut améliorer le rendement thermique du système en pulvérisant le flux d'eau. En effet, la surface totale d'échanges est alors augmentée entre l'air et l'eau.

Un calcul simple le montre, sur base des formules donnant la surface et le volume d'une sphère.

$$V = \frac{4 \pi R^3}{3} \text{ et } S = 4 \pi R^2 = 4 \pi \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{2/3}$$

Pour un même volume total d'eau, si on considère que le volume d'une goutte passe de V à V' et $\frac{V'}{V} = n$, on peut estimer le rapport surfacique du total des gouttes ainsi :

$$\frac{S'}{S} = n^{-1} \left(\frac{V'}{V} \right)^{2/3} = \left(\frac{1}{n} \right)^{1/3}$$

Donc, si on réduit la taille de gouttes d'un facteur 10, on augmente par 2,15 la surface d'échange.

Sachant que des gouttelettes de 7mm de rayon provoquent un refroidissement de 12°C sur quelques mètres (Pearlmutter et al., 1996), il est possible d'évaluer la taille adéquate des gouttes pour atteindre la diminution de température voulue ou pour contraindre la taille du système. Ainsi, à Melbourne, la hauteur de la chute est de 15m. En micro-pulvérisant le flux d'eau, on pourrait réduire la hauteur de chute à 7 ou 8 mètres.

10.2.2 Extension des surfaces d'échanges thermique

On peut aussi chercher à améliorer le rendement du night cooling en augmentant les surfaces d'échanges entre le flux d'air et le béton. On a déjà évoqué les plafonds incurvés (cas de Harare et de Melbourne).

Les murs intérieurs, accessibles à l'air, peuvent aussi être dotés de surfaces rugueuses, ou incurvées ou de toute autre forme intéressante qui retient l'air ou crée une turbulence locale et améliore l'échange thermique.

Le dimensionnement statique du night cooling (tableur Excel) ne tient pas compte des capacités thermiques de l'air ni du béton et fixe directement les débits d'air souhaités. Dans la simulation dynamique permise par le modèle EES, le raisonnement peut être affiné et les paramètres déterminants pour le transfert de chaleur peuvent être fixés.

Si l'on suppose qu'une longueur de murs de 10m n'est plus plane, mais constituée de 20 alvéoles en demi-cercles, on peut calculer la longueur totale comme suit :

$$L = \frac{1}{2} * 20 * 2\pi * 25\text{cm} = 15,7\text{m}$$

On obtient un facteur multiplicateur de 1,57. C'est excessif, puisque tous les murs et plafonds ne pourraient pas être incurvés autant. Mais ceci permet de donner une bonne idée de l'effet réel de l'augmentation des surfaces d'échanges (à masse constante) sur les performances thermiques du bâtiment.

La simulation du jour 2 à Kaboul, sans le refroidissement adiabatique, a servi de base à cette dernière simulation. Les données relatives aux murs sont multipliées par un facteur 1,57 qui représente donc l'augmentation des surfaces d'échanges sur des murs et plafonds incurvés. Il faut en même temps contraindre le volume de béton à sa valeur initiale. Le tableau 14 donne la comparaison des résultats obtenus.

	Surface de béton initiale : 389m²	Surface de béton augmentée : 610,73m²
FERMETURE DES FENETRES (MATIN) APRES 2H		
T° air ext [°C]	20	
T° béton [°C]	22,22	
T° air int [°C]	21,27	
OCCUPATION (JOURNEE) APRES 10H		
T° air ext [°C]	32	
T° béton [°C]	23	23,22
T° air int [°C]	29,23	27,76

Tabl. 14 : Résultats d'une augmentation de la surface de contact entre l'air et le béton

Si on remplace les alvéoles semi-circulaires, par des alvéoles de type elliptique, il faut introduire un facteur d'atténuation pour tenir compte de leur aplatissement. Pour des alvéoles de 5cm de profondeur (au lieu donc de 25 cm), le facteur serait encore de 1,133 (au lieu de 1,57) et la réduction de la température ambiante serait de l'ordre d'environ 0,5°C au lieu d'environ 1,5°C.

On voit que ceci améliore beaucoup le comportement du bâtiment pendant les journées les plus chaudes, mais ça ne suffit pas toujours.

10.2.3 Brassage de l'air

A surface d'échanges donnée, et pour un remplacement donné du volume d'air dans la pièce, l'architecte peut aussi tenter d'amener plus d'air en contact avec le béton. Par rapport au paragraphe précédent, la logique est inversée. Ceci est alors de nature à améliorer la performance du night cooling. C'est l'objet de ce paragraphe.

Les logiciels permettant de dimensionner le système de ventilation tiennent compte d'un volume d'air et d'un taux de renouvellement, ce qui donne un débit d'air souhaité. Le fait de mieux brasser l'air intérieur ne peut être pris en compte que de façon indirecte, par une augmentation du taux de renouvellement ou du débit.

Dans les courbes tirées du monitoring du night cooling à Seraing, on voit que la température intérieure diminue très rapidement, dès l'ouverture des fenêtres, par le renouvellement rapide de toute la masse d'air chaud. Et une fois les fenêtres fermées, la température de l'air intérieur remonte assez vite (en une à deux heures) jusqu'à atteindre à nouveau (en quelques heures) la température de surface du béton qui, elle, diminue en se déchargeant sur la masse d'air, mais très lentement.

Si l'on veut mieux rafraîchir toute la masse du béton, on peut prévoir deux stratégies complémentaires :

- ouvrir les fenêtres pendant un temps relativement court (15 minutes ?), toutes les une à deux heures, pour permettre, entre deux ouvertures, un échange suffisant entre le volume d'air neuf et la masse du béton ; ceci permettrait probablement d'évacuer davantage de chaleur ; en effet, en laissant les fenêtres ouvertes plus longtemps, une part importante du flux d'air sortant n'a pas eu le temps de se réchauffer au contact du béton ;
- brasser l'air intérieur pendant les périodes de fermeture des fenêtres permettrait normalement d'accumuler plus de chaleur dans la masse de l'air avant de l'évacuer lors de l'ouverture suivante ; dans ce cas, le brassage de l'air peut alors aussi s'étendre à des zones moins accessibles du bâtiment ; ceci demande évidemment d'adjoindre un système technique spécifique.

L'observation des termitières a montré que le mélange de l'air se réalise sous l'effet de vibrations créées par le vent sur la structure et grâce au réseau réticulaire interne. La structure filtre certaines fréquences qui correspondent à ses modes propres d'oscillation.

Il semble que les vibrations résultantes se transmettent à l'air intérieur et permettent son mélange avec le CO₂ produit dans le nid, qui est plus lourd et qui, sans cela, ne pourrait pas s'évacuer.

Comme exposé plus haut, il serait téméraire de prétendre remplacer la force du vent par un système mécanique. La consommation d'énergie serait trop grande et la structure du bâtiment serait sans doute trop sollicitée. On peut par contre essayer d'agir directement sur le volume de l'air. C'est ce que propose, par exemple, Scott Turner (2011), comme piste de réflexion pour améliorer l'oxygénation dans les galeries secondaires des mines.

Une rapide recherche sur ce concept d'utilisation des ondes acoustiques (infrasons) donne de nombreuses références en relation avec la réfrigération et la climatisation, mais aucune sur la ventilation. Il s'agit en tous cas d'un domaine de recherche devenu très dynamique et qui commence à produire de résultats exploitables.

A terme, il est très possible qu'une machine acoustique remplace les climatiseurs. Leur avantage est de n'utiliser aucun gaz à effet de serre et de ne comporter pratiquement aucune pièce d'usure. Par contre, les rendements pour l'instant sont encore un peu faibles. En théorie toutefois, ces systèmes devraient être moins consommateurs d'énergie que les climatiseurs classiques, par la faiblesse des pertes de charges.

CONCLUSION

Le biomimétisme est une démarche visant à élaborer des matériaux ou des systèmes techniques qui imitent les mécanismes observés dans la nature.

Il faut souligner que cette démarche possède un caractère très aléatoire.

- La nature ne gaspille rien, mais elle n'atteint pas un but humain, de rendement ou de confort. A titre de comparaison, l'équivalent-termitière pour abriter un employé communal dans un bureau standard (12 m²) de la cité administrative de Seraing demanderait une tour de 140 mètres de hauteur au-dessus du bureau ;
- Les problèmes que les termites ont dû résoudre ne se résument pas à la seule ventilation du nid : on a vu que leurs constructions pourraient aussi inspirer le développement d'un nouveau liant naturel que certaines populations africaines utilisent, mais en détruisant les termitières.
- Les problèmes posés par une question technique particulière, la ventilation intensive des bâtiments, pourront trouver d'autres sources d'inspiration dans la nature. C'est le cas de la ventilation par évaporation : qui n'a pas observé ce phénomène à proximité d'une cascade ? D'ailleurs dans ce cas, l'architecte peut aussi se tourner vers l'histoire, car, pour construire, nos ancêtres avaient observé la nature avant nous...

Ce travail est parti d'une lecture sur le biomimétisme dans laquelle étaient citées quelques réalisations techniques inspirées de la nature. En particulier, on y mentionnait la réalisation du bâtiment de Harare, comme un modèle inspiré du fonctionnement des termitières.

A partir du cas de Harare et de quelques autres bâtiments remarquables, ce point de vue de départ a mené à étudier plus en détail la ventilation intensive des bâtiments, ce qui a ensuite permis d'aborder beaucoup d'aspects liés au calcul des transferts d'énergie et à la régulation thermique d'un bâtiment.

L'étude de la cité administrative de Seraing, qui est actuellement le plus grand immeuble passif de bureaux en Wallonie et qui met en œuvre des solutions de ventilation innovantes, m'a permis d'apprendre à manipuler un logiciel de base (EES) pour le dimensionnement des systèmes.

En modifiant les paramètres appliqués à Seraing, le logiciel permet d'identifier les difficultés que rencontrerait ce bâtiment transposé dans un climat chaud et sec. Les risques de surchauffe y sont beaucoup plus importants que chez nous et l'analyse montre que l'effet 'cheminée', qui est exploité comme dans la termitière, n'offre pas une réponse suffisante à ce problème.

Les tentatives actuelles n'ont pas encore abouti pour exploiter un autre effet identifié sur les termitières : l'effet cinétique et le brassage de l'air que provoquent les vibrations acoustiques. Par contre l'exploitation du processus adiabatique de l'évaporation de l'eau est bien connue depuis longtemps et particulièrement efficace dans cette situation de surchauffe en cours de journée.

L'analyse de quatre bâtiments exemplaires a permis de se rendre compte qu'aux systèmes de ventilation naturelle intensive mis en œuvre, sont toujours adjoints d'autres systèmes, complémentaires, qui permettent de couvrir la gamme des diverses situations possibles : l'utilisation de matériaux massiques est une constante et des systèmes de pulsion mécaniques sont toujours présents en appoint.

Par contre tous les cas étudiés évitent les systèmes de conditionnement d'air, sauf à Melbourne où des techniques très performantes ont été exploitées pour réduire la durée d'utilisation du système et sa consommation d'énergie. Malgré des conditions difficiles d'exploitation, les serres de Kew Gardens évitent aussi l'utilisation systématique d'un conditionnement d'air.

L'analyse du fonctionnement de la cité administrative de Seraing a pâti de l'absence de données par suite d'un enregistrement très partiel des relevés en cours d'année et de pannes encourues lors de la connexion au serveur. Avec cette information partielle, il a tout de même été possible de confirmer que globalement le night cooling fonctionne conformément aux prévisions initiales. Et des améliorations ont aussi été proposées pour changer les températures de consigne qui déterminent la fermeture des fenêtres pendant la nuit.

Plusieurs pistes d'approfondissement ont été proposées.

Des systèmes de refroidissement par pulvérisation de l'eau existent et, sous réserve du coût en énergie de la pulvérisation elle-même, ces systèmes sont plus efficaces. Le cas du CH2 à Melbourne est intéressant à cet égard et démontre que ces processus doivent être intégrés dès la conception du bâtiment.

L'optimisation des surfaces d'échanges thermiques fait partie de la conception architecturale du bâtiment et mériterait une recherche sur les designs les mieux adaptés.

Enfin, les moyens de brasser l'air plus efficacement, en particulier dans les zones moins accessibles du bâtiment, sont une piste de travail également, si l'on veut éviter les systèmes mécaniques classiques.

TABLE DES FIGURES

Fig. 1 : Diagramme de Mollier.....	7
Fig. 2 : Evolution dans le temps de l'apport de chaleur dû à l'ensoleillement dans un local avec ou sans inertie thermique : comparaison entre la chaleur instantanée transmise au travers du vitrage et la chaleur restituée au local.....	9
Fig. 3 : Exposition énergétique (Wh/m^2) pour une année type et gains solaires moyens sur une journée sous ciel serein suivant les différentes orientations.....	10
Fig. 4 : Rayonnement solaire traversant un double vitrage par ciel serein (%).....	11
Fig. 5 : Températures du sol.....	11
Fig. 6 : Puits provençal/canadien.....	11
Fig. 7 : Echangeur géothermique.....	12
Fig. 8 : Slab cooling.....	13
Fig. 9 : Ventilation par évaporation.....	13
Fig. 10 : Diminution de la température de l'air après son passage à travers un nuage d'eau.....	13
Fig. 11 : TGV japonais Shinkansen inspiré par le bec du martin-pêcheur (gauche) et vitrage autonettoyant inspiré par feuille de lotus (droite).....	15
Fig. 12 : Termitières 'Amitermes Meridionalis' vue de profil (gauche) et de face (droite).....	17
Fig. 13 : Termitière cathédrale au Mali.....	18
Fig. 14 : Nid de Macrotermes.....	18
Fig. 15 : Flux induit.....	18
Fig. 16 : Flux thermosiphon.....	19
Fig. 17 : 'Macroterme michaelsoni', Namibie.....	20
Fig. 18 : Températures annuelles du nid d'une 'Macroterme michaelsoni' en Namibie.....	20
Fig. 19 : Températures à l'intérieur du nid et de la cheminée.....	21
Fig. 20 : Comparaison entre le poumon (gauche) et la termitière (droite).....	22
Fig. 21 : Différentes fréquences du vent.....	23
Fig. 22 : Circulation du vent à travers la termitière.....	23
Fig. 23 : Influence de la vitesse d'inspiration sur un modèle.....	24
Fig. 24 : Innovations potentielles pour les briques et les murs.....	26
Fig. 25 : Eastgate building à Harare.....	30
Fig. 26 : Eastgate Building – Plan type.....	31
Fig. 27 : Réflexion du soleil sur les surfaces lisses et épineuses.....	32
Fig. 28 : Façade et distribution thermique dans l'Eastgate Building.....	32
Fig. 29 : Coupe et distribution thermique dans le bâtiment.....	33
Fig. 30 : Distribution thermique dans la termitière.....	33
Fig. 31 : Dalle préfabriquée (gauche) et plafond voûté en béton (droite).....	33
Fig. 32 : Températures relatives à l'Eastgate Building – Avril 1998.....	34
Fig. 33 : Queen's building de l'université de Montfort.....	35
Fig. 34 : Queen's Building – Plan du premier étage.....	36
Fig. 35 : Flux d'air dans le bâtiment central.....	38
Fig. 36 : Flux d'air dans le laboratoire de mécanique.....	38
Fig. 37 : Flux d'air dans les laboratoires d'électricité.....	39
Fig. 38 : Profil des températures estivales – Juin à Août 1994.....	40
Fig. 39 : Températures dans le bâtiment – Juin à Août 1994.....	40
Fig. 40 : Données concernant le Queen's Building.....	41
Fig. 41 : Council House 2 à Melbourne.....	42
Fig. 42 : Council House 2 – Plan type.....	43
Fig. 43 : Flux d'air à travers le bâtiment pendant le jour (à gauche) et la nuit (à droite).....	44
Fig. 44 : Système de dalles.....	45
Fig. 45 : Cylindres sur la façade sud.....	45
Fig. 46 : Conduits traversés par l'eau froide sous les dalles ondulées en béton.....	46
Fig. 47 : Davies Alpine House à Londres.....	48
Fig. 48 : Davies Alpine House – Plan.....	49
Fig. 49 : Entrées d'air intégrées dans la verdure.....	50

Fig. 50 : Labyrinthe en sous-sol réalisé en parpaings.....	50
Fig. 51 : Flux thermiques dans le labyrinthe en sous-sol.....	50
Fig. 52 : Protections solaires amovibles.....	51
Fig. 53 : Coupe transversale dans le bâtiment.....	51
Fig. 54 : Cité administrative de Seraing en août 2014.....	56
Fig. 55 : Plan type (gauche) et coupe transversale (droite) de la cité administrative.....	57
Fig. 56 : Stratégie de froid de jour (gauche) et stratégie de froid de nuit (droite).....	58
Fig. 57 : Détail des protections solaires, fixes et amovibles.....	59
Fig. 58 : Etude des protections solaires.....	59
Fig. 59 : Emplacement des coefficients de pression sur le bâtiment.....	65
Fig. 60 : Cp 21 (Façade Est – R+3) – Diagrammes réalisés par le logiciel TNO.....	65
Fig. 61 : Cité administrative – Etage type.....	67
Fig. 62 : Formules pour calculer la surface d'ouverture « A » d'un châssis oscillant – Valeurs théoriques...	69
Fig. 63 : Fenêtres de la cité administrative.....	69
Fig. 64 : Surface d'ouverture – Valeurs appliquées à la cité administrative.....	69
Fig. 65 : Températures ambiantes (°C) sur une année – Tous les étages.....	76
Fig. 66 : Températures ambiantes (°C) sur une année – Etages de R+1 à R+6.....	76
Fig. 67 : Températures ambiantes (°C) – Semaine type.....	78
Fig. 68 : Températures ambiantes (°C) – Journée type.....	78
Fig. 69 : Températures ambiantes (°C) – Profil de chute.....	80
Fig. 70 : Températures ambiantes (°C) – Etages R+1 et R+2.....	81
Fig. 71 : Températures ambiantes (°C) – Temps de refroidissement.....	83
Fig. 72 : Ouverture et fermeture des stores (0 – 1).....	84
Fig. 73 : Protections des bouches d'aération.....	85
Fig. 74 : Stores intérieurs ajoutés par les occupants (gauche) et nouvelle paroi dans l'accueil (droite).....	86
Fig. 75 : Données climatiques à Kaboul.....	88
Fig. 76 : Simulation d'une journée type à Seraing.....	90
Fig. 77 : Simulation d'une journée type à Kaboul.....	91
Fig. 78 : Simulation d'une seconde journée à Kaboul.....	91
Fig. 79 : Simulation du refroidissement adiabatique à Kaboul.....	92

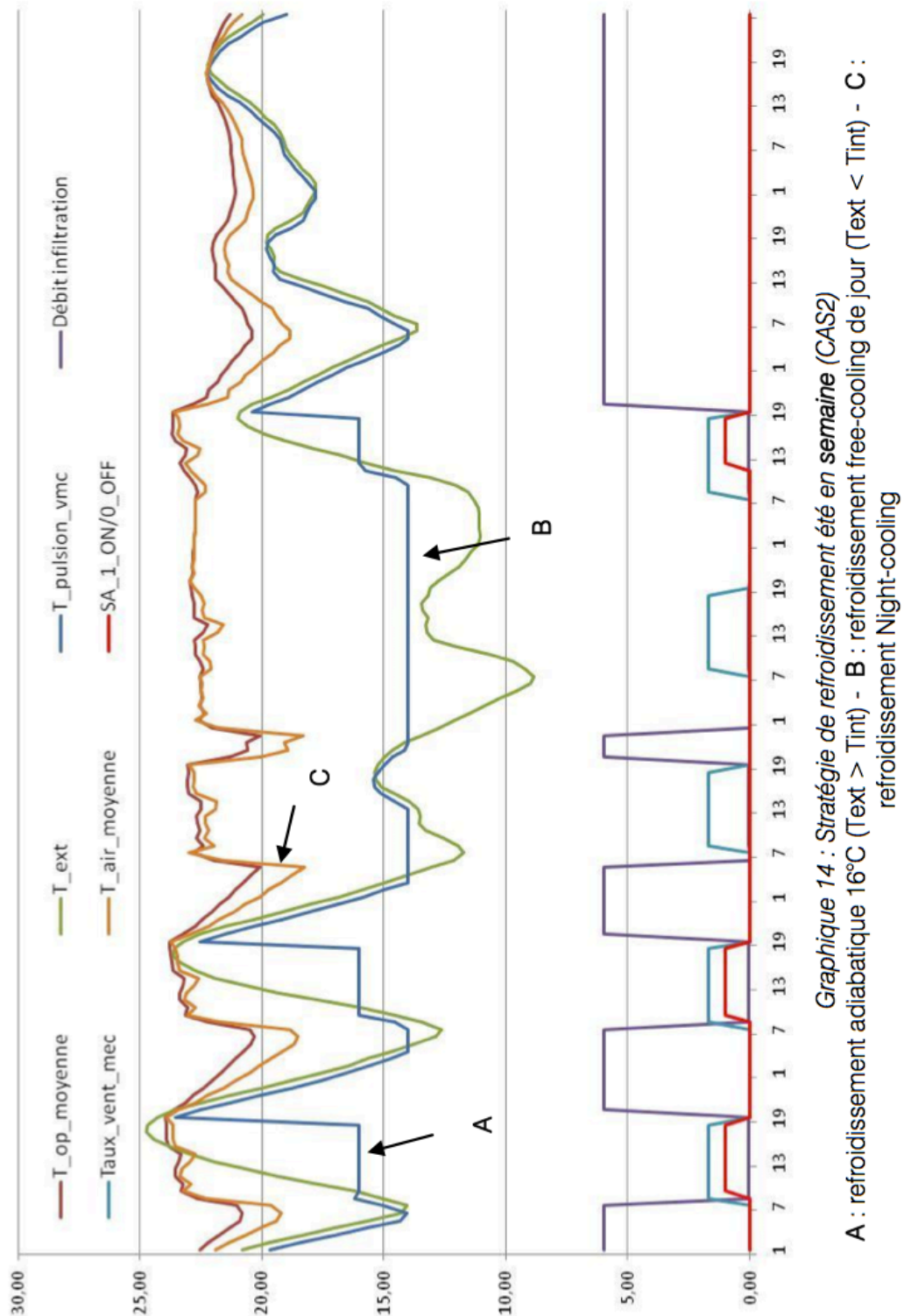
TABLE DES TABLEAUX

Tabl. 1 : Paramètres de α et γ selon le type de terrain.....	62
Tabl. 2 : Calculs des débits et des surfaces d'ouverture en toiture en fonction du tirage thermique.....	62
Tabl. 3 : Coefficients de pression sur chaque façade pour une orientation de 260°.....	66
Tabl. 4 : Pertes de charges calculées pour la ventilation transversale (gauche) et pour la ventilation par effet cheminée (droite).....	66
Tabl. 5 : Pertes de charges selon l'effet combiné du vent et du tirage thermique.....	68
Tabl. 6 : Calculs des débits et des surfaces d'ouverture en toiture en fonction du vent.....	68
Tabl. 7 : Calculs de la ventilation unilatérale du 2 ^{ème} étage.....	68
Tabl. 8 : Résultats du pré-dimensionnement du night cooling.....	70
Tabl. 9 : Calculs réalisés pour le cas 1 – Ventilation naturelle sans extracteur.....	71
Tabl. 10 : Calculs réalisés pour le cas 2 – Ventilation naturelle avec extracteurs.....	72
Tabl. 11 : Tableau de comparaison entre Seraing et un climat chaud.....	89
Tabl. 12 : Tableau récapitulatif des simulations réalisées sur EES.....	92
Tabl. 13 : Températures de pulsion en fonction de la température et humidité relative de l'air traité.....	94
Tabl. 14 : Résultats d'une augmentation de la surface de contact entre l'air et le béton.....	95

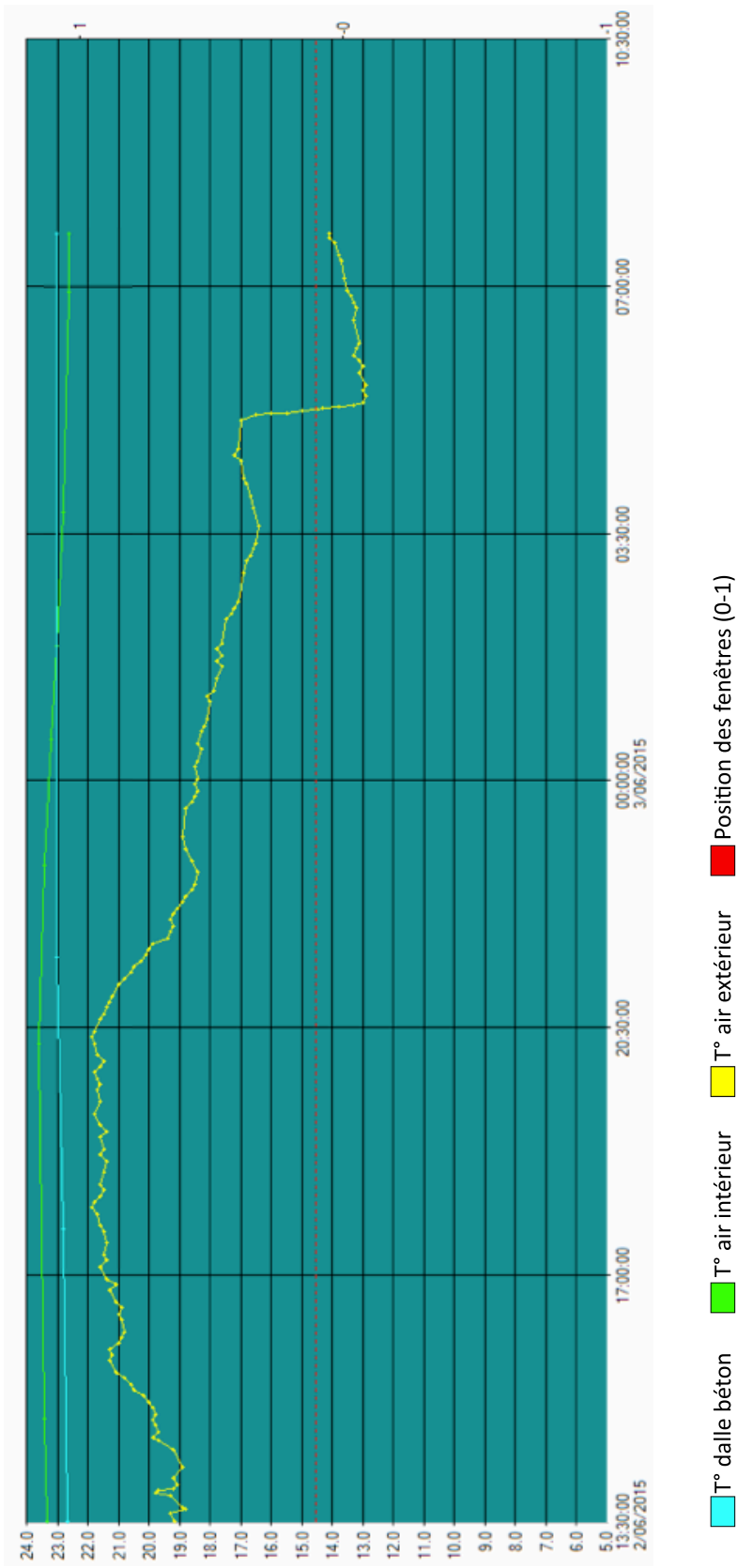
ANNEXES

Annexe 1 : Résultat d'une simulation TRNSYS (Neo Construct & Ides Engineering, 2009)

TRNSYS a été utilisé pour dimensionner la ventilation naturelle et mécanique de la cité administrative à Seraing. Les courbes ci-dessous montrent le résultat en températures (courbe orange) pour diverses hypothèses de fonctionnement (refroidissement adiabatique, pulsion mécanique et ventilation naturelle) pendant une semaine.



Annexe 2 : Diagramme obtenu pour la journée du 02 juin 2015 sur le monitoring de la cité administrative.



Annexe 3 : Développement des calculs réalisés à l'aide du logiciel EES (Masy, 2008)

```
function F_h(a;b;c)
D_1=c/a
D_2=c/b
F_h=1/(4*pi)*arctan((1/(D_1^2+D_2^2+D_1^2*D_2^2))^0,5)
end
subprogram CalculPMV(E_dot_m;A_sk;l_cl;T_a;T_w;P_a;RH;U_a:PMV)

"!données"
"E_dot_m=100
A_sk=1.8
l_cl=2
T_a=20
T_w=20
P_a=1e5
RH=0.5
U_a=0.1"
"!inconnues:"
"PMV, PPD"
"!modèle"
"1. calcul du flux à dissiper"
Q_dot_m=E_dot_m-W_dot
W_dot=0

"2. Calculer le flux dissipable"
"2.1. Respiration"
H_dot_r=M_dot_R*(h_R_ex-h_R_su)
T_R_ex=34
w_R_ex=humrat(airH2O;T=35,8;R=1;P=P_a)
h_R_ex=enthalpy(airH2O;T=T_R_ex;w=w_R_ex;P=P_a)
RH_R_ex=relhum(airH2O;T=T_R_ex;w=w_R_ex;P=P_a)
M_dot_R=M_dot_CO2*MM_air/(MM_CO2*X_CO2)
X_CO2=0,05
M_dot_CO2=1,05e-7*E_dot_m
MM_air=molarmass(air)
MM_CO2=molarmass(CO2)
h_R_su=enthalpy(airH2O;T=T_a;P=P_a;R=RH)
H_dot_r_s=M_dot_R*c_p_R_su*(T_R_ex-T_a)
c_p_R_su=CP(airH2O;T=T_a;P=P_a;R=RH)
H_dot_R_l=H_dot_r-H_dot_r_s

"2.2. Flux latent à la surface de la peau"
H_dot_persp=M_dot_w_persp*h_w_sk
h_w_sk=enthalpy(water;T=T_sk;x=1)
"T_sk=34" "guess"
M_dot_w_persp=A_sk*K_D*(P_w_sk-P_w_a)
K_D=1,3e-9
P_w_sk=pressure(water;T=T_sk;x=1)
P_w_a=RH*pressure(water;T=T_a;x=1)
T_sk=35,7-0,028*Q_dot_m/A_sk
```

$H_{\text{dot_sweat}}/A_{\text{sk}} = \max(0; 0,42 * (Q_{\text{dot_m}}/A_{\text{sk}} - 58))$

"2.3. Flux sensible à la surface de la v ture"

$Q_{\text{dot_cl}} = A_{\text{sk}}/R_{\text{cl}} * (T_{\text{sk}} - T_{\text{cl}})$

$R_{\text{cl}} = 0,155 * I_{\text{cl}}$

$T_{\text{cl}} = 28$ "guess"

"2.3.1. Echange radiatif"

$Q_{\text{dot_rad}} = A_{\text{cl}} * F * h_r * (T_{\text{cl}} - T_w)$

$h_r = \epsilon * \sigma * 4 * ((T_{\text{cl}} + 273 + T_w + 273)/2)^3$

$\epsilon = 0,95$

$F = 0,71$

$A_{\text{cl}} = f_{\text{cl}} * A_{\text{sk}}$

$f_{\text{cl}} = 1,05 + 0,1 * I_{\text{cl}}$

"2.3.2. Echange convectif"

$Q_{\text{dot_c}} = A_{\text{cl}} * h_c * (T_{\text{cl}} - T_a)$

$h_c = \max(h_{c_n}; h_{c_f})$

$h_{c_n} = 2,5 * (\text{abs}(T_{\text{cl}} - T_a))^{0,25}$

$h_{c_f} = 12,1 * U_a^{0,5}$

$Q_{\text{dot_cl}} = Q_{\text{dot_rad}} + Q_{\text{dot_c}}$ "permet de recalculer T_{cl} "

"2.4. Flux total dissipable"

$Q_{\text{dot_a}} = H_{\text{dot_r}} + H_{\text{dot_persp}} + H_{\text{dot_sweat}} + Q_{\text{dot_cl}}$

"2.5. PMV"

$L_{\text{dot}} = Q_{\text{dot_m}} - Q_{\text{dot_a}}$

$PMV = C * L_{\text{dot}}/A_{\text{sk}}$

$C = 0,303 * \exp(-0,037 * Q_{\text{dot_m}}/A_{\text{sk}}) + 0,0275$

"2.6. PPD"

$PPD = 100,95 * \exp(-0,03353 * PMV^4 - 0,2179 * PMV^2)$

END

"1. Caractéristiques du bâtiment"

"1.1. G om trie du bureau"

length=17

width=13

height=2,8

$A_{\text{floor}} = \text{length} * \text{width}$

$V_{\text{in}} = \text{length} * \text{width} * \text{height}$

$A_{\text{zone}} = 2 * (\text{length} * \text{height} + \text{width} * \text{height}) + \text{length} * \text{width}$

$A_{\text{window}} = 41,36$ "fenêtre"

$A_{\text{wall}} = 389$ " $A_{\text{zone}} - A_{\text{window}}$ " "parois opaques"

"1.2. Vitrages"

$AU_{\text{window}} = A_{\text{window}} * U_{\text{window}}$

$U_{\text{window}} = 1,25$

SHGC=0 "solar factor"

"1.3. Murs opaques"

$AU_{\text{wall}} = A_{\text{wall}} * U_{\text{wall}}$

$U_{\text{wall}} = 0,102$ [W/m²-K]

$f_{\theta} = 0,11 [-]$
 $f_{\phi} = 0,53 [-]$
 $C_{\text{wall}_m2} = 506000 [\text{J/m}^2\text{-K}]$
 $R_{\text{wall}} = 1/AU_{\text{wall}}$

"2. Conditions météo"

$I_{\text{tot}} = 80$
 $T_{\text{out}} = 17$
 $P_{\text{atm}} = 101325$

"3. Bilan énergétique"

"3.1. Transferts de chaleur au travers vitrages"

$\dot{Q}_{\text{dot_window}} = AU_{\text{window}} * (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$
 $\dot{Q}_{\text{dot_window_global}} = \dot{Q}_{\text{dot_window}} + \dot{Q}_{\text{dot_sol}}$
 $\dot{Q}_{\text{dot_sol}} = SHGC * I_{\text{tot}} * A_{\text{window}}$

"3.2. Transferts de chaleur au travers des parois"

$\dot{Q}_{\text{dot_wall_out}} = 1 / (R_{\text{wall}} * (1 - f_{\theta})) * (T_{\text{out}} - T_{\text{wall}})$
 $\dot{Q}_{\text{dot_wall_in}} = 1 / (R_{\text{wall}} * f_{\theta}) * (T_{\text{wall}} - T_{\text{in}})$
 $\dot{Q}_{\text{dot_wall_out}} - \dot{Q}_{\text{dot_wall_in}} = dU/d\tau_{\text{wall}}$
 $\Delta U_{\text{wall}} = \text{integral}(dU/d\tau_{\text{wall}}; \tau; \tau_1; \tau_2; \Delta T_{\text{atm}})$
 $\Delta U_{\text{wall}} = C_{\text{wall}} * (T_{\text{wall}} - T_{\text{wall}_1})$
 $T_{\text{wall}_1} = 24 [^{\circ}\text{C}]$
 $C_{\text{wall}} = A_{\text{wall}} * C_{\text{wall}_m2} * f_{\phi}$

"3.3. Ventilation"

$\dot{V}_{\text{dot_vent_m3h}} = 4116$
 $\dot{V}_{\text{dot_vent}} = \dot{V}_{\text{dot_vent_m3h}} / 3600$
 $\rho_a = 1,204$
 $\dot{M}_{\text{dot_vent}} = \dot{V}_{\text{dot_vent}} * \rho_a$
 $c_{p_a} = 1005$
 $\dot{C}_{\text{dot_vent}} = \dot{M}_{\text{dot_vent}} * c_{p_a}$
 $R_{\text{vent}} = 1/\dot{C}_{\text{dot_vent}}$
 $\dot{Q}_{\text{dot_vent}} = \dot{C}_{\text{dot_vent}} * (T_{\text{vent}} - T_{\text{in}})$
 $T_{\text{vent}} = T_{\text{out}}$

"3.4. Infiltration"

$ACH = 0$ "air changes per hour"
 $\dot{V}_{\text{dot_inf_m3h}} = ACH * V_{\text{in}}$
 $\dot{V}_{\text{dot_inf}} = \dot{V}_{\text{dot_inf_m3h}} / 3600$
 $\dot{M}_{\text{dot_inf}} = \dot{V}_{\text{dot_inf}} * \rho_a$
 $\dot{C}_{\text{dot_inf}} = \dot{M}_{\text{dot_inf}} * c_{p_a}$
 $\dot{Q}_{\text{dot_inf}} = \dot{C}_{\text{dot_inf}} * (T_{\text{out}} - T_{\text{in}})$

"3.5. Gains internes"

$\dot{Q}_{\text{dot_int}} = \dot{Q}_{\text{occ}} + P_{\text{ecl}_m2} * A_{\text{floor}} + P_{\text{appl}_m2} * A_{\text{floor}}$
 $\dot{Q}_{\text{occ}} = 100 * 0$
 $P_{\text{ecl}_m2} = 6 * 0$
 $P_{\text{appl}_m2} = 8 * 0$

"3.7. Bilan"

$\dot{Q}_{\text{dot_window}} + \dot{Q}_{\text{dot_sol}} + \dot{Q}_{\text{dot_int}} + \dot{Q}_{\text{dot_wall_in}} + \dot{Q}_{\text{dot_vent}} + \dot{Q}_{\text{dot_inf}} + \dot{Q}_{\text{dot_heating}} = dU/d\tau_{\text{in}}$
 $\Delta U_{\text{in}} = \text{integral}(dU/d\tau_{\text{in}}; \tau; \tau_1; \tau_2; \Delta T_{\text{atm}})$
 $\Delta U_{\text{in}} = C_{\text{in}} * (T_{\text{in}} - T_{\text{in}_1})$
 $T_{\text{in}_1} = 23$
 $C_{\text{in}} = 5 * V_{\text{in}} * \rho_a * c_{p_a}$ "Facteur 5 pour prendre en compte le mobilier"

"3.8. chauffage"

$Q_{\text{dot_heating}} = 0 \times 500 \text{ [W]}$ "Puissance constante de chauffage"

$Q_{\text{heating_kWh}} = \text{integral}(Q_{\text{dot_heating}}; \tau; \tau_1; \tau_2; \text{DELTA}\tau) / 3,6\text{E}6$

"4. Calcul du confort thermique"

"4.1. Températures des parois"

$T_{\text{window_in}} = 20$

$T_{\text{wall_in}} = T_{\text{wall}}$

"4.2. Calcul des facteurs de vue"

$z_{\text{occ}} = 0,8$

$y_{\text{occ}} = 1,6$

$x_{\text{occ}} = 2$

"4.2.1. Calcul du facteur de vue entre l'occupant et la vitre"

$F_{\text{h_window}} = 2 \times F_{\text{h_window_up}} + 2 \times F_{\text{h_window_down}}$

$F_{\text{h_window_up}} = F_{\text{h}}(\text{width}/2; \text{height} - z_{\text{occ}}; x_{\text{occ}})$

$F_{\text{h_window_down}} = F_{\text{h}}(\text{width}/2; z_{\text{occ}}; x_{\text{occ}})$

"4.2.2. Calcul du facteur de vue entre l'occupant et les murs"

$F_{\text{h_wall}} = 1 - F_{\text{h_window}}$

"4.3. Calcul de la température moyenne de rayonnement"

$(T_{\text{w_in}} + 273)^4 = F_{\text{h_window}} \times (T_{\text{window_in}} + 273)^4 + F_{\text{h_wall}} \times (T_{\text{wall_in}} + 273)^4$

"4.4. Calcul du PMV"

$E_{\text{dot_m}} = 100$

$A_{\text{sk}} = 1,8$

$I_{\text{cl}} = 1$

$RH_{\text{in}} = 0,5$

$U_{\text{in}} = 0,05$

Call CalculPMV($E_{\text{dot_m}}$; A_{sk} ; I_{cl} ; T_{in} ; $T_{\text{w_in}}$; P_{atm} ; RH_{in} ; U_{in} ; PMV)

"5. Simulations"

$\tau_{\text{h_1}} = 0$

$\tau_{\text{h_2}} = 10$

$\text{DELTA}\tau_{\text{h}} = 0,01$

$\tau - \tau_1 = (\tau_{\text{h}} - \tau_{\text{h_1}}) \times 3600$

$\tau_1 = \tau_{\text{h_1}} \times 3600$

$\tau_2 = \tau_{\text{h_2}} \times 3600$

$\text{DELTA}\tau = \text{DELTA}\tau_{\text{h}} \times 3600$

\$IntegralTable τ :36;

τ_{h} ; T_{out} ; T_{wall} ; T_{in} ; $T_{\text{w_in}}$; $Q_{\text{dot_window}}$; $Q_{\text{dot_wall_in}}$; $Q_{\text{dot_vent}}$; $Q_{\text{dot_sol}}$; $Q_{\text{dot_int}}$; $Q_{\text{dot_heating}}$; PMV

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, R. (2008). *Council House 2 (CH2) A Video Tour | City of Melbourne*. Melbourne.
- Ademe et brgm. (2014, 10 janvier). *Rafrâichissement par géothermie, le géocooling*. En ligne : www.geothermie-perspectives.fr/article/rafraichissement-geothermie-geocooling, consulté le 08 avril 2015.
- André, P. (2010). *Physique du bâtiment*. ULg, DSGE, BEMS.
- Architecture et Climat. (2015). *Energie+*. Faculté d'architecture, d'ingénierie architecturale, d'urbanisme (LOCI), Université catholique de Louvain (Belgique). En ligne : <http://www.energieplus-lesite.be>, consulté le 20 novembre 2015.
- Asbridge, R. et Cohen, R. (1996). *Probe 4 : Queens Building*. Probe.
- Avems. (2010). *Guide de la ventilation naturelle et hybride*. France.
- Benyus, J. (2009, Juillet). *Biomimicry in action*. Oxford, Angleterre : TED Talks. Disponible sur <http://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>, consulté le 13 avril 2015.
- Benyus, J. (2011). *Biomimetisme*. Paris, Rue de l'échiquier.
- Bezelle, O. (2002, octobre 13). *C'est pas sorcier*. Vanves, Paris.
- Brandt, M. (2012). *Formation « Bâtiment durable : passif et (très) basse énergie »*. Ibge, Bruxelles.
- Bruxelles environnement. (2015) Climatisation : rafraîchir sans gaspiller l'énergie. En ligne <http://www.environnement.brussels/thematiques/energie/mon-energie/climatisation-rafraichir-sans-gaspiller-lenergie>, consulté le 19 mars 2015.
- Bunn, R. (2004, 29 Octobre). *Termite tutors*. Building Design. Royaume-Uni
- Busch, B. (2009, 14 décembre). *Passif Cooling*. ULB, Bruxelles.
- Busch, B. (2011). *Pré-dimensionnement night cooling*. Document de travail interne.
- Busch, B. et Greisch, P. (2015). *La cité administrative Place Kuborn à Seraing*.
- Caudrelier, O. (2014). *Mécanique des fluides : partie I*. Centre de préparation aux concours paramédicaux, France. En ligne <http://www.poly-prepas.com/images/files/2011%20Mécanique%20des%20Fluides%20cours%20LS1%20-%20partie%20I%20-.pdf>, consulté le 20 mars 2015.
- Ceebios. (2013). *Pourquoi la Nature est plus forte que nous ?* En ligne : <http://ceebios.com/le-biomimetisme/>, consulté le 27 mars 2015.
- City of Melbourne. (2015). *How it works*. Melbourne. Disponible sur : <https://www.melbourne.vic.gov.au/Sustainability/CH2/aboutch2/Pages/AboutCH2.aspx>, consulté le 24 mai 2015.
- City of Melbourne. (2006, 02 juin). *Technical Research Paper 05 : Heating and Cooling in the CH₂ Building*. Melbourne. Disponible sur : <http://www.melbourne.vic.gov.au/Sustainability/CH2/Pages/CH2Ourgreenbuilding.aspx>, consulté le 24 mai 2015.
- Coolea. (2015). *L'adiabatique*. En ligne : <http://www.coolea.fr/rep-adiabatique.html>, consulté le 06 avril 2015.
- DesignInc. (2011). *CH2 Melbourne City Council 2*. En ligne, <http://www.designinc.com.au/projects/ch2-melbourne-city-council-house-2>. Consulté le 12 mars 2015.
- Downe, M., Lee, M., Wakefield, B. et Phung, C. A. (2015). *Davies Alpine House*. Document non publié. Manchester. En ligne <http://daviesalpinehouse.weebly.com/environment.html>, consulté le 15 mars 2015.

- ESF. (2015). *Termite Research*. New York. En ligne : <http://www.esf.edu/efb/turner/termitePages/termiteMain.html>, consulté le 20 novembre 2015.
- Girard, C. et Lepage, M. (1991). *Vie et mort des termitières cathédrales*. Insectes, 82 (3), 3-6.
- Gratia, E et De Herde, A. (2006). *Thermique des immeubles de bureaux*. UCL, Presses universitaires de Louvain.
- Hannequart, J.-P. et Schamp, E. (2010). *Fiche 2.1 : la ventilation double flux dans les logements individuels et collectifs*. Ibge, Bruxelles.
- Hannequart, J. P. et Schamp, E. (2010). *Fiche 3.1 : Le free-cooling par ventilation intensive*. Ibge, Bruxelles.
- Hannequart, J. P. et Schamp, E. (2010). *Fiche 3.3 : Les risques de surchauffes*. Ibge, Bruxelles.
- Heintz, J. (2008). *Les puits canadiens/provençaux – Guide d'information*. France.
- Heredia, N. (2013, juin). *Le biomimétisme en architecture : réflexions sur une démarche constructive en pleine émergence*. Mémoire de master en architecture non publié, Ecole nationale supérieure d'architecture de Strasbourg, Strasbourg.
- Heukmes, M. et Poskin, H-J. (2014). *La ventilation en rénovation*. Colophon, France.
- Hickman, W. et Ellis, N. (2013). *Design Indaba*. Cap Town.
- Hoogland, M. et Bannister, P. (2012). *Council House 2 (CH2) in review*. Melbourne.
- Institut biomimétisme Québec. (2008). *Bâtir un monde fonctionnel en imitant la nature*. En ligne : <http://biomimicryqi.org/centre-eastgate-de-harare-au-zimbabwe/>, consulté le 20 novembre 2015.
- Iroko, F. (1996). *L'homme et les termitières en Afrique*. Karthala Editions.
- Kew. (2015) *Davies Alpine House*. En ligne <http://www.kew.org/visit-kew-gardens/explore/attractions/davies-alpine-house>, consulté le 14 mars 2015.
- Kim, D. (2012, 26 Octobre). *Council House 2 Overview*.
- Kim, J-K., Kawahashi, M., Hirahara, H. et Iwasaki, Y. (2009). *Experimental analysis of oscillatory airflow in a bronchiole model with stenosis*. Journal of Visualisation, Vol 12, No. 2, 109-118.
- Korb, J. (2003). *Thermoregulation and ventilation of termite mounds*. Naturwissenschaften, 90, 212–219. doi : 10.1007/s00114-002-0401-4.
- Krishan, A. (2001). *Climate responsive architecture : a design handbook for energy efficient building*. Tata McGraw-Hill Pub, New York, p146-153.
- Masy, G. (2008). *Definition and Validation of a Simplified Multizone Dynamic Building Model Connected to Heating System and HVAC Unit*. Thèse, Faculté des Sciences Appliquées à l'Université de Liège, Liège.
- Mayer, P. (2014, 29 décembre). *Arte documentaire animalier*.
- MelbourneCityCouncil. (2008, 03 Août). *Council House 2 (CH2) Animation | City of Melbourne*. Melbourne.
- Nélis, L., Baltus, C., Guillemeau, J-M. et Wagelmans, P. (2002). *La ventilation naturelle des habitations*. Fonds de la formation professionnelle de la Construction.
- Neo Construct et Ides Engineering. (2009, Octobre). *Dossier de conception énergétique*. Document de travail interne.
- Noé21. (2012). *Rafraichissement sans air conditionné : Etude sur les alternatives*. Genève.
- Park, N et Lord, P. (2010). *Wallace & Gromit's World of Invention*. Royaume-Uni.

- Pawlyn, M. (2010, Novembre). *Using nature's genius in architecture*. Londres, Angleterre : TED Talks. Disponible sur <http://biomimicry.org/what-is-biomimicry/>, consulté le 13 avril 2015.
- Pawlyn, M. (2011). *Biomimicry in architecture*. London : RIBA publishing. P. 77 – 89.
- Pearce, M. (2015). *Eastgate for students*. Document non publié.
- Pearce, M. (2007) *The cities and nature*. Sustainable Building Conference. Nouvelle Zélande.
- Pearce, M. (2015). *CH₂*. En ligne, <http://www.mickpearce.com/works/office-public-buildings/ch2/>, consulté le 12 mars 2015.
- Pearlmutter, D., Erell, E., Etzion, Y., Meir, I.A. et Di, H. (1996). *Refining the use of evaporation in the experimental down-draft cool tower*. Energy and Buildings, 23, 191–197.
- Perrault, M. (2014). *Evaluation de la vulnérabilité sismique de bâtiments à partir de mesures in situ*. Earth Sciences. Université de Grenoble, Grenoble.
- Quivrin, M. (2008). *Un exemple d'architecture inspirée des termites*. Insectes, 149 (2), 33-35. Paris.
- Russell, P. (2006). *Playing it cool*. Building Design. Royaume-Uni.
- Schüco. (2015). *Nouvelle cité administrative de la ville de Seraing*. Profile.
- Simon, F. et Hauglustaine, J-M. (2001). *La ventilation et l'énergie – Guide pratique pour les architectes*.
- Spring, M. (2006, 13 Avril). *Down from the mountain*. Building Design. Royaume-Uni.
- The Queens Building. (Anonymous, 1997). *New practice case study 102 : The Queens Building: De Montfort University*. Royaume-Uni.
- Tixier, N. (2001, octobre). *Confort thermique et énergétique*. Cours théorique donné à l'ENSA de Grenoble, Grenoble. En ligne : http://www.grenoble.archi.fr/cours-en-ligne/tixier/M21C_Cours_03.pdf, consulté le 8 février 2015.
- Turner, S. et Soar, R. (2008) Biomimicry : What termites can tell us about realizing the living building. In T. Hassan & J. Ye (Eds.), *Proceedings of the 1st international conference on industrialised, integrated, intelligent construction*, (pp. 215-231). Loughborough.
- Turner, S. (2011). *Learning from Nature : Termites mound lungs and the implications for breathing mines*.
- WilkinsonEyre. (2015). *Sustainability Case Study : Royal Botanical Gardens, Kew*. Londres.
- Zarnovican, K. (2007). *Etude paramétrique par simulation de l'influence de la ventilation naturelle, de l'orientation, de la géométrie et de l'occultation de la fenêtre sur les risques de surchauffes dans une chambre de CHSLD*. Mémoire. Université de Laval, Québec.